UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

**Valorización de residuos orgánicos
y su aprovechamiento
en la fabricación de nuevos hormigones**

TESIS DOCTORAL

JUAN REMIGIO COLOMA SANTAMARÍA
Ingeniero de Minas

Madrid, 2015

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Valorización de residuos orgánicos y su aprovechamiento en la fabricación de nuevos hormigones

Autor:
JUAN REMIGIO COLOMA SANTAMARÍA
Ingeniero de Minas

Director:
JOSÉ-LUIS PARRA Y ALFARO
Dr. Ingeniero de Minas

Madrid, 2015

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2015.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2015, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

*A las personas que dan sentido a mi vida:
mi esposa Mercedes y mis hijos Ana, Alberto y Javier.*

*A la memoria de mi querido padre Juan Coloma Martínez,
cuyo recuerdo imborrable perdurará siempre.*

*A mi querida madre Ana Santamaría Murcia, participe de este logro
y como pequeña recompensa a su dedicación e innumerables esfuerzos realizados.
Es mi humilde reconocimiento hacia vosotros "mis queridos viejos".*

Agradecimientos

Agradezco al Dr. José-Luis Parra y Alfaro, Director de esta Tesis Doctoral, su total disponibilidad, orientación y apoyo mostrados a lo largo del tiempo empleado en el desarrollo de la misma, destacando su firme convicción, amistad y confianza en todo momento.

A los Doctores Jorge Luis Costafreda Mustelier y David Sanz Martínez por sus orientaciones, sugerencias, correcciones, consejos y adaptaciones metodológicas realizadas, y por sus apuestas decisivas hacia esta línea de investigación.

A los Doctores Benjamín Calvo Pérez y Javier de la Villa Albares, por sus constantes consejos y criterios técnicos en el contexto de las materias tratadas en este trabajo, aportando sus dilatadas y contrastadas experiencias.

A D. José Antonio Peña Rodríguez, por sus sabias enseñanzas y apuesta personal para que lograra realizar esta Tesis Doctoral. Mi mayor aprecio y consideración hacia él.

A los Doctores Miguel Ángel López Guerrero y César Sánchez Meléndez por sus apoyos institucionales durante sus respectivas etapas de gestión como directores de la Escuela Politécnica de Cuenca (Universidad de Castilla-La Mancha), poniendo a disposición equipos e instalaciones para la realización de las etapas experimentales, brindando las mayores facilidades para el desarrollo de este trabajo de investigación. Es de destacar su total grado de confianza, colaboración y amistad mostrados.

Al Dr. Francisco Santamaría Murcia, quien siempre ha apoyado y estimulado cualquier iniciativa que incrementara mi formación, tanto humana como académica. Al él debo en gran medida la capacidad del esfuerzo empleado para poder hoy presentar este trabajo de investigación, el cual culmina una parte de mi trayectoria personal. La destacada profesionalidad del Dr. Santamaría, sus acertados consejos, experiencias y arrolladora personalidad han sido referencias que he tomado y tomaré siempre en

cuenta. A D^a Palestina Ayala Santos por el cariño y apoyo recibido a lo largo de todo este tiempo.

A las siguientes instituciones, empresas y personas que han colaborado en la realización de diversos ensayos y en el suministro de las materias primas necesarias para desarrollar este trabajo de investigación:

- ▶ D. Francisco Sanz Pérez, del Laboratorio de Combustibles y Petroquímica, adscrito a la Fundación Gómez-Pardo (Universidad Politécnica de Madrid).
- ▶ D. Santiago Míguez Marín, del Laboratorio Centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (Universidad Politécnica de Madrid).
- ▶ Dr. Domingo Alfonso Martín Sánchez y D. Daniel del Barrio Saiz y D. Esteban Estévez Fernández, del Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO), (Universidad Politécnica de Madrid).
- ▶ Dr. Samuel Quintana Gómez, del Laboratorio de Medidas Acústicas y Radioeléctricas (LAMARE), (Escuela Politécnica de Cuenca - Universidad de Castilla-La Mancha).
- ▶ D. Pedro Palomino Quicios, del Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE), (Escuela Politécnica de Cuenca - Universidad de Castilla-La Mancha).
- ▶ D. Carlos Rivera Cabanillas, del Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada (IRICA), (Universidad de Castilla-La Mancha).
- ▶ D. Juan Carlos Rodríguez Humanes, D. Germán García Pérez y D. José Sever Redondo, del Grupo Cementos Portland Valderrivas (GCPV), (Fábrica El Alto-Madrid).
- ▶ D. Diego Piñero Gómez, D. Luis Piñero Gómez y D. José Javier Martínez Miranda, de la empresa Almendras de la Mancha, S.A. (Hellín - Albacete).
- ▶ D. Juan López López y D^a Carmen Mancilla Guerrero, del horno industrial “La Carmela” (Elche de la Sierra - Albacete).

- D. Emilio Galán Escribá y D. Teófilo Gómez Herreros, de la Cooperativa comarcal Almendras Sierra de Segura (Elche de la Sierra - Albacete).

A la Dra. Mónica Martiz Lizama, quien desde siempre me ha animado a la búsqueda del conocimiento y en el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Me honra que en tiempos ya pasados, fuera la directora de mi tesis para optar al título de Ingeniero de Minas, y me siento muy complacido por la gran amistad y aprecio que mantenemos.

A mis compañeros los Doctores Marcos Fernández Berlanga y Alejandro Lucas Borja por sus sugerencias, recomendaciones y revisiones, las cuales han resultado muy útiles.

A mi muy apreciado compañero y gran amigo D. Eduardo Espín Grancha, quien desde siempre ha manifestado su apuesta para que mi destino fuese el docente e investigador, aportándome sus experiencias docentes y sabios consejos.

A D^a Guadalupe Muñoz Adánez, por su constante orientación, comprensión y afecto mostrados a lo largo de todos estos años.

A mis estimados ex-alumnos, D^a Inmaculada Oñate Pinar, D. Arturo Bustos García y D. José Antonio Blasco Nuévalos, por sus constantes y desinteresadas colaboraciones en las etapas experimentales y por su continuada disponibilidad, trabajo y paciencia en atender mis propuestas.

A mis queridos amigos D^a Lucía Leal Orozco y D. Francisco Díaz López, por sus muestras de amistad.

A Jackie, quien me acompaña a lo largo de todos estos años compartiendo el día a día, y a quien agradezco su lealtad y afecto.

A los Doctores Víctor González Pumariaga, Abelardo Rovira Pereira, Mario González Alzugaray, Victoriano Alvargonzález Juliana y Agustín Diéguez González, quienes siendo mis profesores en una etapa de mi formación, me enseñaron ante todo a ser persona, y a ilusionarme con mi profesión de Ingeniero de Minas. Ante su ausencia, me quedo con su recuerdo y gran amistad. Sirva de homenaje a su memoria este trabajo.

A los que, aunque físicamente no están ya presentes y que echo en falta, han contribuido aportándome la fortaleza y confianza necesarias para la realización de esta Tesis Doctoral y que, sobretodo, lo siguen haciendo para que continúe hacia adelante.

A mi querida hermana Anabel, quien siempre ha confiado en mí en cualquier actividad emprendida, y como reconocimiento expreso a su apoyo incondicional.

A todos aquellos que no quisiera dejar en el olvido, y que de alguna u otra forma han contribuido a hacer realidad esta etapa de mi vida, expresando sugerencias y mensajes de aliento.

Finalmente, de manera muy especial, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi querida esposa Mercedes, por su constante apoyo, cariño, comprensión, confianza, paciencia y esfuerzo durante nuestra vida, y en esta oportunidad durante el tiempo empleado en este trabajo. A mis queridos hijos Ana, Alberto y Javier, por haberme animado a llevarlo a cabo, y por hacerme sentir tan orgulloso. Sin ellos no hubiera sido capaz de conseguirlo. Me han hecho sentir muy dichoso al estar cerca en todo momento, y no tengo palabras suficientes para expresarles el reconocimiento que merecen a tanto cariño recibido.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO	20
ESTADO DEL ARTE	25
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	68
1.1 RESIDUOS ORGÁNICOS (ROCA)	69
1.2 MORTEROS	89
1.2.1 Definición	89
1.2.2 Componentes: características y normativa	92
1.2.3 Clasificación de los morteros	106
1.2.4 Propiedades, características y requisitos de los morteros de albañilería. Estado fresco	108
1.2.5 Propiedades, características y requisitos de los morteros de albañilería. Estado endurecido	110
1.2.6 Designación de los morteros de albañilería	112
1.2.7 Selección de los morteros de albañilería según su aplicación	112
1.3 HORMIGONES	115
1.3.1 Definición	115
1.3.2 Componentes: características y normativa	117
1.3.3 Propiedades del hormigón fresco	135
1.3.4 Dosificación de hormigones	138
1.3.5 Tipos de hormigones	140

1.4	BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC)	142
1.4.1	Definición	142
1.4.2	Tipologías constructivas a base de tierra	146
1.4.3	Componentes de los BTC	147
1.4.4	Descripción, designación y clasificación de los BTC	148
1.4.5	Usos del BTC	150
CAPÍTULO 2. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA Y ROCCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS		151
2.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES BÁSICOS UTILIZADOS	153
2.1.1	Cemento	153
2.1.2	Áridos para morteros	156
2.1.3	Agua para morteros	160
2.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL	163
2.2.1	Caracterización físico-química de los ROCA y ROCCA	163
2.2.1.1	Caracterización física	173
2.2.1.2	Caracterización química	183
2.2.2	Metodología de fabricación de las probetas de mortero	201
2.2.2.1	Dosificación	202
2.2.2.2	Fabricación de probetas prismáticas	206
2.2.2.3	Fabricación de probetas cilíndricas	210
2.2.2.4	Fabricación de probetas cuadradas	215
2.2.3	Ensayos de mortero en estado fresco	218
2.2.3.1	Consistencia normal del cemento	218
2.2.4	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos físicos	222
2.2.4.1	Densidad aparente en seco	222
2.2.4.2	Absorción	224
2.2.4.3	Porosimetría por intrusión de mercurio	229
2.2.5	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos mecánicos	233
2.2.5.1	Resistencia mecánica a flexión	233
2.2.5.2	Resistencia mecánica a compresión	237

2.2.6	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos acústicos	239
2.2.6.1	Coeficiente de absorción acústica	239
2.2.6.2	Velocidad de los impulsos ultrasónicos	247
2.2.7	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos de durabilidad	251
2.2.7.1	Resistencia a la cristalización de las sales	251
2.2.7.2	Resistencia a la heladicidad	257
2.2.8	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos térmicos	263
2.2.8.1	Transmisión térmica en régimen estacionario	263
2.3	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	276
2.3.1	Arena CEN. Caracterización	276
2.3.2	Residuos ROCA y ROCCA	277
2.3.3	Ensayos de mortero en estado fresco	287
2.3.3.1	Consistencia normal del cemento	288
2.3.4	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos físicos	291
2.3.4.1	Densidad aparente en seco	291
2.3.4.2	Absorción	293
2.3.4.3	Porosimetría por intrusión de mercurio	296
2.3.5	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos mecánicos	298
2.3.5.1	Resistencia mecánica a flexión	298
2.3.5.2	Resistencia mecánica a compresión	305
2.3.6	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos acústicos	311
2.3.6.1	Coeficiente de absorción acústica	311
2.3.6.2	Velocidad de los impulsos ultrasónicos	313
2.3.7	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos de durabilidad	315
2.3.7.1	Resistencia a la cristalización de las sales	315
2.3.7.2	Resistencia a la heladicidad	322
2.3.8	Ensayos de mortero en estado endurecido. Ensayos térmicos	325
2.3.8.1	Transmisión térmica en régimen estacionario	325
2.3.9	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	329
2.3.10	Microscopía Óptica de Polarización (MOP)	339

CAPÍTULO 3. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES	351
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES BÁSICOS UTILIZADOS	353
3.1.1 Cemento	353
3.1.2 Agua para hormigones	353
3.1.3 Áridos para hormigones	354
3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	356
3.2.1 Caracterización físico-química de los ROCA	356
3.2.1.1 Caracterización física	359
3.2.1.2 Caracterización química	389
3.2.2 Caracterización del árido natural	390
3.2.2.1 Propiedades geométricas de la arena	391
3.2.2.2 Propiedades físicas y mecánicas de la arena	403
3.2.2.3 Propiedades geométricas de la grava	420
3.2.3 Fabricación de las probetas de hormigón. Metodología	449
3.2.3.1 Dosificación	449
3.2.3.2 Preparación de los áridos	450
3.2.3.3 Proceso de elaboración de la mezcla	451
3.2.3.4 Preparación y llenado de los moldes	452
3.2.3.5 Compactación del hormigón	453
3.2.3.6 Curado de las probetas de ensayo	455
3.2.3.7 Nomenclatura empleada para las probetas de ensayo	457
3.2.4 Hormigón. Ensayos	459
3.2.4.1 Ensayos sobre hormigón fresco	459
3.2.4.2 Ensayos sobre hormigón endurecido	463
3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	498
3.3.1 Ensayos sobre áridos	498
3.3.2 Ensayos sobre hormigón fresco	514
3.3.3 Ensayos sobre hormigón endurecido	516

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	549
BIBLIOGRAFÍA	561
ANEXOS	571
ÍNDICE DE ANEXOS	572
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	702
ÍNDICE DE TABLAS	703
ÍNDICE DE FIGURAS	707

RESUMEN

La conservación del entorno natural obliga a la búsqueda de mecanismos que minimicen el impacto que sobre el medio ambiente tiene la producción cada vez mayor de residuos de todo tipo y que en ocasiones pueden conllevar riesgos sobre la salud de las personas. Esta demanda de preservar el entorno obliga a empresas y países a establecer mecanismos eficientes de gestión de dichos residuos. La necesidad de grandes cantidades de áridos en la industria de la construcción, recursos no renovables y sometidos a su agotamiento, justifica cualquier investigación que intente evaluar su posibilidad de reemplazo parcial por recursos de fuentes renovables, en este caso como la biomasa vegetal, en la fabricación de morteros y hormigones no convencionales.

Se inicia la investigación con una revisión de aquellos residuos derivados del sector agroindustrial más significativos que son o han sido utilizados como agregados en la fabricación de cementos, morteros y hormigones.

Este trabajo de investigación ha puesto especial énfasis en el uso de residuos orgánicos como las cáscaras de almendra para la fabricación de dichos materiales de construcción como objetivo fundamental. En la amplia consulta bibliográfica y científica llevada a cabo no se han encontrado antecedentes ni estudios previos que relacionen a la cáscara de almendra, tanto en su estado natural como calcinada, como componente en las dosificaciones para la fabricación de morteros y hormigones ni tampoco en el proceso de clinkerización en plantas de producción de cemento. Esta circunstancia hace que se considere ésta línea de investigación iniciada, pionera en el estudio del aprovechamiento de las cáscaras de almendra en este tipo de actividades industriales.

En el desarrollo de esta investigación se han incorporado los residuos de cáscara de almendra de dos formas: a) en su estado natural como sustituto parcial de los áridos tanto en la fabricación de morteros como en hormigones, y b) calcinados, como adición para sustituir parte del cemento en la fabricación de morteros. Los porcentajes

de sustitución en peso son 10%, 20% y 30% en ambos casos. A los residuos orgánicos de cáscara de almendra en estado natural se les ha denominado ROCA y a esos mismos residuos una vez calcinados (ceniza) se les ha denominado ROCCA.

Se ha realizado una descripción detallada de cada uno de los materiales que intervienen en la fabricación de morteros y hormigones. Ello ha permitido establecer una amplia campaña experimental desarrollada de acuerdo a la normativa UNE-EN actualmente vigente en España. Dicha campaña ha incluido una caracterización completa de los materiales anteriormente descritos, sus diferentes dosificaciones, tipología de las probetas fabricadas y los respectivos procedimientos de ensayo empleados.

Una vez realizados todos los ensayos y con la obtención de los resultados se ha procedido a sus respectivos análisis y valoraciones. Morteros y hormigones fabricados con proporciones de cáscara de almendra harán que estos sean más ligeros, disminuyendo con ello las cargas estructurales, con el consiguiente ahorro económico en el proceso constructivo. La novedosa aplicación de la cáscara de almendra en plantas cementeras, edificación e ingeniería civil, aportarán a este tipo de residuos un mayor valor añadido al que ahora tienen, dejando en parte de ser empleados como simple biomasa en procesos de combustión.

Las conclusiones de esta investigación apuntan a la viabilidad de la utilización de residuos de cáscara de almendra en la industria de la fabricación de morteros y hormigones como una alternativa prometedora.

ABSTRACT

The conservation of the natural surroundings requires finding ways to minimize the impact that the increasing production of waste of all type has on the environment and that, in occasions, can imply health risks for the people. This demand to preserve the natural surroundings requires that companies and countries establish efficient mechanisms for the management of such waste. The need for large amounts of aggregates in the construction industry, which are non-renewable resources subject to depletion, justifies any research to evaluate the possibility of a partial replacement by renewable resources, such as biomass, in the manufacture of mortars and unconventional concretes.

This research begins with a revision of the state-of-the-art about the technological trends and implications of the most significant residues derived from the agro-industrial sector that are or have been used as aggregates in the manufacture of cements, mortars and concretes.

This work is specially emphasized in the use of organic waste, such as almond shells, for the manufacture of those construction materials as a fundamental objective. The use of almond shell, both in its natural state or calcined, is not documented in the literature, nor as a component in the dosages for the manufacture of mortars and concretes, neither in the clinkerization process in cement production plants. Therefore, this line of research can be considered as pioneer in the exploitation of almond shells in this type of industrial activities.

In the development of this research, almond shell waste have been incorporated in two ways: a) in its natural state as a partial replacement of the aggregates in both, manufacturing mortars and concretes, and b) calcined, as an addition to replace part of the cement in mortars manufacturing. The percentages of substitution are 10%, 20% and 30% by weight in both cases. Almond shell waste in its natural state are called ROCA and once burnt the resulting ashes are called ROCCA.

A detailed description of each one of the materials involved in the manufacture of mortars and concretes has been carried out. This has made possible to establish a broad experimental campaign developed according to the UNE-EN standards currently in force in Spain. This campaign has included a complete characterization of the materials described above, their different dosages, typology of the test specimens manufactured and the respective test procedures employed.

Analysis and assessments are then performed after obtaining all the results of the testing phase. Mortars and concretes made with almond shell mixtures will be lighter, thereby decreasing structural loads and the consequent savings in the construction process. The new application of almond shell in concrete plants, building and civil engineering, will contribute to increase the added value of this type of wastes in relation to its current value as a simple biomass material in combustion processes.

The conclusions of this research point to the feasibility of using almond shell waste in the industry of mortars and concretes manufacturing as a promising alternative.

INTRODUCCIÓN

Es un hecho la tendencia en el crecimiento mundial de la población, que si la misma se mantiene, las expectativas son de un incremento del 30% para el año 2050, es decir una cifra de población próxima a los 9.000 millones. En la actualidad existen grandes demandas de recursos, obviamente éstas se incrementarán dadas las economías de países emergentes en ese periodo de tiempo. Ello hace necesario poder dar respuesta a esas demandas para lograr un desarrollo sostenible dentro de una economía global, aportando calidad de vida a los ciudadanos, lo cual equivale a una modificación de los actuales modelos de aprovechamiento. Estos recursos a los que se hace referencia incluyen materias primas tales como combustibles, minerales y metales pero también alimentos, suelo, agua, aire, biomasa y los ecosistemas.

La Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de Las Regiones¹, deja claramente manifiesta la denominada Estrategia 2020 en la UE, dirigida a potenciar la búsqueda de eficiencia en el uso de los recursos existentes, destacando en la misma, aspectos de tipo medioambiental. Y es dentro de esta búsqueda en la que se desarrolla el presente trabajo de investigación.

Dadas las expectativas de demanda de recursos se hace necesario desarrollar nuevos productos y servicios, encontrando nuevas vías de minimización de generación de residuos con un incremento de gestión de los recursos con cambios significativos en los actuales modelos de consumo, optando por la optimización de los procesos de producción, métodos de dirección y de negocio y un incremento de la logística.

La UE destaca progresos realizados en la eficiencia de uso de los recursos indicando que el proceso de reciclaje ha llegado a ser una práctica normal en Europa tanto en los negocios como en los hogares. Ello ha supuesto que desde 1990 las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE se hayan reducido hasta en un 10% mientras las

¹ Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions: *A resource-efficient Europe-Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy*. Brussels, 26.1.2011.

economías han crecido alrededor de un 40%. Ello hace indicar que se reduce la dependencia en los combustibles fósiles como consecuencia del incremento de la eficiencia energética y el desarrollo de nuevas alternativas. El aumento de la eficiencia en el empleo de los recursos es clave para asegurar el crecimiento y el empleo en Europa, ya que proveerá importantes oportunidades económicas, entre ellas: una mejora de la productividad; una reducción de costes y un aumento de la competitividad².

En cuanto al uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción, la Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de Las Regiones³, entre otras consideraciones expresa que: “La construcción y el uso de edificios en la UE representan alrededor de la mitad de los materiales que extraemos y de la energía que utilizamos y aproximadamente un tercio del agua que consumimos. El sector genera asimismo en torno a un tercio de todos los residuos y contribuye a las presiones ambientales que se producen en las diferentes fases del ciclo de vida de los edificios, incluida la fabricación de productos de construcción, la construcción de edificios, la utilización, la renovación y la gestión de residuos de la construcción”.

La iniciativa de la Comisión es la de fomentar una utilización más eficiente de los recursos que consumen los edificios comerciales, residenciales y públicos, nuevos y renovados, y reducir su impacto ambiental global durante todo el ciclo de vida. El uso de los recursos viene determinado en gran medida por las decisiones sobre el diseño y la elección de los materiales de construcción.

Considera que el consumo de recursos y su impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de un edificio puede reducirse, entre otras acciones, mediante el fomento de una construcción y una renovación más eficientes en el uso de los recursos, por ejemplo

² “Una Europa que utilice eficazmente los recursos. Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020”. <http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/>

³ Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions: On resource efficiency opportunities in the building sector. Brussels, 1.7.2014.

reduciendo los residuos de la construcción y reciclando o reutilizando materiales y productos de manera que el volumen destinado a los vertederos sea menor.

España es pionera en este sentido, traducándose incluso en normativa y reglamentación que incluye aspectos que contemplan esta demanda estableciendo requisitos adicionales para las edificaciones y los materiales.

A pesar de la actual ralentización de crecimiento del sector de la construcción en los países de la UE, este no deja de ser importante desde un punto de vista económico y social. En la Conferencia de invierno de EUROCONSTRUCT⁴ se manifestó que el mercado de la construcción en Europa en 2014 había entrado en una fase de crecimiento. Después de siete años de crisis profunda, durante el cual el mercado ha perdido un 21% en volumen y después de un año muy negativo (-2,7%), EUROCONSTRUCT confirmó que en el conjunto del ámbito europeo, se apunta un cambio de tendencia en el sector. El 2014 cerró en positivo y para el periodo comprendido entre 2015 y 2017 se espera un crecimiento de en torno al 2%. En todo caso, el informe señala que el ritmo de crecimiento será desigual entre los países.

La producción residencial en España cayó un 6,5% en el conjunto de 2014, según el último informe de EUROCONSTRUCT⁵, que sin embargo indica que la construcción de viviendas crecerá un 5% en 2015. Se apunta, pues, un cambio de tendencia en el sector de la construcción. El informe concreta que la rehabilitación de edificios no residenciales y el segmento de la vivienda serán los responsables de la recuperación del sector.

El sector de la rehabilitación creció ligeramente en 2014 y lo hará en un 1,4% en 2015. EUROCONSTRUCT apunta que 2014 será el último año en negativo (ha finalizado con una caída del 2,4%). Las previsiones de crecimiento apuntan un avance del 1,8% en

⁴ 78th EUROCONSTRUCT Conference 2015: *Towards a new cycle for the European construction industry?. The risk of German slackening in growth*. Milan, Italy. 19th November, 2014.

⁵ Institución independiente de consultoría y análisis formado por 19 institutos europeos que anualmente celebra dos conferencias, una en verano y otra en invierno, con la finalidad de presentar sus informes sobre la situación actual y futura de los mercados de la construcción, incluyendo la edificación residencial y no residencial y la ingeniería civil, tanto en lo referente a la obra de nueva planta como a la de rehabilitación.

2015, un 3,6% para 2016 y un 5% en 2017. Son en cualquier caso magnitudes que están por debajo de las medias europeas.

El informe, publicado en España por el Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC)⁶ detalla que en 2014 la producción residencial ha bajado un 6,5%, pero se ha interrumpido el descenso en los trámites de vivienda nueva. Así, se espera un crecimiento del 5% en 2015, pero en un contexto nada homogéneo: habrá zonas con crecimiento y demanda, y otras aún en crisis.

Un sector que animará el mercado será el de la rehabilitación. Creció ligeramente en 2014 y volverá a hacerlo en 2015 un 1,4%, según EUROCONSTRUCT. El informe espera un comportamiento más dinámico en la rehabilitación de edificios no residenciales sobre la rehabilitación de viviendas, porque las familias españolas siguen conteniendo el gasto y no abundan las ayudas públicas.

De acuerdo a las nuevas estimaciones los tres principales segmentos en el mercado de la construcción: edificación residencial y no residencial, rehabilitación e ingeniería civil, crecerán en un corto periodo de tiempo pero con algunas peculiaridades. El sector residencial está todavía afectado, especialmente lo referente a obra nueva, la cual después de una importante reducción en el año 2013 (-4%) está estancada en 2014 (0,1%), pero las expectativas a un corto periodo de tiempo son muy positivas apostando por ser un motor muy importante para el sector europeo cercano a 4 puntos porcentuales en el trienio 2015-2017. La tendencia es similar para las nuevas inversiones en edificaciones no residenciales, las cuales tuvieron en 2013 un decrecimiento bastante elevado, pero en este caso su previsión de crecimiento será más moderada que la residencial (algo menor del 2% en el periodo 2015-2017).

Para el sector de la ingeniería civil la recuperación en 2014 es mayor si es comparada con los segmentos de la edificación (+1,4%) a pesar de haber sido el segmento del mercado con la revisión a la baja más acusada con respecto a la realizada en los seis

⁶ El ITeC es una fundación privada que trabaja en el ámbito del sector de la construcción.

meses iniciales de 2014. Se estima que el sector continuará con un ritmo de crecimiento anual hasta cifras del 2,5% en los próximos tres años. Y finalmente, las actividades de mejora en inmuebles tienen un importante efecto de amortiguación para el sector de la construcción, de hecho ha sido capaz de absorber parte de la caída del pasado periodo y permitirá estabilizar la tendencia en el futuro próximo.

La utilización más eficiente de los recursos dada la menor disponibilidad de éstos, tanto naturales como artificiales que son necesarios, en conjunción con un desarrollo sostenible ha provocado que en los últimos años en la fabricación de cemento portland se haya incrementado en cantidad y tipos la incorporación de diversas adiciones naturales y/o artificiales (Sata, V., *et al.* 2007), tratando de lograr dos objetivos fundamentales: el primero en el contexto de la industria del cemento, consistente en reducir los costes de producción mediante la sustitución parcial del cemento portland por dichas adiciones, obteniendo así un ahorro energético (De Eribe Iturrieta, A. O., 2004), (OFICEMEN 2004). El segundo de carácter medioambiental y efecto doble, por el que se logran fabricar las cantidades de cemento necesarias con una disminución de la fabricación de clinker portland. Esto favorece aportar valor añadido al material de diferentes residuos minerales de otros sectores industriales, los cuales pasan a denominarse subproductos.

Es precisamente este hecho el que justifica el emprendimiento de diversas líneas de investigación orientadas a la búsqueda, detección y consecución de nuevas adiciones naturales y/o artificiales que pudieran ser incorporadas al cemento portland. Aquellas nuevas que puedan ser encontradas podrán ser englobadas tanto en el grupo de las “activas” como en el de las “no activas” o también llamadas “inertes”. Adiciones puzolánicas y siderúrgicas como “activas” y los filleres como “no activas” (Malholtra, V. M., *et al.* 1996), (Talero, R., *et al.* 2009).

En el marco de la Estrategia 2020 de la UE, la tecnología del hormigón, incluyendo la fabricación y producción de sus materiales constituyentes, también se está orientando hacia el desarrollo de nuevos hormigones que mejoren el entorno desde un punto de

vista sostenible. Uno de los hormigones especiales que pueden contribuir a esta mejora es el hormigón ligero (Malholtra, V. M., *et al.* 1996). Los hormigones ligeros son aquellos que se caracterizan porque su densidad es inferior a la de los hormigones convencionales. El valor de densidad a partir de la cual se consideran “ligeros” depende de las reglamentaciones de cada país, pero prácticamente todas incluyendo la EHE-08 consideran como hormigón ligero aquel cuya densidad está por debajo de los 2000 kg/m³. Estos hormigones ofrecen más posibilidades que el hormigón convencional para la construcción en edificación, ya que no sólo es considerablemente más liviano, sino que puede alcanzar, dependiendo del material ligero empleado y de la dosificación, resistencias comparables. Pero su característica más notable desde el punto de vista de la sostenibilidad es su mejor capacidad de aislamiento térmico. Adecuadamente combinados con hormigones de densidad normal, permiten optimizar las ventajas de aislamiento e inercia térmicas (Luco, L.F. y Castillo, A. 2012).

Para obtener densidades bajas se recurre al empleo de áridos ligeros, tanto naturales como artificiales, o al empleo de aire ocluido en grandes cantidades como en el caso de los hormigones celulares. La técnica más común consiste en la sustitución de los áridos más gruesos, ya que el uso de fracciones finas ligeras suele inducir reducciones excesivas en las prestaciones mecánicas.

Preservar la naturaleza es una actitud cada vez más demandada por la sociedad lo que hace que el grado de concienciación sobre ello se haya incrementado notablemente. Ello obliga a la búsqueda de mecanismos que minimicen el impacto que sobre el medio ambiente tiene la producción cada vez mayor de residuos de todo tipo y que en ocasiones pueden conllevar riesgos de salud a personas. Esta demanda de preservación del entorno obliga a empresas y países a establecer mecanismos eficientes de gestión de dichos residuos. Se suman a los países más industrializados diferentes economías emergentes representadas actualmente por la India, China, Brasil y México, lo que les ha obligado a desarrollar legislación específica sobre la gestión de dichos residuos estableciendo diversa reglamentación acerca de su generación, acumulación y eliminación para evitar daños medioambientales.

Fig. INT.1 Diferentes formas de gestión de los residuos en varios países de la UE en 2013. Fuente: Eurostat 2015

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos⁷ y por la que se derogan determinadas directivas establece una serie de *medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso*. Para ello define al residuo como: *cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse*.

Define igualmente la gestión de los residuos como *la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente*. Entiende como valorización a cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad

⁷ DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 *sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Diario Oficial de la Unión Europea, 22.11.2008 ES; L 312/3 - L 312/30.

útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general. En el anexo II se recoge una lista no exhaustiva de operaciones de valorización y establece que el reciclado comprende toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

En su Artículo 4 “Jerarquía de residuos” establece en su apartado 1. *La siguiente jerarquía de residuos servirá de orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos: a) prevención; b) preparación para la reutilización; c) reciclado; d) otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; y e) eliminación.* Continúa en su apartado 2. *Cuando se aplique la jerarquía de residuos contemplada en apartado 1, los Estados miembros adoptarán medidas para estimular las opciones que proporcionen el mejor resultado medioambiental global. Ello puede requerir que determinados flujos de residuos se aparten de la jerarquía, cuando esté justificado por un enfoque de ciclo de vida sobre los impactos globales de la generación y gestión de dichos residuos.* En ese sentido España a través de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente representada por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) establece el denominado Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020⁸. En dicho Programa se establece que: *La política de residuos en los países comunitarios ha de aplicar este principio de jerarquía que se establece en el artículo 4 de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos (Directiva Marco de Residuos),*

⁸ Secretaría de Estado de Medio Ambiente; Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: *Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020*. BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 20 Sec. III. Págs. 4270-4272, Jueves 23 de enero de 2014: *Resolución de 20 de diciembre de 2013, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020.*

y que se incorpora al ordenamiento jurídico español a través del artículo 8 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Fig. INT.2 Porcentaje de residuos destinados a vertedero en 2013. Fuente: Eurostat 2015

Este principio de jerarquía de residuos prevé como primera opción de la política de los mismos la prevención seguida de la preparación para la reutilización, el reciclado, la valorización energética y, en último lugar, la eliminación de estos.

En la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha se aprueba el Plan de Gestión de Residuos Industriales 2014-2020 (Decreto 112/2014, de 13/11/2014)⁹.

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas, establece en su capítulo V la obligación de elaborar, por parte de sus autoridades competentes, planes y programas que presenten un análisis actualizado de la situación de la gestión de residuos en la entidad geográfica correspondiente, así como una exposición de las medidas que deban tomarse para mejorar la preparación para la reutilización, el reciclado, la valorización y la eliminación de los residuos de forma respetuosa con el

⁹ DIARIO OFICIAL DE CASTILLA-LA MANCHA (DOCM Núm. 224, 19 de noviembre de 2014, 35450 – 35512, Decreto 112/2014, de 13/11/2014), Plan de Gestión de Residuos Industriales de Castilla-La Mancha 2014-2020. [2014/14907].

medio ambiente y evaluarán en qué medida el plan contribuye a la consecución de los objetivos establecidos por la presente Directiva.

En tal sentido, la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados¹⁰, en su artículo 12.4, establece que corresponde a las Comunidades Autónomas la competencia para elaborar los planes autonómicos de prevención y gestión de residuos determinando: *Los planes, conforme dispone este artículo 12.4, contendrán una exposición de las medidas para facilitar la reutilización, el reciclado, la valorización y la eliminación de los residuos, estableciendo objetivos de prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación y la estimación de su contribución de los objetivos establecidos en la normativa vigente.*

El Plan se basa en los principios de evitar, en lo posible, la generación de los residuos, el de jerarquía en la gestión de los residuos, mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en atención al cambio climático, el de I+D y el de “quien contamina paga”. Este último introducido en atención al régimen jurídico que se contiene en la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Ambiental¹¹.

Por su parte el Consejo Económico y Social de España (CES), previsto en la Constitución de 1978 (art. 131.2), y que vio la luz en 1991, es quien congrega a las organizaciones empresariales y otras que representan los intereses de la ciudadanía y se configura como un alto órgano consultivo del Gobierno. En su resumen ejecutivo: *Competencias y coordinación en la gestión de residuos por las distintas Administraciones Públicas*¹² indica en referencia a las principales exigencias que recoge el Derecho de la UE el planteamiento tradicional de la normativa sobre esta materia que se basa en “la jerarquía de los residuos”. La jerarquía de los residuos consiste en un orden ideal de las operaciones que deben llevarse a cabo durante la gestión de los mismos. El orden

¹⁰ BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 181 Sec. I. Págs. 85650-85705, viernes 29 de julio de 2011: *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.*

¹¹ BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 255 Págs. 43229-43250, miércoles 24 de octubre de 2007: *Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.*

¹² CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ESPAÑA (CES); Resumen ejecutivo: *Competencias y coordinación en la gestión de residuos por las distintas Administraciones Públicas.*

establecido es el siguiente: los residuos deben evitarse, si no se pueden evitar deben reutilizarse, reciclarse o recuperarse en la medida de lo posible.

Esto debe entenderse en la actualidad matizado por los planteamientos relativos al concepto del ciclo de vida del recurso. La política medioambiental tradicional se ha centrado en las fases inicial y final del ciclo de vida del recurso: extracción, transformación y fabricación por un lado, y gestión de residuos por otra. Sin embargo, en la actualidad se reconoce que el impacto medioambiental de muchos recursos va ligado a la fase de utilización de los mismos.

En consecuencia, todas las fases del ciclo de vida de un recurso deben ser tomadas en cuenta por la regulación de los residuos, ya que pueden producirse efectos cruzados entre las diferentes fases, y las medidas adoptadas para reducir el impacto sobre el medio ambiente en una fase podrían empeorar el de otra. La conclusión que se obtiene a partir de este planteamiento es que la política medioambiental debe minimizar las repercusiones negativas para el entorno a lo largo de todo el ciclo de vida de los recursos, no sólo en las fases inicial y final. El concepto de ciclo de vida se incorpora en la legislación de la UE a través de la Directiva Marco sobre Residuos, al hacer referencia a sus objetivos, que asumen este planteamiento. La nueva regulación tendrá consecuencias notables en la configuración de la nueva política y en los principios y prácticas de la futura gestión de los residuos.

La Directiva de Residuos plantea la revisión del concepto de residuo y su delimitación frente a los subproductos y el fin de vida de los residuos. Se trata de un elemento clave desde el punto de vista técnico de la nueva regulación, dado que incide directamente en la definición de su ámbito de aplicación. La diferencia fundamental entre residuos y subproductos radica en que estos últimos no requieren ninguna transformación adicional distinta del proceso industrial que los crea, para poder ser utilizados; el subproducto no es directamente el objeto de dicho proceso industrial, si bien se produce durante el mismo de forma indirecta.

Los objetos que se califican como “fin de vida del residuo” han sido inicialmente residuos, y dejan de serlo tras experimentar un proceso de valorización. Esta delimitación es fundamental para determinar el ámbito de aplicación de la directiva.

La jerarquía de residuos define el orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y gestión de residuos. La clasificación que establece es la siguiente: a) prevención; b) preparación para la reutilización; c) reciclado; d) otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; y e) eliminación. No obstante, cuando se aplique la jerarquía de residuos, los estados miembros deberán adoptar medidas para estimular las opciones que proporcionen el mejor resultado medioambiental global.

La cantidad significativa de residuos que produce la industria podría ser objeto de reutilización. Dados sus niveles de producción y su capacidad de consumo de materiales, el sector de la construcción representa una alternativa válida para el destino de los residuos que mayoritariamente no tendrían otra mejor disposición final que hiciera sostenible, medioambientalmente hablando, esta acción.

La tipología de los residuos provenientes de actividades de tipo agroindustrial es variada, entre los que se encuentran aquellos derivados de las industrias de procesamiento de beneficio de granos (cáscara de arroz, de maíz, cáscaras de frutos secos: avellana, coco, maní, orujo, almendra, etc.). Tales residuos no están siendo totalmente aprovechados. Generalmente los restos de cáscaras rotas, trituradas o tostadas se utilizan como combustible, contribuyendo de esta manera a la producción de gases de efecto invernadero, con el consiguiente impacto negativo que ello conlleva sobre el medio ambiente.

En base a ello la gestión en las empresas agroindustriales de los residuos agrícolas, entendiéndose como tales a aquellas materias procedentes del cultivo que no reúnen los estándares de calidad exigidos cuando se realiza la cosecha, debe tener como objetivo convertir estos residuos en recursos. Para ello el plan de gestión que se establezca debe contemplar las siguientes acciones: 1) realizar la reducción del residuo

en la fuente de producción; 2) establecer la aplicación de tratamientos con el fin de conseguir un nivel de calidad acorde con el destino final; y 3) planificar y controlar el destino y uso finales del producto.

La necesidad de grandes cantidades de áridos en la industria de la construcción, recursos no renovables en vías de agotamiento, justifica cualquier investigación que intente evaluar su posibilidad de reemplazo parcial a priori por recursos de fuentes renovables, como la biomasa vegetal, en la fabricación de morteros y hormigones no convencionales. A ello se unirían factores económicos de relevancia como una minimización de costes de producción de áridos en plantas de tratamiento y en frentes de canteras y con reducciones significativas de impactos medioambientales, entre otros.

El hormigón es ampliamente utilizado como material de construcción a nivel mundial gracias a sus propiedades intrínsecas como: elevadas resistencias mecánicas, versatilidad de su encofrado y costes relativamente bajos. En construcción civil es el material industrial mayoritariamente utilizado y el segundo en el mundo, después del agua. Su producción va ligada al uso de cemento portland, considerando este como principal conglomerante en la fabricación de morteros y hormigones.

El consumo de cemento en España ha crecido un 8,5% en el primer trimestre del 2015 situándose en 2.553.962 t, solo 200.000 más que en el mismo período de 2014. Por lo que respecta a los datos de marzo, el consumo ha crecido un 12,3%, situándose en 983.210 t, unas 100.000 más que el mismo mes del pasado año. Si se comparan las cifras del año móvil, en los últimos doce meses el consumo se ha incrementado en un 2,9%, lo que supone tan solo unas 300.000 t adicionales¹³.

El departamento de estudios de OFICEMEN (Agrupación de fabricantes de cemento de España) estima que el consumo per cápita se habrá situado al cierre de 2014 en los 231

¹³ OFICEMEN Agrupación de fabricantes de cementos de España; Nota de prensa 16-04-2015; https://www.oficemen.com/noticia.asp?id_rep=1905

kg por habitante, una cifra prácticamente idéntica a la del 2013 y que hace remontarse al año 1962. Dicha agrupación considera además, que esta tendencia de mínimos históricos podría invertirse, aunque levemente, en 2015, año para el que se espera un crecimiento del 5% aunque con una volatilidad alta, alternando meses con valores negativos y positivos. *“Aunque todas estas cifras son bien recibidas y podrían dejar entrever un cambio de tendencia, también son insuficientes. El crecimiento en cifras absolutas es pequeño y nos mantiene en los umbrales de consumo histórico más bajos”,* explica el director general de OFICEMEN, Aniceto Zaragoza. *“Además, estamos a las puertas de las elecciones autonómicas y municipales, lo que hace planear una sombra de incertidumbre sobre los últimos incrementos en la obra pública, ya que habitualmente este tipo de inversión carece de continuidad pasada la convocatoria electoral”*¹⁴.

A pesar de ese pequeño crecimiento en cifras absolutas, la producción de cemento portland requiere un elevado consumo de materias primas no renovables y de energía y se generan grandes cantidades de desechos y gases de efecto invernadero que contaminan el medio ambiente. Se trata de un problema global, asociado al crecimiento de la población mundial que deriva en un aumento en la producción de agentes contaminantes, contribuyendo al calentamiento global, con las consecuencias que de ello se desprenden.

En la búsqueda del equilibrio entre desarrollo tecnológico y medio ambiente, en 1987 se acuñó el término “desarrollo sostenible”¹⁵, entendiéndose como tal la forma de progreso que debe satisfacer las necesidades del presente, sin por ello llegar a comprometer las necesidades de las futuras generaciones en todos los aspectos: ambiental, humano y social. Diversas convenciones se han celebrado con el reto de promover el desarrollo sostenible, siendo el tratado más relevante el protocolo de Kioto, firmado en 1997.

¹⁴ CEPCO Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción; *Informe Coyuntura CEPCO – Diciembre 2014*; http://www.cepco.es/Uploads/docs/Informe_Coyuntura_CEPCO%20_Diciembre%20_2014.pdf

¹⁵ Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de Naciones Unidas en el **Informe Brundtland**.

En esa línea de sostenibilidad las empresas del sector del cemento trabajan para encontrar soluciones a sus procesos de producción. Queda patente esa necesidad en el ámbito de la construcción civil donde la industria del cemento es responsable de la mayor parte de las emisiones de CO₂, con consumos más elevados de energía y de materias primas no renovables.

Entre las opciones planteadas destaca la utilización de combustibles alternativos que generen menos emisiones contaminantes que los materiales empleados actualmente en el proceso de producción. Otra posibilidad estaría en mejorar la eficacia de los hornos utilizados. La gran inversión económica necesaria para ello hace inviable la puesta en marcha de esta opción de forma generalizada.

Considerando las limitaciones que las propuestas anteriormente anotadas presentan, la utilización de adiciones tanto en el proceso de fabricación del cemento como en la producción de morteros y hormigones, hace que tengan cabida actualmente como mejor alternativa para reducir el consumo de energía y la emisión de CO₂. En consecuencia se reduciría, por una parte, el consumo de materias primas en la dosificación de crudos, y por otra el consumo de clinker y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por tanto se hace necesario implementar planes de gestión agroindustrial encaminados al aprovechamiento de parte de estos volúmenes importantes de residuos orgánicos que hoy son considerados biomasa, en parte integrante de otros procesos industriales. Este proyecto de investigación estudia la viabilidad de los mismos en el sector de la construcción, concretamente en su integración como agregados y/o adiciones en la fabricación de morteros y hormigones.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

Queda claramente manifiesto que la menor disponibilidad de recursos de tipo natural o artificial que son necesarios, obligan a un uso eficiente de los mismos permitiendo un desarrollo sostenible, lo que hace necesario desarrollar nuevos productos y servicios, encontrando nuevas vías de minimización de generación de residuos con un incremento de gestión de los recursos. La posibilidad de que la incineración de los residuos esté causando contaminación al liberar CO_2 hacia la atmósfera hace que se estudien vías de uso de estos residuos procedentes de diversas actividades industriales para convertirse en subproductos.

El presente trabajo pretende satisfacer estas necesidades mediante el estudio de las posibilidades que tiene uno de los residuos agroindustriales como es la cáscara de almendra: a) como adición (ceniza) en sustitución parcial de cemento en morteros; b) como agregado en sustitución parcial del árido en la fabricación de morteros y hormigones.

Tales residuos de biomasa vegetal no están siendo totalmente aprovechados. La biomasa arbórea captura (sumidero) carbono atmosférico y genera el fruto con cáscara, ésta última como elemento envolvente y secundario. El proceso de utilizarla como combustible hace que se genere nuevamente CO_2 que es incorporado a la atmósfera con el correspondiente impacto medioambiental.

La investigación propone que sea valorado el uso de los residuos agroindustriales ROCA una vez caracterizados los componentes que intervienen en la fabricación de morteros y hormigones mediante la definición de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, para que ello permita:

- La sostenibilidad de los recursos naturales mejorando su gestión de explotación y aprovechamiento.
- La minimización del impacto medioambiental al reducir las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero (CO₂) al ser en gran parte estos incinerados en la actualidad.
- La reducción de grandes volúmenes de acopios de residuos y por tanto de espacios al aire libre.
- Aportar valor añadido a los mismos al dejar de ser considerados residuos para pasar a ser subproductos.

OBJETIVOS

En base a la propuesta de valoración de los residuos agroindustriales a base de cáscara de almendra se establecen unos objetivos, de carácter general y específicos.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de investigación es la caracterización detallada, normalización y establecimiento de la calidad de los residuos de tipo orgánico a base de cáscara de almendra (ROCA) y residuos orgánicos a base de cáscara de almendra y ceniza (ROCCA), para su puesta en valor como agregados y materias primas puzolánicas para la elaboración de morteros y hormigones.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades de los residuos orgánicos tipo ROCA y ROCCA desde el punto de vista físico, químico, geométrico y morfológico con el fin de establecer su calidad como agregados orgánicos.
- Establecer el comportamiento mecánico y la durabilidad de las mezclas de hormigones y morteros que contienen residuos orgánicos tipo ROCA y ROCCA.

- Determinar las propiedades puzolánicas de estos residuos con el fin de establecer su reactividad hidráulica con el cemento, así como con los agregados de los morteros y hormigones.
- Garantizar, en base a los resultados obtenidos, un procedimiento estándar que facilite la normalización y certificación de los ROCA y ROCCA para su explotación intensiva y sistemática, en principio a nivel de la provincia de Albacete (España), pudiendo ser posteriormente implementado dicho procedimiento al resto del territorio nacional.

Para dar cumplimiento a estos objetivos se desarrolló una campaña experimental tomando como referencia trabajos previos realizados con residuos de naturaleza agroindustrial para su posterior aplicación en la fabricación de materiales de construcción.

Se pudo comprobar que a pesar de los avances en investigación realizados en aplicaciones de distintos residuos agrícolas en la fabricación de materiales constructivos, en el caso que ocupa de la cáscara de almendra, son nulos hacia este tipo de industria, no habiéndose localizado su incorporación en la fabricación de morteros y hormigones.

Las acciones experimentales llevadas a cabo fueron:

- La caracterización por separado de los materiales componentes: ROCA, ROCCA, como de cada uno de los que intervienen en la fabricación de morteros y hormigones.
- Estudio de dosificaciones preliminares para la preparación de diversas probetas.
- Realización de los respectivos procedimientos de ensayo empleados evaluando diferentes parámetros físicos, mecánicos y químicos.

Para llevar a cabo los trabajos de caracterización y ensayos se ha contado con las siguientes instituciones e instalaciones:

Institución	Instalación	Localización	Estudios realizados
Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)	Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE).	Escuela Politécnica. Campus universitario de Cuenca (Cuenca), España	Caracterización física, mecánica y química de materiales. Estudios petrográficos de láminas delgadas mediante Microscopía Óptica de Polarización (MOP). Preparación de probetas y dosificaciones. Ensayos mecánicos, físicos y químicos. Ensayos térmicos
	Laboratorio de Medidas Acústicas y Radioeléctricas (LAMARE)		Ensayos acústicos
	Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada (IRICA)	Edificio Marie Curie Avda. Camilo José Cela, Campus universitario de Ciudad Real (Ciudad Real), España	Fluorescencia de Rayos X (FRX) de ROCA y ROCCA
Consejería de Educación, Cultura y Deportes. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha	Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca-España).	Pza. de la Merced, 1. (Cuenca), España	Estudios petrográficos de láminas delgadas mediante Microscopía Óptica de Polarización (MOP)
Fundación Gómez-Pardo (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía-UPM)	Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO)	Centro científico y tecnológico de la UPM (Tecnogetafe) C/. Eric Kandel 1. (Getafe), España	Puzolanidad de ROCA y ROCCA
	Laboratorio de Combustibles y Petroquímica (LCP)		Poder calorífico de ROCA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (UPM)	Laboratorio Centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera)	Calle de Ríos Rosas 21. (Madrid), España	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en ROCA y ROCCA Espectroscopía Infrarroja (IR) en ROCA y ROCCA Estudios petrográficos de láminas delgadas mediante Microscopía Óptica de Polarización (MOP)
Grupo Cementos portland Valderrivas (GCPV-Fábrica El Alto-Madrid)	Laboratorio de Control de Calidad	Ctra. Puente Arganda-Chinchón, Km. 8,5 Morata de Tajuña. (Madrid), España	Características técnicas del cemento utilizado: CEM I 42,5 R

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se ha estudiado el empleo de fibras vegetales para producir nuevos materiales de construcción, como refuerzo en porcentajes del 2-3% en matrices cementicias. Ello confiere a dichos materiales un menor peso específico y también valores satisfactorios de resistencia a tracción e impacto, mayor control de fisuración y mejor comportamiento dúctil a la ruptura. Por otro lado, algunos aspectos de desempeño de estas fibras tienden a ser insatisfactorios en comparación con las fibras industrializadas, tales como reducida adherencia con la base cementicia y baja durabilidad en presencia de medio alcalino y humedad (Escalera C. A., *et al.* 2013), (Gatani, M. y Argüello, R. 2007), (Salas, J., *et al.* 1986).

Por su constitución fibrosa se espera que los ROCA como agregados proporcionen a los morteros y hormigones fabricados, propiedades tales como porosidad y rigidez suficientes y consecuentemente un bajo peso y una buena capacidad de aislamiento térmico.

ESTADO DEL ARTE

Residuos orgánicos vegetales empleados en la industria de la Construcción

La transposición de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de Noviembre de 2008 sobre residuos¹⁶ al ordenamiento jurídico español se lleva a cabo a través de la Ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados¹⁷ que sustituye a la anteriormente vigente Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, que estableció en su día la primera regulación con carácter general de los residuos en nuestro ordenamiento jurídico.

La Ley 22/2011 en su Artículo 3 define: **residuo**: *como cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar*. En función de su origen, se establecen las siguientes categorías de residuos:

a) Residuos domésticos: residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias.

Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres así como los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.

b) Residuos comerciales: residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios.

¹⁶ DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 *sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Diario Oficial de la Unión Europea, 22.11.2008 ES; L 312/3 - L 312/30.

¹⁷ BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 181 Sec. I. Págs. 85650-85705, viernes 29 de julio de 2011: *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*).

c) Residuos industriales: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre¹⁸.

d) Residuos peligrosos: residuos que presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III, y aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.

En su Artículo 4 define y cataloga a los subproductos como:

Una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, puede ser considerada como subproducto y no como residuo definido en el artículo 3, apartado a), cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- a) Que se tenga la seguridad de que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente,*
- b) que la sustancia u objeto se pueda utilizar directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial habitual,*
- c) que la sustancia u objeto se produzca como parte integrante de un proceso de producción, y*
- d) que el uso ulterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos así como a la protección de la salud humana y del medio ambiente, sin que produzca impactos generales adversos para la salud humana o el medio ambiente.*

De las categorizaciones expresadas de residuos formarían parte de los denominados residuos industriales los de tipo orgánico resultante de actividades agroindustriales siendo objeto de valoración de su viabilidad como materias primas en la industria de la construcción, siendo capaz de incorporar ciertos residuos o subproductos de otros

¹⁸ BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 275 Págs. 46962-46987, viernes 16 de noviembre de 2007: Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera).

sectores industriales, colaborando de esta manera a la gestión global de los residuos, bien como:

- **Materias primas de sustitución en cementos**

Materias primas que actualmente son extraídas de explotaciones mineras para la fabricación del cemento pueden ser sustituidas por algunos residuos minerales de composición muy similar, entre los que se encuentran las cenizas volantes y de fondo generadas en la combustión de biomasa¹⁹.

Estos residuos minerales se añaden al resto de materias primas antes de entrar en el horno de cemento, en la parte del proceso que se denomina preparación del “crudo”, y aportan calcio, hierro, silicio o aluminio, minerales necesarios para fabricar el clinker (producto intermedio que sale del horno y que al molerse da lugar al cemento), reduciéndose de esta forma el volumen de las materias primas extraídas de las canteras.

El uso de residuos industriales con propiedades hidráulicas o puzolánicas como de sílice, cenizas volantes, escorias de altos hornos como componente en materiales con base cemento está enfocado a disminuir los costes de producción, mejorar las propiedades micro-estructurales del producto final y también los aspectos medioambientales al transformar materiales residuales en componentes con valor añadido.

Esta sustitución, técnicamente viable y regulada por normativa²⁰, permite fabricar cemento con menos proporción de clinker sin disminuir la calidad ni las prestaciones del producto final²¹.

¹⁹ Diario Oficial de la Unión Europea. L 140/16. 5.6.2009. DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

Artículo 2 Definiciones «biomasa»: *la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.*

²⁰ UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

²¹ OFICEMEN Agrupación de fabricantes de cementos de España; La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera.

- **Materias primas de relleno en morteros y hormigones**

Otra posibilidad es la utilización de adiciones minerales tal como la cascarilla de arroz, la cual es un buen sustituto de la grava como agregado, y contribuye a mejorar las características del hormigón, disminuyendo la permeabilidad del mismo e incrementando sus propiedades mecánicas. Además, el uso de la cascarilla de arroz como material de relleno de morteros y hormigones, contribuye a la capacidad de aislamiento térmico de dichos materiales (Vázquez Borges, E., *et al.* 2011).

En cuanto al medio ambiente, si se fomenta el uso de mezclas con desechos o subproductos agrícolas se estará contribuyendo a su preservación a través del reciclaje de este tipo de materiales. Entre estos se encuentran la cáscara de arroz, cáscara de maní, cañas y pajas, bagazo de caña de azúcar, desechos de coco y madera, líquidos derivados de la cáscara de nuez y fique, así como algunos desechos de diversos vegetales. Los mismos han sido objeto de estudio en otros países como Estados Unidos, Colombia, Canadá, China, etc., para su aprovechamiento en la construcción con la finalidad de minimizar impactos medioambientales.

La edificación tiene características y respuestas técnicas específicas que explican el porqué de la necesidad de un sinnúmero de materiales necesarios para la construcción. Si se presta atención a la arquitectura tradicional, la misma emplea comúnmente materiales naturales tomados en el entorno inmediato tal cual, trabajados de forma artesanal. Destaca el empleo de fibras vegetales y de ciertos residuos agrícolas en la construcción de viviendas en medios rurales.

La resistencia de estos productos naturales, utilizados sin tratamientos particulares, ante las exigencias climáticas es en general bastante insuficiente por lo cual su durabilidad es limitada.

A partir de 1970, como respuesta contraria a las técnicas importadas no adaptadas al contexto de los países en vías de desarrollo, aparece un movimiento de carácter

internacional a favor del empleo de las denominadas tecnologías “apropiadas”²², en el que se fomentó el empleo de materiales de construcción naturales. Ello produjo que se iniciaran numerosas investigaciones en esa dirección. Además la intención decidida era la reducción de costos de los materiales empleados para la construcción de viviendas de bajo coste.

Entre estas materias destacan las fibras naturales ya que estas representan: opciones sostenibles en cuanto a mejoras sustanciales en la eficiencia energética; se constituyen como materias primas de carácter renovable en productos polímeros; reducen las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂ en los procesos industriales y al ser materiales reciclables contribuyen a minimizar los volúmenes de desechos. Sirva como ejemplo citar que la cosecha de 1 t de fibra de yute requiere menos de 10% de la energía utilizada en la producción de polipropileno. Al ser procesadas se crean residuos que son utilizados en materiales compuestos para construcción de viviendas o para generar electricidad. Y lo más destacable es que al final de su ciclo de vida, las fibras naturales son 100% biodegradables. Además tienen una buena resistencia mecánica, poco peso y bajo costo. En Europa, la industria automotriz aprovecha estas propiedades para reforzar los paneles termoplásticos. La India ha desarrollado láminas de materiales compuestos hechas de fibra de coco, que son más resistentes a la pudrición que la teca. Brasil está haciendo material de techumbre reforzada con sisal. En Europa, los residuos del cáñamo se utilizan en el cemento, y China usó materiales de construcción a base de cáñamo para los Juegos Olímpicos del 2008 (FAO, 2009).

FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales han sido descritas en la literatura como elementos textiles y de uso en la construcción de viviendas desde los años 4000 a. C. en Europa, 3000 a. C. en Egipto y 6000 a. C. en China.

Son producidas en casi todos los países y generalmente están referidas como materiales lignocelulósicos. En países tropicales como Brasil (varios tipos de fibras

²² Rybczynsky W.; 1983

vegetales), Colombia (fique), Ecuador y Filipinas (abacá), India (bonote y yute), Pakistán y Bangladesh (yute y bonote), China (ramio), existe una gran variedad de fibras naturales con diferentes características físicas, mecánicas y químicas. Se destaca en estos países el incremento de potencialidad probada de uso de estas fibras que incluyen el sisal, yute, formio, fique, abacá, bonote y ramio. En países de clima templado, lino y cáñamo son los más representativos. El cultivo de kenaf ha sido recientemente introducido en varios países, y en la actualidad es cultivado en lugares como los Estados Unidos, Malasia, Bangladesh, Tailandia, etc. (Tabla EA.1).

Tabla EA.1 Tipos de fibras y países de origen

Fuente: FAO 2012: "Visión del potencial comercial de las fibras naturales. Análisis del mercado y política del grupo de materias agrícolas no básicas para alimentación". División de Comercio y Mercados

Sisal	Brasil, África oriental, Haití, Venezuela, Antigua, Kenia, Tanzania, India
Lino	Polonia, Bélgica, Francia, España
Cáñamo	Polonia, China, Hungría, Francia, Rumanía
Cáñamo dorado	Nigeria, Guyana, Sierra Leona, India
Ramio	Honduras, Islas de Mauritania, China
Yute	India, Egipto, Guyana, Jamaica, Ghana, Malawi, Sudán, Tanzania, Brasil
Kenaf	Irak, Tanzania, Jamaica, Sudáfrica, Cuba, Togo, EE.UU., Tailandia
Rosella	Borneo, Guyana, Malasia, Sri Lanka, Togo, Indonesia, Tanzania
Abacá	Ecuador, Filipinas, Colombia
Bonote	India, Sri Lanka, Filipinas, Malasia, Brasil
Curauá	Brasil, Colombia, Venezuela, Guyana
Fique	Colombia
Piaçava	Brasil

Las fibras naturales son generalmente de naturaleza lignocelulósica, consistiendo de microfibras de celulosa dispuestas de forma helicoidal en una matriz de lignina y hemicelulosa. De acuerdo a un estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Tanzania y Brasil producen la mayor cantidad de sisal. Henequén es cultivado en México. Abacá es cultivada principalmente en Filipinas. Los mayores productores de yute son la India, China y Bangladesh. Actualmente la producción anual de fibras naturales en India es de alrededor de 6 millones de toneladas comparada con la producción mundial de alrededor de 25 millones de toneladas.

Estos recursos naturales juegan un papel importante no sólo en el producto interior bruto de cualquier país sino también en el desarrollo económico y social de países en vías de desarrollo. La tendencia actual es utilizar tales recursos en su máxima extensión a través de nuevas tecnologías y productos. Esto genera nuevos puestos de trabajo, mayores ingresos e incrementa la calidad de vida de las gentes de estos países.

Desde tiempos antiguos diferentes materiales constructivos han venido incorporando diversas fibras naturales de origen vegetal como refuerzo. Las razones de tipo económico y medioambiental ya ampliamente referidas han hecho que diversas líneas de investigación fueran desarrolladas para valorar el nivel de refuerzo de este tipo de fibras en la fabricación de hormigones.

En aquellos países donde la existencia de este tipo de materias primas naturales ocupa grandes extensiones favorecidas por un bajo costo de mano de obra permite un asegurado suministro de las mismas por constituir recursos continuos renovables. En general la mano de obra empleada y técnicas de explotación están íntimamente vinculadas a la propia localidad donde los cultivos se desarrollan. Generalmente estas fibras vegetales no sufren proceso alguno de transformación en origen. Por el contrario aquellas que son destinadas a procesos industriales son sometidas a acciones de tipo químico y mecánico que permiten su diversa aplicación. El costo de tales

transformaciones se incrementa lo que hace limitar su uso en países en vías de desarrollo y con rentas per cápita bajas.

Las principales fibras naturales obtenidas de plantas tropicales son: yute, sisal, henequén, kenaf, ramio, esparto, cáñamo y las del coco. En cuanto a las de origen vegetal su uso común es para la industria textil. Sin embargo, el desarrollo de tejidos a base de fibras sintéticas a más bajos costos ha producido una sensible reducción de las áreas de cultivos de plantas cultivadas por sus fibras.

El reemplazo del asbesto-cemento ha hecho que se hayan desarrollado diferentes técnicas para la producción de componentes constructivos reforzados con fibras. Estos nuevos productos forman parte de una matriz hidráulica mineral. Las fibras se disponen multidireccionalmente ofreciendo buenos comportamientos ante esfuerzos de tracción y a propagación de fisuras. Es frecuente la mezcla de varias de estas fibras vegetales para aprovechar las diferentes propiedades específicas que pueden proporcionar al producto final.

Las fibras provienen fundamentalmente de hojas y tallos de plantas, y otros residuos vegetales que están siendo utilizados en construcción del hueso o cáscara de algunos frutos y herbáceas (orujillo, maní, arroz, almendra, etc.). No todas estas materias primas pueden considerarse apropiadas para su uso generalizado en hormigones como elementos que puedan aportar resistencia.

FIBRAS DE SISAL (HENEQUÉN)

Fig. EA.1 El sisal. Fuente: <http://www.sisall.com.br/o-sisal/?lang=es>

Las hojas de sisal producen una fibra muy resistente que se utiliza para producir artesanías, escobas, bolsas, carteras, sombreros, cordeles, tapetes y alfombras, así como en muebles, electrodomésticos; mantas biodegradables (protección de taludes), mezclado con polipropileno, en sustitución de la fibra de vidrio (composición de los objetos de plástico) y en la construcción²³.

A partir de las fibras sisal, se han obtenido microfibras de celulosa y nanopartículas de celulosa. La originalidad del trabajo es el estudio de metodologías “verdes” tal como es el uso de enzimas para su obtención. La investigación revela que el agregado de estas partículas a la pasta de cemento aumenta la estabilidad de la mezcla en estado fresco, disminuyendo la segregación y exudación y libera agua en forma controlada en el proceso de hidratación del cemento²⁴.

²³ El Sisal. Fuente: <http://www.sisall.com.br/o-sisal/?lang=es>

²⁴Noticia INVESTIGACIÓN Nanotecnología en la Construcción 04.05.2012. Proyecto: “Relación estructura-propiedades de materiales poliméricos en la construcción”. Directora: Dra. Analía Vázquez. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. <http://www.uba.ar/comunicacion/noticia.php?id=3122>

FIBRAS DE COCO (BONOTE)

Fig. EA.2 El coco. Fuente: <http://www.i-ambiente.es/?q=noticias/como-utilizar-la-fibra-de-coco-en-el-sector-construccion>

El coco posee fibras duras unidas entre sí por un material blando. Estas pueden ser extraídas por inmersión en agua de manera tal que se descomponga el material suave y se recuperen las fibras duras, es el método tradicional de los países pobres aun cuando existe la posibilidad alternativa de utilizar métodos mecánicos de extracción que son más caros y requieren de un basamento tecnológico. El cultivo de coco es restrictivo de regiones tropicales de África, Asia y América Central.

Sus aplicaciones principales son en plantas ornamentales domésticas y comerciales, como cobertura muerta en cultivos perennes y anuales, y como material para la construcción en las siguientes opciones:

- ✓ Placas de fibra de coco y corcho expandido para aislamientos acústicos
- ✓ Placas de fibra de coco, molido colado en bloque
- ✓ Molido colado y no colado
- ✓ Fibra cruda
- ✓ Rollos de fibra de coco para aislamientos acústicos bajo pavimento

Tablero de coco fibrocemento (CFB) se fabrica con materiales fibrosos como la fibra de coco, hojas, espadas, y la madera triturada, mezclada con cemento. Este tipo de paneles pueden ser utilizados en construcción de casas simplificado como muros, revestimiento del techo, el propio techo y como soporte de la base y encofrado de suelos de nivel superior con el acero como componente estructural principal²⁵.

²⁵ Artículo: "¿Cómo utilizar la fibra de coco en el sector construcción?", 21/05/2014.

Fuente: <http://www.i-ambiente.es/?q=noticias/como-utilizar-la-fibra-de-coco-en-el-sector-construccion>

FIBRAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

Fig. EA.3 Bagazo de caña de azúcar

Fuentes: http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/Paginas/Galeria%20de%20im%C3%A1genes/Cana_Azucar.aspx
<http://news.urban360.com.mx/121572/bagazo-de-cana-posible-componente-de-concreto-hidraulico/>

El cultivo de la caña de azúcar es propio de las regiones tropicales y subtropicales cuya función principal es obtener el azúcar. El proceso de obtención del azúcar está dado a partir de la maceración de la caña para extraerle el jugo y queda el bagazo. Dicho bagazo tiene amplios usos conocidos tales como en tableros y en la industria papelera, pero también se usan en hormigones. En Vietnam se hacen tejas de cubiertas con esta fibra de manera usual. El bagazo contiene alrededor del 50 % de fibra, un 30% de jugo y el otro 20% restante lo componen otros sólidos solubles. Para obtener una buena fibra a incorporar al hormigón es necesario eliminar el jugo y remover dichos sólidos, lo cual se hace a través del lavado con agua²⁶.

El bagazo de caña tiene diversas aplicaciones, y una de ellas es como base para la elaboración de materiales compuestos, incluso se le ha llamado en las publicaciones de revistas como el material compuesto del futuro. En su uso directo estaría incorporado como sustituto parcial del cemento para la elaboración de hormigón utilizándose en obras de infraestructura.

²⁶ Macías Mesa, J. et.al. "Utilización de fibras en hormigones. La experiencia cubana con el empleo del fibrequen".

FIBRAS DE BAMBÚ

Fig. EA.4 Bambú. Sistema constructivo ecológico: Cimentación de hormigón ciclópeo armado con bambú, refuerzo con hormigón armado. Fuentes: <http://reutilizando.com/jardineria-2/page/19/>
http://www.eoi.es/wiki/index.php/Sistemas_y_soluciones_constructivas._Materiales_en_Ecomateriales_y_construcci%C3%B3n_sostenible

La planta de bambú puede llegar a tener alturas de hasta 15 metros y un grosor variable entre 25 y 100 mm, siendo un cultivo de regiones tropicales y subtropicales. Debe ser utilizado seco y sirve para reforzar el hormigón en sustitución de las barras de acero, o sea, se emplea como material continuo de refuerzo. Tiene una alta capacidad de absorción del agua y un bajo módulo de elasticidad. De querer ser utilizadas las fibras propiamente, debe ser empleado algún procedimiento mecánico especial.

Abundante, sostenible y muy resistente, el bambú tiene potencial para convertirse en un sustituto ideal en lugares donde el acero no puede ser producido fácilmente.

En los ensayos de resistencia a la tracción, el bambú supera a la mayoría de los otros materiales, acero incluido. Esto se logra a través de la fuerza de su estructura hueca, tubular, evolucionada durante milenios para resistir la fuerza del viento en su hábitat natural. También esta estructura ligera facilita la cosecha y el transporte. Debido a su ciclo de crecimiento rápido y la variedad de áreas en las que es capaz de crecer, el bambú también es muy barato. Este rápido crecimiento permite la absorción de

grandes cantidades de CO₂, lo que significa que su cultivo como material de construcción ayudaría a reducir además la velocidad del cambio climático²⁷.

FIBRAS DE YUTE

Fig. EA.5 Detalle de las hojas, pecioladas, con limbo triangular de 10 a 15 cm de largo por 5 cm de ancho. Es un arbusto de 2 a 4 m de alto, el tronco rígido y fibroso de 2 cm de diámetro se ramifica en la parte superior.
Fuente: http://jute.org/prod_gallery.html

Fig. EA.6 Utilización del tejido de yute como arpillera húmeda para el curado del hormigón.
Fuente: <http://www.deyute.com/es/noticias-de-yute/40/>

El yute es extraído de la corteza de la planta del yute blanco y, en menor cantidad, del yute rojo. Es una fibra natural con un brillo sedoso dorado, llamada por eso mismo fibra dorada. Es cultivado principalmente en la India, Bangladesh, China y Tailandia. Posee muchos usos entre los que se encuentran los tradicionales de hacer ropas o envases para transportar granos, los llamados sacos. Por su resistencia a la tensión las fibras de yute pueden ser usadas en matrices cementicias. El proceso para obtener las fibras de yute es muy simple: las plantas maduras son cortadas y remojadas en agua, aproximadamente a las cuatro semanas ya la corteza está descompuesta, entonces las fibras expuestas son despojadas del tallo, lavadas y secadas²⁸.

Entre las ventajas del yute figuran sus propiedades aislantes y antiestáticas, así como su baja conductividad térmica y moderada retención de la humedad.

²⁷ Connor, W. "Bambú: ¿Una alternativa viable para reforzar el concreto?" (*Bamboo: A Viable Alternative to Steel Reinforcement?*). 29 Jul 2014. Plataforma Arquitectura.
Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-367829/bambu-una-alternativa-viable-para-reforzar-el-concreto>

²⁸ FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Future Fibres.
<http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/es/>

Existen proyectos encaminados a desarrollar y probar industrialmente los compuestos termoplásticos reforzados con fibra de yute para diversos usos destinados a reemplazar la fibra de vidrio y otros productos.

Las cubiertas de arpillera con capacidad para retener la humedad, son usadas extensamente para el curado del hormigón. El tejido de yute utilizado por sus características técnicas es resistente a la putrefacción y al fuego²⁹.

ORUJILLO

Fig. EA.7 Línea de molturación. Fuente: <http://www.cooperativacampillodearenas.com/instalaciones>

La explotación del olivar constituye uno de los pilares básicos de la economía de muchas regiones de España, siendo esta la primera productora de aceite de oliva a nivel mundial. En las almazaras, por medios físicos (centrifugación), se obtiene por un lado el aceite virgen de oliva y por otro el alpeorujo u orujo húmedo, mezcla de la parte sólida y agua que contiene la aceituna con una humedad en torno al 60%. Los subproductos derivados de la molturación de aceituna representan una producción importante con reutilización limitada.

El orujillo es el producto residual resultante del proceso de extracción del orujo en dos fases, y no es un residuo propiamente dicho, sino un subproducto ya que, debido a su comportamiento como combustible, se utiliza en los secaderos de las propias extractoras o es vendido a otras industrias para su empleo en calderas.

²⁹ Noticias. 22-07-2013. "Utilización del tejido de yute para el curado del hormigón"
Fuente: <http://www.deyute.com/es/noticias-de-yute/40/>

El posible uso de ciertos subproductos del proceso de molturación, tal es el caso del orujillo, han sido objeto de líneas de investigación dirigidas al refuerzo de morteros y hormigones de características especiales (El Bakkouri, A., *et al.*, 2005).

Estas investigaciones proponen la mezcla de orujillo en porcentajes diferentes (entre el 5 y el 8%) para aplicaciones en las que el nivel de aislamiento es el objetivo, con un consiguiente abaratamiento de los costes ya que sólo interviene la partida del transporte.

Los resultados demuestran que la capacidad de aislamiento térmico-acústico se incrementa y en función de la proporción utilizada por el contrario se reduce sensiblemente el peso aumentándose hasta un 30% la resistencia mecánica. Las soleras aislantes, las capas de hormigón sobre forjado, etc. son algunas aplicaciones destacables³⁰.

CÁSCARA DE ARROZ

Fig. EA.8 Probeta de composite formado por cemento, arena y cascarilla de arroz
Fuente: <http://luisvelascoroldan.com/?p=1326>

Para producir este tipo de hormigón se utiliza una mezcla de cemento, arena y cascarillas de arroz, como reemplazo al árido que usualmente se utiliza. Este tipo de hormigón no es apto para la construcción de elementos estructurales principales, como por ejemplo vigas, columnas, etc. Sin embargo es un material excelente para la utilización en aligeramiento de losas, la elaboración de mampostería o paneles prefabricados. Una de las principales características de este material es la superioridad

³⁰ Mata Cabrera, F. *La selección sostenible de los materiales de construcción*. TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen VIII. año 2010. Separata.

en aspectos de aislamiento sonoro y térmico en comparación al hormigón tradicional. Este presenta, a su vez, mayor resistencia a la corrosión presentada por lluvia ácida. Las pruebas de campo realizadas en el material también comprobaron que es ignífugo, además se realizaron pruebas hidrófugas para comprobar su factibilidad.

Otra de las ventajas de este hormigón es la diferencia en costos, ya que la cascarilla de arroz puede ser obtenida a un costo mucho menor que el árido al cual reemplaza³¹.

Como adición mineral en mezclas de hormigón y morteros puede mejorar la durabilidad, contribuyendo a mejorar las características de los mismos en estado fresco y endurecido, disminuyendo la permeabilidad e incrementando sus propiedades mecánicas. La utilización de este tipo de adiciones puede requerir el empleo de reductores de agua, especialmente cuando se elabora hormigón con baja relación agua/cemento. En otros casos se podrá requerir el empleo de aditivos modificadores de viscosidad, especialmente para hormigones auto consolidables.

CÁSCARA DE CACAHUETE (MANÍ)

Fig. EA.9 Cáscara de cacahuete como agregado. Fuente: http://www.elreitu.com.ar/productos_ui_cascara_de_maní.html

El principal uso de la cáscara, es como combustible de calderas. Quemadores especiales deben ser empleados para reducir la cantidad de humo y cenizas volantes que genera la combustión. Sin embargo, con semejantes cantidades de desperdicios, la aplicación de los desechos del descascarado del cacahuete sólo tiene aplicación

³¹ Tecnologías y Materiales: "La cascarilla de arroz: Nuevo material para elaborar hormigón". 17-04- 2012. Fuente: <http://arqzine.com/mag/tecnologias-y-materiales/la-cascarilla-de-arroz-nuevo-material-para-de-hormigon/>

parcial. Existe un limitado mercado para las cáscaras de cacahuete (Woodroof, J. G., 1983).

Dentro de las aplicaciones alternativas, es conocido el empleo de cenizas de cáscaras de cacahuete como adición en cementos puzolánicos.

La cáscara de cacahuete es un agregado especial que le confiere al material propiedades tales como alta porosidad y rigidez suficiente, dadas por sus partículas fibrosas. Consecuentemente, las características del nuevo material están caracterizadas por bajo peso, y buena capacidad de aislamiento térmico, que lo hace apto para componentes de cerramientos verticales y horizontales (Gatani, M. y Argüello, R., 2007).

CÁSCARA DE ALMENDRA

Fig. EA.10 Cáscara de almendra como agregado. Fuente: elaboración propia

La cáscara de almendra es utilizada en elementos moldeados para ser empleados en construcción. Duralmond (nombre comercial) es un material compuesto que se obtiene a partir de la cáscara de almendra. Esta, triturada y mezclada con resinas de origen sintético y tras un proceso de polimerización y de haber sido sometida a determinadas condiciones de presión y temperatura dentro de un molde, se transforma en objetos rígidos. El material resultante adopta la forma del molde, así como su textura, con una gran precisión.

Se pueden fabricar objetos de densidad distinta, lo que varía su resistencia mecánica. Duralmond es prácticamente inalterable a la acción del sol, totalmente impermeable al agua y aislante térmico y acústico. Con este material se fabrican piezas para fachadas y falso techo. El empleo de un material biodegradable y reciclable como este en el sector de la construcción siempre resulta una novedad.

Las formas de los revestimientos, normalmente curvas, tienen un efecto disipador del sonido y anti reverberación. El material se obtiene de la transformación de un desecho vegetal. La serie de objetos biodegradables y reciclables que resultan, al ser fabricados por técnica de moldeo, pueden adquirir formas distintas y mimetizar texturas. Todo ello le hace apto para realizar los objetos que los creadores y diseñadores más inquietos han imaginado³².

Existe un movimiento creciente de científicos e ingenieros dedicados a minimizar el impacto medioambiental de la producción de composite polimérico, personas que creen que las huellas ambientales deben ser disminuidas en cada etapa del ciclo de vida del composite polimérico. Utilizando fibras naturales con polímeros basados en los recursos naturales permitirá solucionar muchas cuestiones ambientales. Incorporando biofibras como recursos renovables fundamentados en biopolímeros tales como plásticos celulósicos, polilactides, plásticos a partir del almidón, polihidroxicarbonatos (poliésteres bacteriales) y plásticos a base de soja, los supuestos composites “verdes” podrán ser pronto la tendencia del futuro (Amar K., *et al.*, 2005).

El uso de paneles a base de composite de partículas de madera se ha incrementado hoy en día en lugar de maderas sólidas debido a la menor disponibilidad de madera³³ (Gürü, M., *et al.*, 2006). Los residuos de la actividad agrícola (Tabla EA.2) pueden ser unos buenos sucesores de la madera debido a su bajo costo, baja densidad y mejores propiedades mecánicas comparadas con la madera. Estos desechos quemados en el campo crean amenazas medioambientales tales como contaminación del aire, pérdida

³² http://www.construmatica.com/construpedia/Revestimiento_de_Duralmond

³³ Guru, M.; Tekeli, S.; Bilici, I. “Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite, Materials and design, Vol. 27, Pp. 1148–1151, 2006.

de humedad del suelo, formación de humos tóxicos³⁴ (Pirayesh, H. y Khazaeian, A., 2012). La utilización de estos residuos reducirá el riesgo ambiental y beneficiará a los mismos.

Tabla EA.2 Mayores cultivos agrícolas y sus residuos³⁵ (Chaudhary, A. K., *et al.*, 2012)

Tipo de cosecha	Residuo
Coco	hojas, corteza, cáscara
Café	corteza, cáscara
Maíz	hojas, tallos
Algodón	tallos
Nueces	cáscaras
Cacahuetes	cáscaras
Arroz	casquilla, paja, tallos
Caña de azúcar	bagazo

Hoy en día, debido a sus muchas ventajas (tales como un reducido peso y unos costos bajos de producción) los biocomposites son objeto de amplia investigación, concretamente en las industrias de la construcción y edificación. Corrientemente, no sólo los constructores sino también los propietarios de viviendas están interesados en utilizar biocomposites para cuestiones como cubiertas, cercados, etc.

Los biocomposites pueden ser clasificados respecto a sus aplicaciones en la industria de la edificación en dos grandes grupos: biocomposites estructurales y no estructurales³⁶ (Rowell, R.M., 1995). El cemento portland es el material fabricado más utilizado³⁷ (Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. 1993), pero el hecho es que hormigón simple, morteros y pastas de cemento son frágiles, poseen baja resistencia a la tracción, y muestran bajas deformaciones de tensión antes del fallo. Estos defectos tradicionalmente han sido superados incorporando algún otro material con mayor resistencia a la tracción dentro del material a base de cemento. Entre los diferentes tipos de fibras utilizadas en composites a base de cemento, las fibras naturales ofrecen

³⁴ Pirayesh, H.; Khazaeian, A. "Using almond (*Prunus amygdalus* L.) shell as a bio-waste resource in wood based composite", *Composites: Part B*, Vol.43, Pp.1475–1479, 2012.

³⁵ Chaudhary, A. K.; Singh, V. K.; Tewari, M. "Utilization of waste Agriculture byproduct to enhance the economy of farmers", *Indian research journal of extension education special issue* Vol.1, Pp. 89-92, 2012.

³⁶ Rowell, R.M. 1995 A new generation of composite materials from agro-based fibres. In P. N. Prasas, M. E. James, T. F. Joo, eds. *Polymers and Other Advanced Materials: Emerging Technologies and Business Opportunity. Proceedings of the Third International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials*, Kuala Lumpur, Malaysia. pp. 66–69. New York, Plenum Press.

³⁷ Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. 1993. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York, McGraw-Hill.

distintas ventajas tales como disponibilidad, renovabilidad, bajo costo y tecnologías modernas de fabricación.

Una prometedora y muy a menudo utilizada fibra natural para este propósito es la pulpa de la madera. Composites de fibrocemento a base de pulpa de madera ofrecen numerosas ventajas cuando son comparados materiales cementicios sin fibras con otros que se encuentran reforzados de las mismas. Los composites de fibrocemento muestran durezas mejoradas, ductilidad, capacidad de flexión y resistencia a fisura comparado con los materiales a base de cemento sin fibra. La pulpa de fibra es un material de refuerzo único debido a que no es peligroso, es renovable y fácilmente obtenible con un costo relativamente bajo cuando es comparado con otras fibras comercialmente disponibles³⁸ (MacVicar, R., *et al.*, 1999).

Como resultado de estas ventajas, los composites a base de pulpa de fibrocemento han encontrado aplicaciones prácticas en el mercado comercial como reemplazo para las fibras peligrosas de asbestos. Hoy, los composites a base de pulpa de fibrocemento pueden ser encontrados en productos tales como en tuberías extruidas para usos sin presión y en materiales de edificación no estructurales, principalmente productos laminares. Quizás los más ampliamente conocidos son los materiales de revestimiento de fibrocemento que algunos han denominado “los productos del mañana”³⁹ (Kurpiel, F. T., 1998). A partir del final de los años 1990, el fibrocemento creció entre 7 y el 10% del mercado de los productos laminares en Norteamérica⁴⁰ (Kurpiel, F. T., 1997), con algunos analistas proyectando un ratio de crecimiento anual del 25% para los próximos años⁴¹ (Hillman, A. J., 2003). Otros productos comerciales actualmente disponibles incluyen revestimientos (los cuales pueden reproducir al ladrillo o estuco), elementos arquitectónicos, tablillas de madera y tejas, placas de cemento y entresijos, así como paneles frontales y plafones.

³⁸ MacVicar, R., Matuana, L.M. & Balatinez, J.J. 1999. Aging mechanisms in cellulose fibre reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, pp. 189-196.

³⁹ Kurpiel, F.T. 1998. Fibre-cement siding is tomorrow's growth product. *Wood Technology*, vol. 125, no. 1, pp. 50-54.

⁴⁰ Kurpiel, F.T. 1997. Diffusion of cellulose fibre-cement siding and roofing into North America. In A. A. Moslemi, ed. *Proceedings of Inorganic-Bonded Wood and Fibre Composite Materials*, pp. 41-44.

⁴¹ Hillman, A. J. (2003). Determinants of political strategies in US multinationals. *Business & Society*, 42(4), 455-484.

Desde tiempos antiguos las fibras naturales han sido utilizadas para reforzar materiales frágiles. Por ejemplo, hace miles de años los Egipcios comenzaron a utilizar paja y crines de caballo para reforzar e incrementar las propiedades de los ladrillos de barro⁴² (Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M., 1993). En épocas más recientes el uso comercial a gran escala de fibras de asbestos en una matriz cementicia comenzó con el invento del proceso Hatschek⁴³ en 1898. Sin embargo, principalmente debido a daños a la salud asociados con las fibras de asbestos, diferentes tipos de fibras alternativas fueron desarrolladas e introducidas a lo largo de los periodos 1960 y 1970.

Entre los reemplazos más prometedores están las fibras naturales. Dependiendo de su aplicación los materiales de fibrocemento pueden ofrecer una variedad de ventajas sobre los materiales de construcción tradicionales: a) respecto a la madera, los productos de fibrocemento ofrecen un aumento de la estabilidad dimensional y la resistencia a la humedad, pudrición y fuego; b) con respecto a la mampostería los productos de fibrocemento facilitan una construcción más rápida, ligera y de más bajo costo; c) con respecto a materiales cementicios sin fibras, los productos de fibrocemento pueden ofrecer durezas incrementadas, ductilidad y capacidad de flexión así como resistencia a la fisura. Un proyecto fue financiado por CFC (Common Fund for Commodities) para usar sisal como reemplazo de asbestos para aplicaciones en tejados.

La principal desventaja de las fibras naturales en composites a base de cemento es su vulnerabilidad a la descomposición en un ambiente alcalino presente en el cemento portland⁴⁴ (Balaguru, P. N. y Shah, S. P., 1992). Generalmente, las fibras naturales usadas en matrices cementicias pueden ser divididas en dos categorías: fibras naturales no procesadas y fibras naturales procesadas. Las fibras naturales no procesadas están disponibles en muchos países y representan un recurso continuo renovable. Estas fibras son baratas y requieren un consumo bajo de energía cuando son producidas y preparadas con la mano de obra y tecnología localmente disponibles.

⁴² Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. 1993. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. New York, McGraw-Hill.

⁴³ El origen del fibrocemento se remonta a 18989, año en el que fue ideado por Ludwig Hatschek, un ingeniero austríaco. La mezcla de los productos se realizaba, orientando las fibras de amianto (o asbesto), y repartiéndolas en toda la masa de cemento, constituyendo así un elemento ideal para resistir las fatigas derivadas de los esfuerzos de tensión y compresión.

⁴⁴ Balaguru, P.N & Shah, S.P. 1992. Fibre Reinforced Cement Composites, New York, McGraw Hill.

Tales fibras son utilizadas en la fabricación de composites de bajo contenido en fibra y ocasionalmente en la fabricación de composites como laminados de alto contenido en fibra. Generalmente estas fibras son usadas en proyectos de viviendas de bajo costo en países menos desarrollados. Por otra parte, las fibras naturales procesadas, tales como las fibras de la pulpa Kraft⁴⁵, la cual requiere procesos de fabricación sofisticados para extraer las fibras, han sido utilizadas en la producción comercial desde 1960 para la fabricación de productos laminados y cementos reforzados con fibras⁴⁶ (Bentur, A. y Mindess, S., 1993). Inicialmente, estos fueron usados con fibras de asbestos, pero desde mediados de 1980 ellas han sido utilizadas en todas las aplicaciones como único refuerzo en lugar de fibras de asbestos. Los productos composite de fibrocemento para viviendas residenciales generalmente han estado limitados a aplicaciones exteriores tales como revestimiento y techado. Su uso exterior ha estado limitado en la industria debido a la degradación ante ambiente húmedo y seco. De hecho, estos componentes deben tener un mantenimiento regular de pintura para evitar problemas de humedad. Además, las aplicaciones de estos productos composite no son de tipo estructural por naturaleza.

Las posibilidades para los composites extruidos de fibrocemento para aplicaciones residenciales incluyen secciones estructurales, cerchas, vigas, canalones y tuberías. En interiores, los composites pueden ser usados para fabricar gabinetes, paneles, estantes, puertas, molduras, barandillas y escaleras. Nuevos procedimientos de composite prefabricado también tienen la capacidad de expandir las aplicaciones de estos composites en el sector de la vivienda. En esta área, los éxitos de la investigación incluyen desarrollar técnicas (ej. tratamiento de la fibra, métodos de mezcla) para alcanzar una distribución uniforme de la fibra en contenidos altos de la misma, así como una caracterización reológica de mezclas a gran escala. Establecer la tecnología para composites de fibrocemento prefabricados permitirá la construcción a gran escala de elementos estructurales tales como calzadas, aceras y cimentaciones con refuerzo de pulpa de fibra.

⁴⁵ La pulpa Kraft es la que se obtiene al colocar virutas de madera en un recipiente presurizado en presencia de sosa caustica caliente y sulfuro de sodio

⁴⁶ Bentur A. & Mindess S. 1993. Effect of drying and wetting cycles on length and strength changes of wood fibre reinforced cement. *Durability of Building Materials*, vol. 2, pp. 37-43.

De igual forma, los avances tecnológicos que permitan la producción de prefabricados facilitarán el camino para la construcción modular usando elementos tales como paneles de fibrocemento. Para reducir los costos de transporte y las necesidades de energía, reducciones en el propio peso de los composites de fibrocemento son un área importante de investigación. Adicionalmente, la posibilidad de refuerzo de pulpa de fibra de materiales existentes de construcción ligeros tales como bloques y paneles, similar a elementos de hormigón celular en autoclave⁴⁷ deberá ser investigada. Las fibras harán que estos materiales sean más robustos y resistan fracturas durante el transporte y la construcción. Debido a que los materiales a base de cemento son bien conocidas sus propiedades aislantes, otra vía para futuras investigaciones y desarrollo de producto es el uso estratégico de composites de fibrocemento para aislamiento acústico y térmico. Tales productos podrían estar compuestos en su totalidad de fibrocemento (aireado) o como un solo componente en un panel aislante.

Como se ha dicho los biocomposites son utilizados para la construcción de paneles. Hay 3 tipos: de fibras, de partículas y a base de minerales compactados. Las fibras de bagazo son utilizadas para paneles de fibras, de partículas y de composición. La paja proveniente de cereales es la segunda fibra natural más utilizada en la producción de paneles. El alto porcentaje de sílice en la paja de cereales significa que los productos hechos con este tipo de fibra natural son naturalmente resistentes al fuego. También, la baja densidad de los paneles de paja hace que sean resilientes⁴⁸. Los resultados muestran que las casas con estos paneles son resistentes a los terremotos. La paja también es utilizada en los paneles de partículas.

Las cáscaras de arroz también son fibrosas y necesitan poco aporte de energía para prepararlas para su utilización. Este tipo de cáscaras y sus cenizas son usadas en bloques de fibrocemento y otros productos cementicios (Salas, J., *et al.*, 1986), (Ospina, M., *et al.*, 2009). La presencia de cáscaras de arroz en productos de construcción ayuda a incrementar las propiedades acústicas y térmicas. Un panel de

⁴⁷ El hormigón celular curado en autoclave (AAC), a veces conocido como el hormigón celular autoclavado (CAC), se inventó a mediados de los años 1920 por el arquitecto e inventor sueco Axel Eriksson, es un material ligero, útil para los edificios prefabricados y proporciona a la estructura, el aislamiento al fuego y la resistencia al moho, en un solo material.

⁴⁸ La resiliencia es la magnitud que cuantifica la cantidad de energía que un material (p.ej. acero) puede absorber al romperse por efecto de un impacto, por unidad de superficie de rotura.

superficie resistente ha sido hecho usando espuma de poliuretano o poliéster en el núcleo y capas de bambú en las caras (Govindarao, V. M. H., 1980).

Los composites de fibra natural pueden ser muy efectivos en costo cuando son empleados para:

- Industria de la construcción y edificación: paneles de división y falsos techos, paredes, pisos, ventanas y marcos de puertas, tejas, edificaciones móviles o prefabricadas que pueden ser utilizadas en tiempos de desastres naturales tales como inundaciones, ciclones, terremotos, etc.

Residuos orgánicos ROCA

Se han consultado las siguientes publicaciones y bases de datos, entre las que destacan:

- ✓ FSTA (Food Science and Technology Abstracts)⁴⁹
- ✓ AGRICOLA⁵⁰ (Ebsco)
- ✓ AGRIS (International System for Agricultural Science and Technology)⁵¹
- ✓ FAOSTAT⁵²
- ✓ CAB Abstracts⁵³
- ✓ Academic Search Premier (Ebsco)⁵⁴
- ✓ FAOSTAT⁵⁵
- ✓ CAB Internacional (CABI)⁵⁶
- ✓ Google Académico

⁴⁹ Contiene información crucial de revistas científicas relacionadas con la ciencia y tecnología de la alimentación publicadas en todo el mundo, así como información importante de patentes, libros, resúmenes de conferencias, informes, folletos y legislación. Abarca desde 1990 hasta la actualidad.

⁵⁰ Base de datos de la Biblioteca Nacional Agrícola de los Estados Unidos. Contiene más de 3.5 millones de referencias bibliográficas, desde 1970.

⁵¹ Base de Datos del Sistema Internacional de Información sobre Ciencias y Tecnología Agrícola, establecido por la FAO.

⁵² Base de datos de la FAO.

⁵³ Base de datos compilada a partir de la bibliografía mundial científica y técnica. Anualmente se reciben más de 40.000 documentos publicados, incluyendo revistas de investigación, actas de conferencias y documentos, libros, informes, patentes que proceden de más de 130 países en más de 50 idiomas.

⁵⁴ Base de datos multidisciplinar proporciona el texto completo de más de 4.600 publicaciones, de las cuales casi 3.900 son títulos arbitrados en texto completo. Dispone de versiones en PDF de cientos de publicaciones que se remontan hasta 1975, o incluso fechas anteriores, y permite buscar referencias citadas de más de 1.000 títulos.

⁵⁵ Base de datos de la FAO. Acceso gratuito y sencillo a datos de 245 países y 35 áreas regionales desde 1961 hasta el año más reciente disponible.

⁵⁶ Contiene más de 10 millones de resúmenes del CAB de la literatura agrícola mundial, desde 1973 a la fecha. CABI es una organización internacional, intergubernamental interesada en la difusión, aplicación y generación de conocimientos científicos en agricultura, el sector forestal y disciplinas afines. El CABI es muy conocido por sus publicaciones que incluyen el CAB ABSTRACTS y el Global Forestry Compendium (Compendio Forestal Mundial).

Utilizando términos de búsqueda como: cáscaras, pulpas o corteza, poda, piel de almendra, antioxidantes, absorbente, absorción, filtración, gasificación, combustión, cocombustión, biomasa, pirólisis, carbón activado, fraccionamiento, descascarado, almendra, frutos secos, etc., se encontró en la literatura técnica consultada un número aproximado superior a los 560 documentos técnicos e informes que abarcaban un periodo de tiempo desde 1947 hasta 2014 (Tabla EA.3).

Tabla EA.3 Desglose de los resultados de la literatura técnica encontrada

Usos	Categoría
Tipo de residuo	Cáscaras (carbones activados, combustión, pirólisis, antioxidantes, carbohidratos, medio de cultivo, biocomposite, cama de animales, absorbentes/filtros, gasificación) Cortezas (fibra, antioxidantes, alimentación, pegamentos/polisacáridos, filtros) Poda (combustión, gasificación, pirólisis, carbones activados) Piel (antioxidantes)
Uso energético	Gasificación (cáscaras, restos de poda) Pirólisis (cáscaras, restos de poda) Combustión/cocombustión (cáscaras, restos de poda)
Uso no energético	Antioxidantes (cortezas, pieles) Carbones activados y carbón biológico (cáscaras, cortezas, restos de poda) Absorbentes/filtros (cortezas, cáscaras) Otros (medio de cultivo, alimentación, carbohidratos, lípidos, etc.)

Como puede apreciarse la categorización realizada no es muy estricta, existiendo algunos solapes entre ellas. Se hace notar que la mayor parte de los trabajos están orientados a la extracción y uso de antioxidantes y en la obtención de carbones activados. No hay mucha información relativa al uso de los residuos de almendra como fuente de energía. Las cortezas y pieles son principalmente para fraccionamiento, extracción y recuperación de compuestos valiosos mientras que gran parte de las

cáscaras y restos de poda son utilizados para obtener carbones activados y algunos para combustión, pirólisis y gasificación.

Antes del desarrollo de la industria energética a base de biomasa en los años 1980, la cáscara de almendra estaba considerada como un subproducto agrícola de bajo valor utilizado para cama de animales, producción de cola para la industria de la madera contrachapada y para un número de usos especialmente menores como lodos de perforación de petróleo. En Estados Unidos la mayoría de los procesadores rurales de almendra solamente descascaraban las almendras cosechadas antes de enviarlas con cáscara a algunas grandes plantas para su desgrane, clasificación y posterior transformación.

Estos procesadores rurales con almendras descascaradas estaban más próximos a los mercados agrícolas que a las grandes plantas y es posible que muchas de ellas simplemente dispusieran de almendras con cáscara. Las opciones para la cáscara eran: extendiéndolas en los campos o huertos, quizás arándolos o apilándolas en zonas previstas para su quema, o dejándolas arder por combustión espontánea cuando las condiciones fueran las idóneas. Las mayores plantas procesadoras comprensiblemente estaban más preocupadas con el uso interno de las cáscaras de almendra para reducir los costos que con la venta al exterior de las mismas.

Como ejemplo puede citarse la planta Earl Ruby perteneciente a la empresa Blue Diamond Growers⁵⁷ en Sacramento, California que quemó la mayor parte de su cáscara de almendra en quemadores típicamente empleados para los residuos de la madera. En términos de contaminación del aire fue una práctica sucia pero ambientalmente aceptable en aquella época, y una fuente de vapor y agua caliente para procesar los frutos de la almendra (Kester, D. E. y Ross, N. W., 1996).

A mediados de 1960, la producción de almendra en California comenzó a aumentar, la tendencia del proceso se dirigió hacia los residuos de la poda y el descascarado de

⁵⁷ Blue Diamond® es una potente marca comercial de renombre internacional proveedora de productos de almendra con calidades superiores a todo el mundo. En 1910, 230 productores de almendras de California formaron la Blue Diamond Cooperative.

almendras cercanos al cosechador, incrementándose de esta manera el acceso a los mercados rurales pero reduciendo el desarrollo de los usos industriales para la cáscara de almendra. Mientras unos pocos mercados fueron desarrollados, las opciones de eliminación por parte de los procesadores rurales se mantuvieron inafectadas. Blue Diamond continuó utilizando los quemadores de restos de la madera para eliminar la cáscara de almendra hasta 1970, entonces con las regulaciones acerca de la contaminación del aire cada vez más restrictivas, contrató con la planta Kingsford Charcoal⁵⁸ venderle grandes cantidades de cáscara de almendra para transformarlas en briquetas de carbón vegetal. A pesar de que Blue Diamond tenía localizaciones centralizadas y una cuota de mercado dominante que facilitaban ventas a bajo costo, reduciendo los derivados de la recolección y transporte, factores importantes cuando se comercializa un producto de bajo precio, los 0,50\$/t ofertados por Kingsford no cubrieron el costo del transporte y Blue Diamond tuvo cada vez mayores problemas de almacenaje de la cáscara de almendra hasta que la planta se incendió y cerró.

En 1995 las compañías madereras de Estados Unidos y sus diferentes asociaciones apreciaron que amplios sectores de la opinión pública sabían que los recursos madereros eran escasos. De hecho, las restricciones ambientales en las ventas de madera de los terrenos públicos de la zona del Pacífico noroccidental habían reducido los suministros desde la región casi un 80% pero el efecto directo en las ventas de madera a nivel nacional había sido insignificante y el suministro total en Estados Unidos era creciente.

De los terrenos forestales en Estados Unidos, 7/10 partes, o lo que es lo mismo 209 millones de ha de un total de 290 millones de terreno forestal son clasificadas como terrenos madereros, siendo estos definidos como terrenos madereros para la producción comercial de productos a base de madera. Estos terrenos pueden ser utilizados para cultivos rotativos y recolección de árboles. De los 209 millones de ha de tierras madereras, los gobiernos Federal, Estatal y local tienen en propiedad unos 46 millones de ha (22%) y las entidades privadas no industriales son propietarias de cerca

⁵⁸ La Compañía Kingsford Company fue fundada por Henry Ford y E.G. Kingsford en 1920. El carbón vegetal fue desarrollado por la fábrica de la Ford Motor Company a partir de desechos y desperdicios de la madera.

de 163 millones de ha (78%). Los terrenos madereros privados están distribuidos mayoritariamente en pequeñas extensiones de terreno forestal⁵⁹ (U.S. Census Bureau, 2012).

Aunque la oferta global de madera en Estados Unidos se ha incrementado, el precio de la misma también ha aumentado debido a los límites fijados en el registro público de terrenos. El registro privado de tierras es más caro que el público, donde las ventas de madera están subvencionadas a través de la construcción de carreteras y otras acciones del US Forest Service (United States Department of Agriculture)⁶⁰.

Ciertos tipos de madera, tales como los derivados de árboles antiguos y especies deseadas han sido sobreexplotados y el suministro de materiales utilizables se ha reducido. Ello ha hecho también estimular el desarrollo de nuevos productos y procesos en la industria de la madera. Paneles que fueron originalmente fabricados a partir de chapas de madera (contrachapados) actualmente se ha incrementado su elaboración a partir de partículas de madera, virutas y astillas, manteniéndolas unidas con un agente de unión (resina), que sometidas a presión forman un tablero sólido.

Estos paneles reconstituidos de madera, tales como los aglomerados de fibras orientadas⁶¹, de fibras de densidad media y de madera prensada, pueden utilizar madera disponible de fuentes abundantes y no controvertidas, así como de materias primas que fueron previamente consideradas inaceptables debido a limitaciones en su tratamiento o rendimiento. En muchos casos, los paneles reconstituidos son en la actualidad más resistentes, ligeros, con mejor rendimiento y más fáciles de trabajar que con contrachapados. Los márgenes para los fabricantes son también mucho más altos que con las ventas de madera tradicional ya que la madera reconstituida es fabricada empleando menos cantidad de árboles y los fabricantes pueden aprovechar más cada árbol (llegando a utilizar hasta un 90% del tronco, comparado con el 40% de la madera que se suele venir obteniendo (Wood Handbook, 1999).

⁵⁹ U.S. Census Bureau, Statistical Abstract of the United States: 2012; 2007 data

⁶⁰ Agencia multifacética que gestiona y protege 154 bosques nacionales y 20 pastizales en 44 estados y Puerto Rico. Su misión es mantener la salud, diversidad y productividad de los bosques nacionales y pastizales para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales y futuras.

⁶¹ OSB Oriented Strand Board

Con una fuerte perspectiva de crecimiento de la industria, los recientes estudios de investigación se han centrado en la utilización de abundantes materiales de biomasa relativamente baratos para fabricar productos de construcción. La sustitución por madera, la cual escasea, el efecto de las leyes medioambientales respecto a los niveles de contaminación del aire que restringen la quema y con un incremento de los costos de su eliminación en vertederos, todo ello favorece el desarrollo de productos para la edificación.

En ese sentido y con el objetivo de aprovechar los volúmenes importantes de cáscara de almendra investigadores interesados en la posible potencialidad de que estos se incorporen como materiales orgánicos agregados han desarrollado diversas líneas de investigación considerando el empleo de la cáscara de almendra en materiales compuestos aligerados de baja conductividad térmica. Un ejemplo se tiene en la solicitud de la Universidad Politécnica de Valencia a través de un grupo de investigadores a la Oficina Española de Patentes y Marcas, dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo acerca de: “Procedimiento de fabricación de un material alternativo a la madera y material así obtenido”⁶². También se pone de manifiesto la existencia de diversas patentes de productos fabricados en España y con marca registrada como: Duralmond⁶³; Maderón⁶⁴.

De la amplia revisión bibliográfica realizada (publicaciones, tesis doctorales, artículos, citas y trabajos de investigación, entre otras) que pudieran tener relación con la utilización de la cáscara de almendra en morteros y/o hormigones, el resultado ha sido nulo, por el contrario se han localizado diversos estudios científicos, artículos y noticias con la consideración de composites con la incorporación de la cáscara de almendra y

⁶² Se trata de un procedimiento de fabricación de un material alternativo a la madera realizado mediante la adición de cáscara de almendra a plastisoles de cloruro de polivinilo (PVC) procesable mediante técnicas de rotomoldeo que comprende la fabricación de una pasta o plastisol a partir de la mezcla de cáscara triturada de almendra de hasta 1000 micras de tamaño en una proporción del 5-70% en peso con plastisoles vinílicos. Esta pasta se puede transformar mediante los métodos usuales de transformación de plastisoles y preferentemente para la realización de piezas huecas mediante moldeo rotacional. Fuente: <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=P200500996>

⁶³ Material composite que se obtiene al mezclar resinas sintéticas y naturales, cáscara de almendra triturada y otros aditivos. Special Walls S.L. es la empresa comercializadora de los revestimientos y celosías de la marca Duralmond. Fuente: <http://www.duralmond.com/es/materiales>

⁶⁴ Nuevo material alternativo para el sector funerario que se obtiene a partir de maderas inertes como la cáscara de almendra triturada u otros materiales lignocelulósicos, que permiten fabricar una gran diversidad de productos, sustituyendo e incluso mejorando las cualidades de otros materiales entre ellos la madera. Ecowood Logic S.L. es la empresa comercializadora. El análisis del Ciclo de Vida del producto lo realiza un equipo pluridisciplinar de investigadores de la CEU Universidad San Pablo, Madrid. Fuente: <http://www.maderon.com/>

otros residuos agrícolas para la fabricación de tableros aglomerados utilizados en la industria de la construcción y otros productos, destacándose la siguiente relación de referencias y artículos:

2006

Gürü, M.⁶⁵; Tekeli, S.⁶⁶; Bilici, İ⁶⁷. ***“Manufacturing of urea–formaldehyde-based composite particleboard from almond shell”***. *Materials & Design*. Volume 27. No. 10. Pages 1148–1151.

Se investiga un método económico para la fabricación de aglomerado. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando cáscara de almendra que no tenía ningún valor económico, aparte de ser utilizada simplemente como combustible de bajo grado y forraje. Se determinó que los parámetros que afectan a la producción de aglomerado de material compuesto a partir de cáscara de almendra y urea-formaldehído eran: la proporción de urea-formaldehído⁶⁸, la temperatura y tiempo de reacción y el tamaño de partícula de cáscara de almendra. El efecto de estos parámetros sobre la dureza y la resistencia a la flexión fueron investigados.

Los resultados experimentales mostraron que la máxima dureza y resistencia a la flexión fueron 97,5 y 84,52 N/cm², respectivamente, en una proporción de urea-formaldehído de 0,97, temperatura de reacción de 70°C, tiempo de reacción de 25 min y la media de tamaño de partícula de 0,3 mm.

2008

Ledbetter, C.A.⁶⁹ ***“Shell cracking strength in almond (Prunus dulcis [Mill.] D.A. Webb.) and its implication in uses as a value-added product”***. *Bioresource Technology*. Volume 99. No. 13. Pages 5567–5573. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Crop Diseases, Pests and Genetics Research Unit. Parlier, CA. USA.

En este trabajo se investiga el desarrollo de nuevos usos de valor agregado para las cáscaras de almendra, un abundante subproducto agrícola. Diversas variedades de almendra son diferenciadas por los productores como duras o blandas sin cáscara, pero estas dos grandes categorizaciones de almendra también presentan diversidad en cuanto a variedad, morfología de la cáscara y en los propios caracteres físicos. Al definir con mayor precisión las características físicas y químicas de las cáscaras de

⁶⁵ Gazi University, Faculty of Architecture, Chemical Engineering Department, Maltepe, Ankara, Turkey.

⁶⁶ Gazi University, Metallurgy Education Department, Besevler, Ankara, Turkey.

⁶⁷ Gazi University, Chemical Engineering Department, Çorum, Turkey.

⁶⁸ Compuesto químico altamente volátil y muy inflamable, de fórmula H₂CO.

⁶⁹ Investigador en Genética.

almendra de diferentes variedades, los investigadores determinan qué tipos de cáscara son los más adecuados para procesos industriales específicos.

Ocho variedades de almendra fueron evaluadas en dos temporadas de cosecha consecutivas valorando, por un lado, el rendimiento al descascarado, es decir, el porcentaje o relación existente entre el peso total del fruto en cáscara y el fruto entero o en grano, porcentaje de granos y por el otro, la resistencia a rotura de la cáscara. La densidad aparente fue evaluada por separado en cada año con análisis de la varianza (ANOVA⁷⁰).

Las interacciones de las variedades de almendra por cosecha anual fueron altamente significativas (F -valor: $p \leq 0,01$)⁷¹ para cada una de las variables analizadas. Se observaron correlaciones significativas ($p \leq 0,01$) para el peso promedio del fruto en cáscara y el fruto entero o en grano, porcentaje de granos y resistencia a rotura de la cáscara. Se observó una correlación negativa significativa ($p \leq 0,01$) de la resistencia a rotura de la cáscara con respecto al porcentaje de granos. En algunos casos la resistencia de rotura de la cáscara fue independiente del porcentaje de grano lo cual sugiere que las diferencias en la composición de las variedades o la morfología de la cáscara afecta la resistencia a rotura de la cáscara. La caracterización de las variedades de cáscara de almendra ayudará a determinar los mejores usos como valor añadido para este tipo de subproducto agrícola, el cual es abundante.

2010

Chen, Paul⁷²; Cheng, Yanling⁷³; Deng, Shaobo⁷⁴; Lin, Xiangyang^{75 76}; Huang, Guangwei⁷⁷; Ruan, Roger^{78 79} ***“Utilization of almond residues”***. December, Vol. 3. Num. 4. Int. J. Agric. & Biol. Eng. 2010. 1-18.

La producción de almendra genera millones de toneladas de residuos, además de almendras. Los residuos de almendra, incluyendo las cáscaras, cortezas, poda, hojas, la piel y el núcleo comestible, son buenas materias primas para la producción de bioenergía y otros compuestos valiosos. En este artículo se revisa la investigación sobre la utilización de los residuos de almendra como materias primas energéticas y no energéticas. Se discuten las opciones técnicas para convertir los residuos de almendra

⁷⁰ ANOVA Analysis of variance.

⁷¹ F, factor estadístico que refleja el grado de parecido existente entre las medias que se están comparando.

⁷² Center for Biorefining, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 1390 Eckles Avenue, St. Paul, MN 55108, USA.

⁷³ Center for Biorefining, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 1390 Eckles Avenue, St. Paul, MN 55108, USA.

⁷⁴ Center for Biorefining, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 1390 Eckles Avenue, St. Paul, MN 55108, USA.

⁷⁵ Center for Biorefining, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 1390 Eckles Avenue, St. Paul, MN 55108, USA.

⁷⁶ College of Biological Science and Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China.

⁷⁷ Almond Board of California, Modesto, California, USA.

⁷⁸ Center for Biorefining, Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 1390 Eckles Avenue, St. Paul, MN 55108, USA.

⁷⁹ State Key Laboratory of Food Science and Technology, Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China.

en energía y otros productos de valor. Se examinan diferentes tecnologías de transformación comercial. Se recomienda ahondar en investigación y desarrollo.

Los investigadores determinan del estudio que los residuos de almendra son excelentes materias primas para la producción de energía y son productos con valor añadido. Consideran que dichos residuos almacenan una gran cantidad de energía que puede ser convertida a varias formas de energía utilizable a través de un número de procesos disponibles comercialmente como se muestran en dicho artículo. Sin embargo, consideran los investigadores que a partir de la información a la que han tenido acceso, no tienen conocimiento de cualquier operación de conversión a gran escala en los EE.UU.

La pirólisis es considerada la elección razonable para convertir los residuos de almendra en combustibles líquidos, en biochar⁸⁰ y en carbones activados. Las actuales tecnologías comerciales de pirólisis como la mayoría de los procesos de gasificación requieren energía de molienda intensiva con problemas a enfrentar por la presencia de alto contenido de ceniza en el bioaceite. Alta tecnología es deseable debido a la naturaleza y distribución de la producción de almendra.

Los residuos de almendra especialmente la piel y cortezas son ricas en productos fitoquímicos tales como antioxidantes. La extracción de los fitoquímicos de los residuos antes que éstos sean convertidos en energía representa una excelente oportunidad de negocio. Son necesarios nuevos procedimientos para convertir los residuos de almendra, especialmente la piel y cortezas a aditivos alimentarios ricos en fibras dietéticas y antioxidantes. Por tanto, los investigadores recomiendan enfocar el uso de los residuos de almendra hacia la biorrefinación, siendo esta un concepto derivado de la refinación de petróleo. Una biorrefinería emplea biomasa como materia prima en lugar de los recursos fósiles utilizados en una refinería de petróleo.

El objetivo de la biorrefinación es producir una amplia gama de productos tales como combustibles, materiales, productos químicos, etc., a partir de recursos biológicos, al igual que se hace a partir de recursos fósiles. Debido a que la biomasa no es una materia prima uniforme, varias plataformas de biorrefinería tales como plataformas biológicas y plataformas termoquímicas se han propuesto sobre la base única de emplear las características de las materias primas de biomasa que utilicen.

Una biorrefinería utiliza tecnologías de conversión y refino en las que puede ser incorporada la producción de biomasa como materia prima. La biorrefinería integrada es capaz de producir múltiples productos y por lo tanto múltiples fuentes de ingresos

⁸⁰ El biochar de origen vegetal o "PBC" (Plant based biochar) es un mejorador de suelos con alto contenido orgánico y de elevada micro y meso-porosidad, con una capacidades de retención de agua, nutrientes y fijación de Carbono atmosférico relativamente altas, pero sin apenas efecto fertilizante sobre el suelo.

El biochar de origen vegetal se produce a partir de biomasa vegetal con un tratamiento térmico reductor entre 450°C-550°C bajo condiciones de presión negativa con emisión atmosférica cero o próxima a cero.

El biochar de origen vegetal (PBC) es una enmienda orgánica-mejorador de suelo. El Biochar producido adecuadamente tiene la capacidad de restaurar el equilibrio natural del suelo y mejorar el rendimiento de los cultivos mediante una mejor retención de agua y nutrientes, lo que conlleva una mayor tolerancia a la sequía y un mayor rendimiento en la producción de cultivos por el aumento de la fertilidad del suelo.

de una sencilla materia prima de biomasa siendo económicamente más viable que con esquemas de producción de productos establecidos.

2011

Pirayesh, H.⁸¹; Khazaeian, A.⁸²; Khanjanzadehb, H.⁸³; Bahrinejad, A.⁸⁴. **"Optimum Condition of Manufacturing Wood-Based Composite from Mixture of Wood Particles/Walnut and Almond Shells"**. Key Engineering Materials. Vols. 471-472. pp. 91-96. Feb. 2011.

El objetivo de este estudio fue la fabricación de aglomerados a base de madera mediante el uso de partículas de esta y residuos agrícolas de cáscaras de nogal y almendra que no tienen valor económico siendo utilizados solamente como combustible de bajo grado y como forraje y la evaluación del desempeño de dicho aglomerado. Este estudio se realizó en dos fases: 1) determinación de la condición óptima de presión para la producción de aglomerados, cáscaras de nogal/almendra; 2) evaluar el efecto que pudiera producirse con diferentes proporciones de estos materiales (10 y 30%) y tamaño de cáscara ($\leq 0,7$ y ≥ 2 mm) en sus propiedades mecánicas (módulo de rotura y elasticidad y la unión interna) y físicas (hinchamiento y absorción de agua).

El resultado de la primera fase mostró que con compresiones entre 2,5 y 5 MPa, temperaturas de presión entre 150 y 180°C y tiempo de presión entre 5 y 10 minutos, las condiciones óptimas de presión para la producción de tableros aglomerados a partir de la mezcla de partículas de madera y cáscaras de nuez/almendra eran: compresión de 2,5 MPa, temperatura de presión de 180°C y tiempo de presión de 5 minutos. El resultado de la segunda fase del estudio no mostró diferencias significativas entre las propiedades mecánicas y físicas de los tableros de composite que contienen 10 por ciento de la cáscara de nuez y de almendra con referencia a uno patrón (tablero A). Además, el rango de tamaño de malla utilizado para la almendra y la nuez no aportó diferencias significativas.

2012

Pirayesh, H.⁸⁵; Khazaeian, A.⁸⁶ **"Using almond (*Prunus amygdalus L.*) shell as a bio-waste resource in wood based composite"**. Composites Part B: Engineering Volume 43. Issue 3. pp. 1475-1479. April 2012.

⁸¹ Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸² Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸³ Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸⁴ Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸⁵ Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸⁶ Dept. of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

La investigación se centró en valorar la idoneidad de la cáscara de almendra como un recurso biorresiduo en la fabricación de un composite a base de madera. Aglomerados conteniendo diferentes porciones de cáscara de almendra se hicieron utilizando resina de urea-formaldehído. Algunas propiedades químicas de la cáscara de almendra, mecánicas (módulo de rotura, de elasticidad y resistencia interna) y físicas (hinchamiento y absorción de agua) fueron determinadas en los aglomerados.

La adición de partículas a base de cáscara de almendra incrementó notablemente la resistencia al agua de los paneles. Sin embargo, propiedades de flexión y resistencia interna disminuyeron con el incremento de cáscara de almendra. Se llegó a la conclusión que la cantidad máxima de estas partículas en la mezcla debería ser de un 30% con el fin de encontrar valores estándares para obtener las requeridas propiedades mecánicas. Finalizan los investigadores afirmando que la cáscara de almendra, un residuo agrícola de producción anual, podría ser utilizado formando parte de una mezcla de partículas de madera en la producción de aglomerado.

2013

Pirayesh, H.⁸⁷; Khanjanzadehb, H.⁸⁸; Salarib, A.⁸⁹ ***“Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard”***. Composites Part B: Engineering Volume 45. Issue 1. pp. 858-863. February 2013.

En este estudio se investigó la disponibilidad de cáscaras de nogal/almendra como residuos agrícolas de carácter renovable que son infrautilizados, para la fabricación de paneles a base de madera. Aglomerados conteniendo diferentes proporciones de partículas a base de cáscaras de nogal/almendra (0%, 10%, 20%, 30% y 100%) fueron hechos utilizando una resina de urea-formaldehído. Algunas propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, de rotura y resistencia interna), físicas (hinchamiento y absorción de agua) y emisión de formaldehído de los tableros aglomerados fueron evaluadas.

La adición de partículas de nogal/almendra incrementó significativamente la resistencia al agua de los paneles y redujeron notablemente sus emisiones de formaldehído. Sin embargo, propiedades de flexión y resistencia interna disminuyeron con el incremento de contenido de cáscaras de nogal/almendra en los paneles. Estas pueden ser consideradas como materias primas alternativas o de relleno en la fabricación de aglomerados de madera utilizados en ambientes interiores debido a bajo espesor de hinchamiento, baja absorción de agua y baja emisión de formaldehído. Además, utilizando estos materiales infrautilizados en la industria forestal podrían disminuir la presión sobre los recursos forestales y algunas oportunidades de empleo podrían ser creadas.

⁸⁷ Dept.of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸⁸ Dept.of Wood and Paper Technology. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR). Iran.

⁸⁹ Dept.of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Essabir, H.⁹⁰; Nekhlaoui, S.⁹¹; Malha, M.⁹²; Bensalah, M.O.⁹³; Arrakhiz, F.Z.⁹⁴; Qaiss, A.⁹⁵; Bouhfid, R.⁹⁶ ***“Bio-composites based on polypropylene reinforced with Almond Shells particles: Mechanical and thermal properties”***. Materials & Design. Volume 51. pp. 225-230. October 2013.

En este trabajo las partículas de cáscaras de almendra son empleadas como refuerzo en una matriz termoplástica como el polipropileno. Los composites conteniendo partículas de cáscaras de almendra con o sin compatibilizador (anhídrido maleico⁹⁷ en polipropileno; tribloque de copolímeros con anhídrido maleico) para varios contenidos de partículas en porcentaje en peso (5, 10, 15, 20, 25, 30) fueron investigados a través del estudio de sus propiedades mecánicas, térmicas y reológicas.

Los resultados muestran un incremento claro en las propiedades mecánicas y reológicas del uso de partículas de cáscaras de almendra en la matriz sin y con el compatibilizador anhídrido maleico correspondiendo a una ganancia en el módulo de Young de 56,2% y 35% respectivamente, en una carga del 30% en peso de estas partículas. Los análisis térmicos revelaron que la incorporación de partículas en los composites dio como resultado un aumento en las temperaturas de la descomposición térmica inicial.

Chaudhary A.K.⁹⁸; Gope, P.⁹⁹; Singh, V.K.¹⁰⁰ ***“Effect of Almond Shell Particles on Tensile Property of Particleboard”***. Department of Production Engineering-Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology, Pantnagar-263 145, INDIA. J. Mater. Environ. Sci. 4 (1) (2013) 109-112.

El propósito de este estudio fue fabricar tableros de aglomerado usando cáscara de almendra. Esto podría ayudar a superar la escasez de materias primas a la que la industria de paneles se enfrenta hoy en día. Los tableros de aglomerado contienen diferentes proporciones de partículas de cáscara de almendra y se hicieron utilizando

⁹⁰ Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research (MAScIR), Institute of Nanomaterials and Nanotechnology (NANOTECH), Laboratory of Polymer Processing, Rabat, Morocco.

Laboratory Mechanics, Processes, Energy and Environment (LMPEE), National School of Applied Sciences, Agadir, Morocco.

⁹¹ Faculty of Science, Mohammed V-Agdal University, Laboratory of Mechanics and Materials, Rabat, Morocco.

⁹² Faculty of Science, Mohammed V-Agdal University, Laboratory of Mechanics and Materials, Rabat, Morocco.

⁹³ Faculty of Science, Mohammed V-Agdal University, Laboratory of Mechanics and Materials, Rabat, Morocco.

⁹⁴ Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research (MAScIR), Institute of Nanomaterials and Nanotechnology (NANOTECH), Laboratory of Polymer Processing, Rabat, Morocco.

⁹⁵ Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research (MAScIR), Institute of Nanomaterials and Nanotechnology (NANOTECH), Laboratory of Polymer Processing, Rabat, Morocco.

⁹⁶ Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research (MAScIR), Institute of Nanomaterials and Nanotechnology (NANOTECH), Laboratory of Polymer Processing, Rabat, Morocco.

⁹⁷ Compuesto orgánico con fórmula química $C_2H_2(CO)_2O$.

⁹⁸ Department of Production Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

⁹⁹ Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

¹⁰⁰ Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

resina epoxi. Las propiedades de tracción de los tableros de cáscara de almendra se determinaron en este trabajo de investigación

La adición de partículas de cáscara de almendra ve afectada en gran medida la resistencia a tracción de los paneles. La dureza es una propiedad muy importante para el tablero aglomerado. En la presente investigación el esfuerzo a tracción de los tableros aglomerados fabricados disminuyó con el aumento de las partículas de cáscara de almendra.

Este estudio investigó la idoneidad de las partículas de cáscara de almendra en la producción de tableros de aglomerado. La adición de partículas de cáscara de almendra influyó significativamente sobre las propiedades mecánicas del tablero. El módulo de elasticidad disminuye a medida que se incrementa el % en peso de partículas de almendra. Es mínimo para una concentración del 30% de las partículas de cáscara de almendra. La adición de partículas de almendra también disminuye la tensión de tracción máxima.

El uso de cáscara de almendra en la producción de tableros de aglomerado no sólo ahorra en uso de masa forestal sino que también deriva en diversos beneficios ambientales y socioeconómicos.

Martínez G. A.¹⁰¹; Alemany B. E.¹⁰² ***“New biodegradable and eco-friendly almond shell based masterbatches for traditional sectors”***. Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros. Nº. 679. pp. 306-310. 2013. Proyect: LIFE11 ENV/ES/000513¹⁰³. Mastalmond.

El Programa LIFE de la Unión Europea es el **único instrumento financiero de la Unión Europea dedicado, de forma exclusiva, al medio ambiente**. Su objetivo general para el período 2004-2020 es contribuir al desarrollo sostenible y al logro de los objetivos y metas de la Estrategia Europa 2020 y de las estrategias y planes pertinentes de la Unión en materia de medio ambiente y clima.

El proyecto Mastalmond, liderado por AIJU¹⁰⁴ participan las empresas INJUSA¹⁰⁵, IQAP¹⁰⁶ y PÉREZ CERDÁ Plastics¹⁰⁷. El objetivo del mismo es crear y validar a nivel preindustrial nuevos masterbatches¹⁰⁸ o concentrados de color basados en polímeros

¹⁰¹ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹⁰² AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹⁰³ EU's financial instrument supporting environmental, nature conservation and climate action projects throughout the EU. LIFE11 ENV/ES/000513. Proyectos españoles aprobados LIFE+ 2011 Política y Gobernanza Medioambiental. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

¹⁰⁴ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹⁰⁵ Empresa dedicada a la producción de artículos de juguete, siendo sus principales productos los vehículos eléctricos, correpasillos, triciclos y artículos de jardín.

¹⁰⁶ Empresa de formulación de concentrados de color (o masterbatches) dirigida a mercados especializados.

¹⁰⁷ Empresa dedicada a la inyección de plásticos siendo complementarios otros procesos productivos.

¹⁰⁸ Sistema de coloración y aditivación de polímeros mediante la dosificación de un concentrado de colorantes, pigmentos y/o aditivos dispersados en la matriz polimérica.

biodegradables, que contengan en su formulación un alto porcentaje de un residuo natural como la cáscara de almendra, de modo que pueda cubrir los requerimientos de dos sectores tradicionales; la industria del juguete y del auxiliar del mueble. En su desarrollo, se optimizarán a escala laboratorio las nuevas formulaciones de masterbatches con diferente proporción de cáscara de almendra triturada, se modificarán los sistemas convencionales de extrusión para facilitar el procesado a escala industrial, se obtendrán diferentes versiones de estos nuevos masterbatches a escala industrial para su incorporación a polímeros mediante inyección, se caracterizarán exhaustivamente y se fabricarán varios demostradores de ambos sectores. En la actualidad no existe ningún tipo de concentrado plástico que incorpore residuos naturales ni, en concreto, cáscara de almendra, como carga o refuerzo ni tampoco están muy extendidos aquéllos basados en plásticos biodegradables. Por ello, se pretende realizar paralelamente una amplia difusión de los resultados del proyecto. En su fin último, este proyecto aborda el problema ambiental relacionado con la mejora en la eficacia de uso de los recursos naturales por medio de la reutilización de la cáscara de almendra y el empleo de plásticos biodegradables.

Resultados previstos:

El proyecto tiene como objetivo demostrar el impacto reducido de los plásticos en el medio ambiente a través de:

1. Los nuevos procesos para el logro de masterbatches usando cáscara de almendra molida en altas concentraciones dentro de polímeros biodegradables;
2. Reutilización de residuos naturales / recurso renovable (520 toneladas / año en Europa);
3. Integración de pigmentos orgánicos e inorgánicos;
4. Demostraciones de las capacidades de fabricación de juguetes y muebles que incorporan polímeros biodegradables con moldeo por inyección;
5. Optimización de los procesos para cumplir con las especificaciones técnicas establecidas;
6. Mercado de captación de nuevos masterbatches ecológicos para impulsar sinergias en el uso de polímeros biodegradables (son esperadas cifras de 193 kilotoneladas en el corto plazo y 580 kilotoneladas en el largo plazo), y
7. Un nuevo mercado para un producto de residuos agrícolas (UE-27 tiene un 12'88% de la cuota mundial).

Lashgari, A.¹⁰⁹; Eshghi, A.¹¹⁰; Farsi, M.¹¹¹ ***"A study on some properties of polypropylene based nanocomposites made using almond shell flour and organoclay"***. Asian Journal of Chemistry. Vol. 25. No. 2. pp. 1043-1049. 2013.

En este estudio fueron evaluadas las propiedades resistentes de composites de polipropileno ante el efecto de añadir nanoarcilla en diferentes formulaciones (0; 2,5; 5 phr¹¹²) con contenidos de harina de cáscara de almendra (30, 35 y 40%). La cantidad de anhídrido maleico en polipropileno fue constante en 2 phr para todas las

¹⁰⁹ Dept. of Wood Science and Paper Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

¹¹⁰ Dept. of Wood Science and Paper Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

¹¹¹ Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Mazandaran, Iran.

¹¹² Abreviatura utilizada en las formulaciones para composites *"parts per hundred parts of resin"*.

formulaciones. Los componentes del composite fueron formados utilizando una extrusora rotativa de doble husillo y las muestras fueron hechas en una máquina de moldeo por inyección. Las propiedades mecánicas tales como resistencia a la extensión, flexión e impacto fueron medidas.

Los resultados revelaron el hecho que cuando la nanoarcilla y la harina de cáscara de almendra fueron añadidas, los módulos de flexión y extensión se incrementaron significativamente, pero tanto las resistencias a flexión y extensión decrecieron ligeramente. La resistencia al impacto estuvo por debajo del 8% con un 2,5 phr de nanoarcilla, pero con 5 phr la propiedad fue reducida al 19,6%. Con mayor incorporación, tanto de harina de cáscara de almendra como de nanoarcilla la resistencia al impacto de los composites decreció aún más.

2014

Khyati, T.¹¹³ ***"Fabrication and Analysis of Almond Shell Based Composite Material"***. Advance Research and Innovations in Mechanical, Material Science, Industrial Engineering and Management - ICARMMIEM-2014.

En este artículo se ha discutido el comportamiento mecánico del polvo de cáscara de almendra en un compuesto epoxy reforzado. Cuatro muestras diferentes, conteniendo almendra en proporciones 10; 15; 15,13 y 21,3% en peso, mezcladas con resina epoxy CY230¹¹⁴ fueron preparadas y sometidas a varios ensayos mecánicos, a saber: resistencia a la extensión, resistencia a compresión, resistencia a impacto, resistencia a flexión, resistencia a fractura y las propiedades mecánicas fueron comparadas con las propiedades de la madera.

En los resultados de la investigación se determinó:

1. La adición de partículas de almendra aumentó la resistencia a la tracción con un 15% en peso de almendra siendo de 37 MPa y luego fue disminuyendo en sucesivas adiciones de partículas de almendra. Esto fue comparable a la tensión máxima de rotura de la madera de pino (40 MPa), mármol (15 MPa) y también al esfuerzo de tracción axial de la madera de teca (2 MPa).
2. El porcentaje de elongación fue aumentando con la adición de partículas de almendra y luego decreció, muestra que contenían 15% mostraron porcentajes de elongación máxima de 21,96%.
3. La adición de partículas de almendra aumenta la resistencia máxima a compresión del composite, sin embargo, después de una concentración de almendra del 15% se observó una tendencia a la baja. Por lo tanto la resistencia a la compresión final fue máxima para una concentración de almendra del 15%, 119,73 MPa. Este valor fue muy alto en comparación con la resistencia a compresión de la madera (50 MPa), vidrio (50 MPa), hormigón (40 MPa), etc.

¹¹³ Dept. of Mechanical and Industrial Engineering. Indian Institute of Technology Roorkee, India.

¹¹⁴ Resina epoxy ampliamente utilizada en aplicaciones industriales debido a su alta resistencia y características mecánicas de adhesividad. También es buen disolvente y tiene buena resistencia química en un intervalo amplio de temperatura. Produce Huntsman Advanced Materials.

4. La dureza del composite relleno con almendra fue disminuyendo con el incremento del porcentaje en peso de almendra. El valor máximo obtenido fue de 57 MPa para una concentración de almendra del 10%.
5. La adición de partículas de almendra disminuye la capacidad de absorción de agua. Esta prueba fue necesaria para los composites que se utilizan en zonas afectadas de humedad.
6. La capacidad de absorción de agua fue alta para un porcentaje de cáscara de almendra del 10% en peso. Mientras que la capacidad de resistencia al agua fue buena para un 21,1% en porcentaje en peso de cáscara de almendra.

Nazerian, M.¹¹⁵; Dalirzadeh, A.¹¹⁶; Farrokhpayam, S.R.¹¹⁷ ***“Use of Almond Shell Powder in Modification of the Physical and Mechanical Properties of Medium Density Fiberboard”***. Bioresources 10 (1). pp. 169-181. 2014.

Este estudio evaluó los efectos del contenido de polvo de cáscara de almendra como material de carga, así como los producidos en las propiedades de un tablero de fibra de densidad media al variar los contenidos de parafina, temperatura y tiempo de presión. La metodología de superficie de respuesta (MSR)¹¹⁸ basada en un diseño de moldeo rotacional de quinto nivel y de cuatro variables fue aplicada para evaluar los efectos de variables independientes en el módulo de rotura, unión interna (UI) y espesor de hinchamiento (EH) de un tablero de fibras de densidad media.

El estudio mostró que la metodología de superficie de respuesta puede ser eficientemente aplicada en las propiedades de tablero de fibras modelado. Se encontró que el polvo de cáscara de almendra mantuvo la MSR, UI y el EH en niveles deseables, por encima del 10,6%, como un material de carga en la resina. Utilizando 1,7% de parafina como agente de encolado, una temperatura de 158°C y una duración de la presión de 6,43 min, tuvo lugar el mayor impacto en la mejora de las propiedades estudiadas del tablero de fibras de densidad media.

Chaudhary, A.K.¹¹⁹; Gope, P.C.¹²⁰; Singh, V.K.¹²¹; Verma, A.¹²²; Suman, A.R.¹²³ ***“Thermal analysis of epoxy based coconut fiber-almond shell particle reinforced***

¹¹⁵ Dept. of Wood and Paper Science and Technology. University of Zabol, Zabol, Iran.

¹¹⁶ Dept. of Wood and Paper Science and Technology. University of Zabol, Zabol, Iran.

¹¹⁷ Dept. of Wood and Paper Science and Technology. University of Zabol, Zabol, Iran.

¹¹⁸ Colección de técnicas de diseño experimental, métodos de regresión y optimización de procesos. La base está en encontrar niveles óptimos de un factor sobre una respuesta. Se hacen pocos experimentos y se enfoca la atención sobre los niveles donde la respuesta es óptima por lo que se considera una experimentación secuencial.

¹¹⁹ Department of Production Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

¹²⁰ Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology, Pantnagar-263 145, INDIA.

¹²¹ Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

¹²² Department of Vegetable Science. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology, Pantnagar-263 145, INDIA.

biocomposites". Advances in manufacturing science and technology. Vol. 38, No. 2, 2014. De Gruyter Open Ltd. Bogumila Zuga 32^a. 01-811 Warsaw / Poland.

En esta investigación se estudió la idoneidad de la cáscara de almendra y de la fibra de coco como residuos agrícolas renovables, para la fabricación de biocomposite para ser utilizado como un sustituto de la madera. El uso de residuos de la agricultura como refuerzo en material composite puede conllevar diversos beneficios ambientales y socioeconómicos.

El biocomposite se obtuvo con diferentes porcentajes en peso de partículas de cáscara de almendra (10, 20, 30, 40 y 50% en peso) y fibra de coco (2, 4 y 6% en peso). El mezclado se realizó con un 20% en peso de partículas de cáscara de almendra utilizando resina epoxi y 0,5% en peso de fosfato de tricresilo¹²⁴. Fueron realizados ensayos de estabilidad térmica y morfología (SEM)¹²⁵ del biocomposite.

De la investigación se obtuvo:

1. El tamaño de partícula de la cáscara de almendra varía entre los 1.020 a 1.253 μm . El biocomposite con partículas de cáscara de almendra falló cuando se retiraron las mismas. El diámetro de la fibra de coco varía entre 16.125 a 25.864 μm . El Fallo perpendicular o fallo de corte de la fibra indica que la resistencia de la unión interfacial es alta.
2. El aumento en la concentración de partículas de cáscara de almendra ha contribuido a una modificación marginal en la estabilidad térmica del biocomposite. La adición de fibra de coco ha contribuido al control marginal en la tasa de descomposición y en las partículas de cáscara de almendra reforzado con epoxi, aumentó en el biocomposite la estabilidad térmica en comparación con aquel que contenía partículas de cáscara de almendra sin estos elementos añadidos.

2015

Martínez García, A.¹²⁶; Ibáñez García, A.¹²⁷; León Cabezas, M. A.¹²⁸; Sánchez Reche, A.¹²⁹ ***"Study of the influence of the almond variety in the properties of injected parts with biodegradable almond shell based masterbatches"***. Waste and Biomass Valor. Volume 6, Issue 3, pp 363-370. June 2015.

¹²³ Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology. Pantnagar-263 145, INDIA.

¹²⁴ El triortocresilfosfato también denominado TOCP, fosfato de tri-o-cresilo, es un compuesto organofosforado que se utiliza como plastificante y en otras diversas aplicaciones.

¹²⁵ SEM (Scanning Electron Microscope) Microscopia Electrónica de Barrido.

¹²⁶ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹²⁷ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹²⁸ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

¹²⁹ AIJU Instituto Tecnológico de producto infantil y ocio. Ibi, Alicante, España.

Este artículo se centra en el desarrollo de una serie de masterbatches biodegradables y ecológicos a base de ácido poliláctico (PLA)¹³⁰ rellenos con cáscara de almendra de diferentes variedades para estudiar la influencia de la variedad de almendra en las propiedades de las partes biodegradables inyectadas. Estos innovadores masterbatches tienen 20% en peso de cáscara de almendra. Estos masterbatches han sido añadidos en un 4% al PLA para estudiar las propiedades mecánicas de las muestras inyectadas. Este estudio es parte de un LIFE11ENV/ES/000513 Project¹³¹, dirigido a crear y ensayar a nivel preindustrial nuevos masterbatches de color basados en plásticos biodegradables conteniendo en su formulación un alto porcentaje de cáscara de almendra, un residuo natural que permitirá en primer lugar cubrir los requerimientos técnicos de dos sectores industriales tradicionales: juguetes y muebles, aunque los resultados obtenidos podrían extenderse a otros sectores industriales.

Este estudio mostró que la descomposición térmica de cáscara de almendra se produce en varias etapas en función de sus componentes principales, hemicelulosas, lignina y celulosa y no depende de la variedad de almendra. Los espectros de infrarrojos de las diferentes variedades no difieren significativamente. La tracción y resistencia a la flexión y dureza Shore¹³² no presentan diferencias significativas entre las diversas variedades, la mezcla o el PLA tal como se recibió.

A partir de estos resultados se concluyó que la opción más recomendada es trabajar con la mezcla de variedades de cáscara de almendra, ya que presenta propiedades mecánicas ligeramente mejores que los otros tipos cáscara de almendra por separado. Por otra parte este se distribuye en la cadena de suministro como una mezcla de ellos, por lo que resulta más fácil y barato de adquirir.

¹³⁰ El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino.

¹³¹ EU's financial instrument supporting environmental, nature conservation and climate action projects throughout the EU. Proyectos españoles aprobados LIFE+ 2011 Política y Gobernanza Medioambiental. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

¹³² Método basado en las medidas de las velocidades de impulsión y rebote de un cuerpo móvil impulsado por un resorte contra la superficie del material metálico a ensayar.

En cuanto a artículos en prensa del uso de la cáscara de almendra:

Viernes, 13 de enero de 2006

Fuente: <http://www.elmundo.es/universidad/2006/01/13/tecnologia/1137173782.html>

ELMUNDO.ES | elmundouniversidad | tecnología

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

***La UPV desarrolla un material plástico no contaminante
con cáscaras de almendras***

VALENCIA.- Investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) han desarrollado, a partir de cáscara molida de almendra, un nuevo material plástico no contaminante que permite obtener piezas huecas y de gran flexibilidad. El material resultante puede ser utilizado como alternativa a la madera en la fabricación de juguetes, accesorios para muebles.

El método por el que se fabrica este material ha sido diseñado por investigadores de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy, que han utilizado técnicas de moldeo rotacional o rotomoldeo¹³³ para centrifugar un polvo fino termoplástico dentro de un molde cerrado, por el que se obtienen piezas huecas y de gran flexibilidad. La cáscara de almendra molida proporciona al producto final un aspecto similar al de la madera en color y textura.

Este proceso se utiliza, por ejemplo, en la fabricación de muñecas y balones, pero también en la producción de contenedores, kayak, adornos, accesorios para muebles como tiradores y piezas ornamentales, según el profesor José Enrique Crespo.

Para obtener este nuevo material alternativo a la madera, se mezcla PVC en polvo con un plastificante no tóxico y biodegradable, que dan lugar a una pasta viscosa llamada plastisol¹³⁴, a la que se añade cáscara de almendra molida, formando una masa que es la que se somete al proceso del rotomoldeo.

Aditivo no contaminante.

La utilización de la cáscara de almendra conlleva un beneficio medioambiental, ya que favorece el reciclado de este residuo y se trata de un aditivo natural y no contaminante, al contrario de lo que sucede con los plastificantes, colorantes o estabilizantes al calor empleados actualmente en la obtención de piezas de geometría hueca, que no se pueden realizar mediante otras técnicas.

Entre las aplicaciones de estos materiales destaca el sector juguetero, uno de los principales motores de la economía alicantina, cuya producción se basa en gran medida en la utilización de PVC plastificados. Según Crespo, la adición de la cáscara de almendra permitirá aumentar la competitividad del sector juguetero, ya que permite fabricar piezas complejas con un coste económico pequeño. Además del sector juguetero, el material desarrollado puede aplicarse también en otros sectores como el mueble y el automóvil. En el caso del mueble, permitiría obtener piezas de plástico similares al aglomerado, pero con una estética más atractiva y un coste menor, y en el sector automovilístico podría aplicarse en la producción de piezas auxiliares y de interiores, como asideros y diversos componentes del salpicadero.

¹³³ El moldeo rotacional o rotomoldeo es una técnica de procesamiento de polímeros que permite obtener piezas huecas de tamaño mediano a muy grande con relativamente poco material y buena estabilidad.

¹³⁴ Suspensión de partículas de PVC en un plastificante, fluye como un líquido y se puede verter en un molde calentado. Cuando se calienta a unos 177°C, el plástico y el plastificante se disuelven mutuamente. Al enfriar el molde por debajo de 60°C, se consigue un producto flexible, permanentemente plastificado.

Actualizado viernes 11/04/2008

<http://www.elmundo.es/elmundo/2008/04/10/ciencia/1207839171.html>

ELMUNDO.ES | AGENCIAS

PROYECTO DE AIJU Y CAJA MEDITERRÁNEO

Crean juguetes biodegradables hechos con cáscara de almendra

MADRID.- El Instituto Tecnológico del Juguete (AIJU), en colaboración con Obras Sociales de Caja Mediterráneo (CAM), ha desarrollado un innovador proyecto que incorpora cáscara de almendra al material plástico para la fabricación de juguetes.

Los responsables del área de investigación de AIJU resaltan que este proyecto ofrece la posibilidad de mezclar y procesar, por métodos convencionales, compuestos de plásticos (como polietileno y poliestireno) con cáscara de almendra en proporciones de hasta un 45% en peso.

Estos refuerzos naturales aseguran la posibilidad de reciclaje de los juguetes, ya que se descomponen fácilmente sin presentar ningún tipo de residuo tóxico y pueden ser eliminados por procesos de biodegradación. Asimismo, esta propiedad permite una mejor disposición y aprovechamiento de las piezas elaboradas con estos materiales una vez terminado su ciclo de vida.

"La incorporación de cáscaras de almendra, un recurso natural renovable, a formulaciones de materiales plásticos puede contribuir a mejorar los problemas medioambientales", señala el informe elaborado por los expertos de AIJU, y añade que esto "permite abaratar el coste del producto final" ya que el precio de la cáscara de almendra es mucho menor que el de los compuestos plásticos.

El aspecto final de los juguetes resulta bastante similar al de la madera, con la ventaja de que, a diferencia de ésta, los materiales compuestos de almendra se pueden transformar como plásticos. Esto le da una flexibilidad de diseño y una rapidez importante en la fabricación, no teniendo que modificar las empresas sus líneas de producción ni los materiales que hasta ahora emplean.

La idea, que forma parte del convenio suscrito entre AIJU y CAM para el impulso de la I+D+i en las empresas de la Comunidad Valenciana, busca aumentar las características biodegradables de los artículos fabricados y a la vez proporcionar nuevos usos a residuos naturales producidos en cultivos mediterráneos.

Capítulo 1

GENERALIDADES

Capítulo 1. GENERALIDADES

Para la fabricación de morteros y hormigones son empleados diferentes materiales, entre los que se encuentran: los conglomerantes (cales, cementos), áridos (naturales, artificiales, reciclados), aditivos (aireantes, hidrofugantes, plastificantes, retenedores de agua, retardantes, resinas), adiciones y agua. En el presente capítulo se hace una descripción general de cada uno de ellos cuyo conocimiento permite establecer su posterior caracterización en el contexto de la campaña experimental. Entre los materiales que constituyen parte de la fabricación de estos elementos se encuentra la incorporación de los ROCA, por lo que estos también son descritos.

1.1 RESIDUOS ORGÁNICOS (ROCA)

El almendro (*Prunus dulcis*) es una especie mediterránea, condicionada por este tipo de clima. Esa es la razón de que su cultivo se encuentre localizado en la cuenca mediterránea, Oriente Medio y California, surgiendo en los últimos años Australia, lugares donde se cultiva casi la totalidad de la producción mundial. También hay pequeñas producciones en Sudamérica. La especie es originaria de las zonas montañosas de Asia Occidental y Central (Azerbaiján, Turkestán, Uzbekistán, Afganistán, etc.), de porte generalmente erguido, aunque algunas variedades son más o menos llorosas o abiertas. Su tronco es corto, no muy vigoroso, al igual que sus ramas. El fruto es una drupa oval, siendo el pericarpio la parte exterior del mismo, formada por el exocarpio o epicarpio, que es la epidermis exterior vellosa, el mesocarpio, que es la pulpa o corteza, es decir la parte que una vez seca abre completamente en la maduración del fruto y el **endocarpio o cáscara**, generalmente muy lignificada¹ en las variedades españolas, no ocurriendo lo mismo en otros grupos de variedades como las californianas.

¹ La lignina es uno de los biopolímeros más abundantes en las plantas y junto con la celulosa y la hemicelulosa conforma la pared celular de las mismas en una disposición regulada a nivel nano-estructural, dando como resultado redes de lignina-hidratos de carbono. La composición o distribución de los tres componentes en esas redes varía dependiendo del tipo de planta. En el caso de la composición de la madera, los rangos más comúnmente encontrados son: Celulosa: 38-50%; Hemicelulosa: 23-32% y Lignina: 15-25% (Sustainable Forestry for Bioenergy & Bio-based Products, 2007).

La cáscara generalmente forma una capa única, aunque un pequeño número de variedades presenta una capa exterior que se separa claramente de otra interior. (Muncharaz, P. M., 2004).

El tamaño, forma y consistencia del endocarpio (cáscara) son características que diferencian claramente a determinadas variedades. Así la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV)², diferencia 4 tipos: 1 (redondo), 2 (acorazonado), 3 (elíptico) y 4 (alargada) y además se puede añadir la forma amigdalóide.

Fig. 1.1 Esquema del fruto del almendro

La parte interior es una semilla, con dos cotiledones, de la que a su vez podemos diferenciar el grano, formado por embrión, endosperma y nucela y el tegumento exterior, también llamado piel o pellicelo (Fig. 1.1). Respecto al peso del fruto descortezado, está en función del tipo de cáscara que determina el rendimiento al descascarado de la variedad. En el momento de la madurez el fruto tiene un peso cercano a los 20 g, que se distribuye de la siguiente forma: corteza (50% en peso), cáscara (35-40% en peso), semilla (10-15% en peso).

² La Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV) es una organización intergubernamental con sede en Ginebra (Suiza), creada por el Convenio Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales. La misión de la UPOV es proporcionar y fomentar un sistema eficaz para la protección de las variedades vegetales, con miras al desarrollo de nuevas variedades vegetales para beneficio de la sociedad.

Las variedades en cáscara se comercializan en España en función de la dureza de su cáscara, como:

- Mollares: variedades de cáscara muy blanda que se pueden romper fácilmente.
- Fitas: Variedades de cáscara semidura o semimollar.
- Duras: Variedades de cáscara muy consistente, que únicamente se pueden romper con algún instrumento u objeto contundente.

Se denomina rendimiento al descascarado, al porcentaje o relación existente entre el peso total del fruto en cáscara y el fruto entero o en grano. Es un índice que proporciona el contenido o peso real del grano en las cosechas (Muncharaz, P. M., 2004).

El rendimiento al descascarado es inversamente proporcional a la dureza de la cáscara, de manera que el rendimiento es mayor cuanto menor es su dureza (Tabla 1.1). Esto es lógico ya que la dureza es proporcional a la densidad de la cáscara. La dureza de la cáscara es una característica varietal, aunque no todos los años se producen las mismas durezas de la cáscara, ya que hay ligeras variaciones con el estado del árbol, climatología y forma de cultivo. La industria americana está basada en variedades de cáscara muy blanda, que aunque aportan grandes rendimientos en pepita.

Tabla 1.1 Clasificación técnica de dureza. Escala USA
Fuente: Muncharaz Pou, M. El Almendro. Manual Técnico. Ediciones Mundi-Prensa. pp. 414. Barcelona. 2004.

Tipo de cáscara		Rendimiento al Descascarado (%)	Ejemplo
España	EE.UU.		
Muy dura	Stone Shell	< 25	Marcona
Dura	Hard Shell	25-35	Cristomorfo
Semidura	Semihard	35-45	Ferragnés
Semimollar	Soft	45-55	Morskoy
Mollar	Paper	> 55	Nonpareil

La producción mundial de almendras se origina fundamentalmente en el estado norteamericano de California y en los países de la cuenca mediterránea, pudiéndose dividir las zonas productoras en tres grandes áreas:

- **Centros primarios de expansión:** Corresponden a las zonas originarias de la especie y a aquellas próximas a ellas (Afganistán, Irán, Turquía, repúblicas situadas al sur de la antigua URSS). Son cultivos muy antiguos y primitivos, con gran variedad y diversidad de caracteres. Hay muchas especies silvestres y apenas existe cultivo regular.
- **Centros secundarios de expansión:** Reciben el almendro de las zonas originarias (países de la cuenca mediterránea) siendo zonas antiguas de cultivo que no presentan variabilidad tan acusada por haberse realizado determinada selección humana. Son zonas donde conviven las plantaciones antiguas, que son predominantes, con explotaciones modernas. El cultivo se realiza en la forma tradicional. España estaría en este grupo.
- **Centros terciarios de expansión:** Engloba las nuevas zonas de producción con variedades seleccionadas, en muchos casos, obtenidas de centros de selección. Países como Chile, Sudáfrica y Australia, estarían englobados en el grupo. Son zonas de cultivo moderno y muy tecnificado.

La producción mundial de almendra en grano ha venido situándose en las dos últimas décadas entre las 426.000 (1990) y 1.047.000 (2013)³ toneladas de producto (Tabla 1.2). Tomando como referencia las estadísticas más recientes, se concluye que la producción mundial del cultivo está liderada por Estados Unidos, concretamente por el estado de California donde se concentra dicha producción y en el que se pone en práctica el nuevo modelo de cultivo del fruto seco, basado en explotaciones intensivas y siempre de regadío. La superficie dedicada al almendro en California se ha incrementado un 50% en los últimos años, hasta alcanzar las 350.000 hectáreas. Gracias a esa expansión, la gran mayoría de las almendras que se consumen en el mundo se producen en Estados Unidos: 855.000 toneladas según datos estimados en

³ Fuente: Almond Insights 2013-14. ALMOND BOARD OF AUSTRALIA

la última cosecha de 2013, casi el 82% del total, según el Instituto de Cultivadores de Almendra de California. Australia, que está en pleno proceso de adopción del modelo estadounidense, se ha convertido en pocos años en el segundo productor mundial, superando a España, quien ocupa el tercer lugar.

Tabla. 1.2 Producción mundial de almendra en grano (t). Fuente: Almond Insights 2013-14, ALMOND BOARD OF AUSTRALIA

COSECHA MUNDIAL DE ALMENDRA EN GRANO (t)													
AÑO	AUSTRALIA	CHILE	CHINA	ESPAÑA	EE.UU.	GRECIA	INDIA	ITALIA	TURQUÍA	MUNDO	EE.UU. %	AUSTRALIA %	ESPAÑA %
1990	2.408			62.505	221.579	15.513		19.006	15.014	425.910	52,00	0,6	14,7
1991	3.022			64.501	297.647	11.022		11.022	15.286	352.157	84,5	0,9	18,3
1992	3.559			71.895	220.400	16.012		18.008	15.694	397.955	55,4	0,9	18,1
1993	4.139			84.005	247.616	20.003		15.014	16.012	382.951	64,7	1,1	21,9
1994	4.592			70.261	221.489	16.012		14.016	15.694	455.097	48,7	1,0	15,4
1995	5.083			45.314	332.347	16.000		15.014	13.698	462.497	71,9	1,1	9,8
1996	5.470			60.010	166.332	13.000		5.987	14.288	273.631	60,8	2,0	21,9
1997	5.783			74.979	230.198	12.500		11.022	11.022	320.132	71,9	1,8	23,4
1998	6.104			29.982	343.142	11.000		8.981	12.020	458.277	74,9	1,3	6,5
1999	6.390			65.998	234.507	4.000		17.010	14.016	295.839	79,3	2,2	22,3
2000	8.558			52.980	376.436	14.500		9.979	15.513	491.709	76,6	1,7	10,8
2001	9.142	4.000		57.017	316.788	9.000	1.000	18.008	14.016	414.380	76,4	2,2	13,8
2002	9.541	6.000		65.998	373.805	17.200	1.100	8.981	14.016	476.272	78,5	2,0	13,9
2003	10.237	4.500		43.998	491.558	9.000	1.000	4.990	13.700	528.242	93,1	1,9	8,3
2004	11.742	7.500	100	26.172	468.515	5.000	1.100	12.020	12.300	504.000	93,0	2,3	5,2
2005	16.431	4.200	1000	63.503	452.685	16.000	1.150	12.020	13.700	592.650	76,4	2,8	10,7
2006	16.000	6.900	200	82.554	413.540	12.000	1.200	5.987	14.400	682.749	60,6	2,3	12,1
2007	26.881	8.800	1.300	56.880	506.526	12.000	1.000	12.020	15.500	796.021	63,6	3,4	7,1
2008	26.005	8.000	400	54.567	627.318	12.000	1.200	12.020	16.000	910.477	68,9	2,9	6,0
2009	36.403	6.000	1.000	85.502	732.370	8.000	1.100	5.987	16.000	854.400	85,7	4,3	10,0
2010	39.080	9.000	2.500	35.000	637.705	8.000	1.200	6.000	14.000	920.163	69,3	4,2	3,8
2011	37.626	10.000	4.000	60.000	738.539	8.000	1.100	12.000	16.000	1.132.666	65,2	3,3	5,3
2012	49.585	11.000	5.000	54.431	916.392	8.000	1.133	9.072	17.000	1.144.500	86,1	4,7	4,8
2013	73.361	9.300	6.000	54.431	854.568	5.000	1.100	9.072	18.000	1.046.455	81,7	7,0	5,2

Otros cuatro países como Turquía, Italia, Grecia y Chile, proporcionan en torno al 1% de promedio del producto total. El resto de la producción que supone un 7% del total, procede de numerosos países, entre los que destacan China, India, Marruecos, Túnez, Portugal, Francia, etc. (Fig. 1.2). Las producciones medias estimadas (ya que las estadísticas de algunos países son muy dudosas) de los principales países productores queda reflejada en la Tabla 1.2.

Fig. 1.2 Producción mundial de almendra. Fuente: Almond Board of California. Almond Almanac 2014

Fig. 1.3 Evolución de la producción nacional de almendra.
Fuente: Almond Board of California. Almond Almanac 2014

La producción anual española de producto en grano oscila entre 26 y 85.000 toneladas, con unas cantidades medias de 50.000 toneladas (Fig. 1.3). El cultivo de almendra en España está implantado en una superficie superior a las 530.223 hectáreas, representado el 84% de toda la superficie de frutos de cáscara (Fig. 1.4).

Fig. 1.4 Zonas de distribución de plantaciones regulares de almendra en España.
Fuente: <http://www.descalmendra.com/es/almendra-zonas-produccion.aspx>

Los datos obtenidos del COAG⁴ para el periodo comprendido 2005-2014 con una producción total de almendra en grano de 441.940 toneladas reflejan que la primera Comunidad Autónoma productora es Andalucía con 105.990 toneladas (23,98%) y 110.045 hectáreas de almendros de las cuales 13.000 toneladas de almendra son en grano en 2014 (39.736 t con cáscara), lo que representa el 26,42% de la producción nacional, siendo Granada la principal provincia productora con aproximadamente 73.481 hectáreas (23.735 t con cáscara)⁵. Le sigue Aragón con 87.892 toneladas (19,89%), Murcia con 73.512 (16,63%), Valencia con 56.048 (12,68%), Castilla-La Mancha con 46.195 (10,45%), Cataluña con 40.484 (9,16%), Baleares con 18.461 (4,18%), La Rioja con 6.385 (1,44%) y Navarra con 2.626 (0,59%) (Tabla 1.3) (Figs. 1.5 y 1.6).

⁴ COAG Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos. <http://www.coag.org/>

⁵ Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural.

Tabla 1.3 Histórico de producciones de almendra en grano en España (t). Fuente: <http://www.coag.org/>

CC.AA.	HISTÓRICO DE PRODUCCIONES DE ALMENDRA EN GRANO EN ESPAÑA (t)												Previsión 2015
	Media 2005/2014	Media 2010/2014	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Andalucía	10.599	10.960	12.000	14.600	7.300	5.440	11.850	7.000	9.800	12.000	13.000	13.000	13.000
Aragón	8.789	11.058	6.700	6.700	5.700	5.116	8.386	8.208	9.497	9.189	12.800	15.596	12.848
Baleares	1.846	1.696	2.000	2.400	2.500	2.200	880	1.600	1.975	2.150	1.378	1.378	1.516
C. La Mancha	4.620	5.109	3.245	4.500	1.700	3.206	8.000	3.600	4.501	4.545	7.192	5.706	7.662
Cataluña	4.048	4.071	3.693	4.955	3.413	3.071	4.999	4.023	4.365	3.571	4.206	4.188	3.534
La Rioja	639	867	423	450	180	390	606	920	900	700	908	908	1.000
Murcia	7.351	5.864	8.300	11.500	6.900	6.289	11.202	6.050	8.698	7.900	3.128	3.545	5.848
Navarra	263	281	185	210	200	228	400	345	380	288	185	205	215
Valencia	5.605	4.714	6.400	8.900	6.010	4.450	6.720	5.525	4.543	5.100	4.200	4.200	5.500
Resto	435	563	225	250	225	280	550	550	600	660	520	487	520
TOTALES	44.194	45.183	43.171	54.465	34.128	30.670	53.593	37.821	45.259	46.103	47.517	49.213	51.643

Fig. 1.5 Histórico de producciones de almendra en grano en España (t). Fuente: <http://www.coag.org/>

Fig. 1.6 Distribución media nacional de la producción de almendra en grano en %, periodo 2005-2014
Fuente: <http://www.coag.org/>

El proceso de transformación al que se somete a la almendra recolectada pasa por las siguientes fases en la industria española: (Muncharaz, P. M., 2004)

1. Recepción, peso y almacenamiento.
2. Lavado o mojado.
3. Descascarado y, en su caso, acondicionamiento de la cáscara.
4. Secado.
5. Selección, calibrado y eliminación de destríos.
6. Repelado.
7. Elaboración de industrializados.
8. Conservación del producto.
9. Envasado, etiquetado y expedición del producto.

El descortezado o despellejado de frutos se realiza por los agricultores en la cuenca mediterránea, pero no en California, donde está incorporado en un proceso industrial. Esta operación consiste en separar completamente el mesocarpio, dejando libre la superficie de la cáscara o endocarpio. Debe realizarse inmediatamente después de la recolección para que pueda realizarse con facilidad. Con el descortezado se facilita el posterior secado del fruto y un mejor aspecto externo. Desde hace tiempo se realiza de forma mecanizada en casi todas las explotaciones españolas.

Es un proceso sencillo, gracias a la eficacia y economía de la maquinaria existente. Su uso está ampliamente generalizado. Sin embargo, en algunas variedades de cáscara blanda se pueden presentar problemas de roturas de cáscara. El rendimiento de esta maquinaria oscila entre los 200 y 1.500 kg de almendra descortezada por hora.

Tradicionalmente, los frutos se han secado en la propia explotación, en almacenes, patios, etc., sometiendo al fruto a un secado natural. Se realiza para evitar el enmohecimiento y ennegrecimiento del fruto. Por otra parte, es una imposición de la industria, que no permite la entrada de partidas a los lugares de procesado con una humedad superior al 6,5% si es almendra del año, o del 6% si es almendra vieja (TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. – TRAGSATEC, 2011).

Esta operación facilita la conservación de la cosecha, que en el caso de variedades de cáscara dura, y en condiciones adecuadas, puede mantener el fruto en buen estado

durante 2 o 3 años. Una alternativa al secado natural es el secado artificial o forzado, tal como se puede realizar en el proceso industrial.

Por tanto los dos grandes procesos que comprende la industrialización son el descascarado y el repelado. El primero consiste en retirar la cáscara y el segundo en quitar el tegumento externo del grano. La industria de primera transformación (descascarado) está repartida por toda la zona productora y ubicada frecuentemente en pequeños núcleos rurales. Existen aproximadamente 122 industrias descascaradoras de almendra distribuidas en 20 provincias dedicadas a esa actividad (Fig. 1.7).

Fig. 1.7 Mapa de concentración de la industria descascaradora de frutos secos (provincial)

Fuente: AEOFRUSE⁶ y CCAE⁷. Frutos de cáscara y algarroba: un sector amenazado.

Documento de reflexión. pp. 92. Andalucía. Marzo 1999.

⁶ AEOFRUSE (Asociación Española de Organizaciones de Productores de Frutos Secos y Algarrobos).

⁷ CAAE (Asociación Comité Andaluz de Agricultura Ecológica).

En las líneas de descascarado se consigue partir y separar la cáscara y dejar libre el grano con su tegumento. Esta operación tiene que estar muy bien desarrollada, pues de lo contrario se rompería mucho grano. Se puede partir la almendra por varios sistemas. En las variedades de cáscara dura se utiliza preferentemente el sistema de martillos. Se debe calibrar la maquinaria de conformidad con las características de la cáscara de la variedad que se industrializa. Mientras más almendra entera salga de esta operación, mejor realizada está.

En la maquinaria utilizada en España, se pueden presentar problemas con partidas con cáscara semimollar o con cáscara doble, especialmente si va mezclada con almendra de cáscara dura o muy dura. De esta línea tiene que salir la cáscara como subproducto y almendras enteras y partidas como producto comercial. La cáscara de almendra se puede procesar para un mejor aprovechamiento, y si es que no se va a utilizar en la propia industria. En ese caso, se muele la cáscara mediante un molino triturador. Tras distintos procesos intermedios finalmente el producto obtenido se envasa en sacos para una mejor expedición al exterior. En muchas industrias sale la cáscara sin triturar. El proceso industrial que se sigue en el descascarado de la almendra es el siguiente:

La almendra en cáscara se rompe mediante la utilización de máquinas partidoras, se clasifica mediante distribuidoras por tamaños del grano, se separa el grano de la cáscara por cribado y posterior ventado, mediante las llamadas separadoras, compuestas por cribas de diferentes tamaños y ciclones de aire. El grano que todavía lleva cáscara mezclada, es enviado a máquinas electrónicas para su separación óptica, quedando libres de materias extrañas o cáscaras.

El grano obtenido es almacenado en silos especiales secadores de aire caliente para obtener la humedad adecuada. Una vez seco este grano pasa por cintas transportadoras, a un nuevo control ocular por personal especializado. Durante esta fase se elimina definitivamente cualquier impureza o cáscara. La cáscara, ya limpia de grano, se envía al almacén de cáscara de almendras para su comercialización como

subproducto. En la fig. 1.8 se muestra el diagrama de proceso seguido en la planta de tratamiento⁸.

Fig. 1.8 Diagrama del proceso industrial de la almendra

⁸ Fotos de la planta de tratamiento de la empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A. Empresa suministradora de la cáscara de almendra para desarrollar el presente proyecto de investigación.

Recepción, pesaje y toma de muestras del lote

Una vez que entra una partida en la industria, debe recogerse toda la información referente a su origen y las características del producto. Para ello se realiza un “escandallo”, o determinación de los rendimientos y otras características de la partida entregada. Al menos se realizan 2 muestras de $\frac{1}{2}$ kg cada una, siendo lo más normal hacerlo a la salida del camión antes de entrar en la tolva (Fig. 1.9).

Fig. 1.9 Recepción, pesaje y toma de muestras.
Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Prelimpia

Antes de pasar a los silos y cadena de lavado o sinfín mojador se separan las piedras, palos, o similares (Fig. 1.10).

Fig. 1.10 Prelimpia. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Silos de almacenamiento

Una vez realizada la entrega se pesa y se deposita el producto en unos silos de almacenamiento, clasificado por variedades (Fig. 1.11).

Fig. 1.11 Silos de almacenamiento. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Mojado y acondicionamiento

Desde los silos, la almendra sale hacia una cadena de lavado o sinfín mojado, donde se retiran la tierra, polvo, frutos vacíos, pellejos y hojas. En algunos procesos industriales, la almendra puede pasar directamente a un silo de mojado, con la finalidad de limpiar el producto de partículas finas como el polvo (Fig. 1.12).

Fig. 1.12 Cadena de lavado.
Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Calibrador rompedor. Separador

Consiste en partir y separar la cáscara y liberar el grano con su tegumento (descascarado). Debe realizarse con cuidado para evitar roturas excesivas del grano. Son varios los sistemas existentes, siendo en las variedades de cáscara dura muy empleado el sistema de martillos. La maquinaria debe estar calibrada específicamente para la variedad que se descascara, pues de lo contrario, el porcentaje de almendras rotas puede aumentar considerablemente, disminuyendo el valor económico de los lotes. En la maquinaria utilizada en España, puede haber problemas en las variedades de cáscara más blanda, especialmente si va mezclada con variedades de cáscara dura. En este proceso, se obtiene como producto comercial la almendra entera o partida y como subproducto, la cáscara (Fig. 1.13).

Fig. 1.13. Calibrador rompedor. Separador.
Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Calibración electrónica. Secado

El grano procedente del descascarado se somete a un adecuado secado mediante secaderos de aire caliente. El grano seco se pesa antes del comienzo de la siguiente etapa. El calibrado consiste en la selección de la almendra según tamaños. Para ello se tiene en cuenta la longitud y la anchura de la misma. La calibración se realiza con unas cribas, atendiendo al diámetro de la semilla. Igualmente, en este proceso se realiza la eliminación de los destríos o almendras que no cumplen las características requeridas. La calibración se puede realizar con sistemas de selección electrónica, para la separación de cáscara/grano o para la separación de trozos/enteras (Fig. 1.14).

Fig. 1.14 Calibración electrónica. Secado.
Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Envasado y etiquetado

Esta fase pone fin al proceso, en el caso que sólo se pretenda obtener producto en grano. En este caso se procedería al envasado y etiquetado previo al almacenamiento (Fig. 1.15).

Fig. 1.15 Envasado y etiquetado.
Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Conservación

La conservación, cualquiera que sea su forma, debe realizarse en cámaras de refrigeración, utilizando entre 0^o y 5^oC, e incluso llegar a 7^o u 8^oC. La humedad ambiental se debe mantener a unos niveles del 65%. La posibilidad de conservación del producto sin cáscara se puede prolongar casi a los dos años y está en función de las temperaturas de almacenamiento (a menor temperatura, mayor tiempo de conservación). El deterioro de la calidad se debe fundamentalmente a la oxidación de los lípidos, que conduce a rancidez, enmohecimiento o insectación (Fig. 1.16).

Fig. 1.16 Conservación.

Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Apilado de la cáscara (Fig. 1.17).

Fig. 1.17 Apilado de la cáscara.

Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.

Tradicionalmente, en las estadísticas realizadas por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), antiguo MARM⁹, el coeficiente medio de rendimiento al descascarado que se viene aplicando a las variedades españolas ha sido de 3,3 (kg de almendra en cáscara/kg de grano), mientras que a las variedades americanas les aplica el coeficiente de 1,7. Sin embargo, el cambio varietal que se ha producido en los últimos años en el cultivo del almendro, hacia variedades de floración tardía y con mayor rendimiento en grano, sugiere una revisión de este coeficiente de transformación de las variedades cultivadas en España, pudiendo alcanzar máximos de 4,49 en plantaciones de secano y de 4,60 en plantaciones de regadío. El número de variedades presentes en España es elevado, y con coeficientes de transformación que varían sensiblemente de unas variedades a otras (TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. – TRAGSATEC, 2011). En la Tabla 1.4 se recoge información de rendimiento al descascarado de algunas de las variedades más significativas:

Tabla 1.4 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades.
Fuente: TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. (TRAGSATEC). Dirección Adjunta de Ingeniería y Servicios Agrarios. Subdirección de Servicios Técnicos. ESTUDIO DEL SECTOR DE FRUTOS CÁSCARA. Caracterización estructural, estudio de mercado y perspectivas de desarrollo. Mayo 2011.

VARIEDADES	Coeficiente de transformación	
	Kg cáscara/kg grano	%
Marcona	4	25
Desmayo largueta	3,5	27,5
Antoñeta	4	35
Marta	3,1	32
Atocha	4	25
Ferraduel	3,7	27
Ferragnes	2,6	38,5
Garrigues	3,5	28,5
Guara	3,1	32
Moncayo	3,8	26,5
Belona	3,2	31

Marcona y Desmayo largueta, en general, son las únicas variedades que se separan a la hora de la recolección para comercializarlas separadamente. El resto de las variedades son comercializadas conjuntamente bajo la denominación de Comuna, con lo que es

⁹ MARM: antigua denominación de: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España.

muy difícil conocer la producción de cada una de estas variedades de este grupo en una campaña determinada. Por tanto, si se considera el rendimiento al descascarado de Marcona, Desmayo largueta, y Comuna (media aritmética del resto de las variedades), se llega a los siguientes valores (Tabla 1.5):

Tabla 1.5 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades (media aritmética del resto).
Fuente: TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. (TRAGSATEC). Dirección Adjunta de Ingeniería y Servicios Agrarios. Subdirección de Servicios Técnicos. ESTUDIO DEL SECTOR DE FRUTOS CÁSCARA. Caracterización estructural, estudio de mercado y perspectivas de desarrollo. Mayo 2011.

VARIEDADES	Coeficiente de transformación	
	Kg cáscara/kg grano	%
Marcona	4	25
Desmayo largueta	3,5	27,5
Comuna	3,4	29,5

El rendimiento medio al descascarado de las variedades presentes en España considerando la importancia de su producción sería (Tabla 1.6):

Tabla 1.6 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades (media aritmética del resto).
Fuente: TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. (TRAGSATEC). Dirección Adjunta de Ingeniería y Servicios Agrarios. Subdirección de Servicios Técnicos. ESTUDIO DEL SECTOR DE FRUTOS CÁSCARA. Caracterización estructural, estudio de mercado y perspectivas de desarrollo. Mayo 2011.

VARIEDADES	Coeficiente de transformación	
	Kg cáscara/kg grano	%
Todas	3,5 - 4,0	28,5 - 32,6

Ello significa que con una producción media anual de almendra en grano en España de 50.000 toneladas, la producción de cáscara de almendra viene siendo de 175.000 a 200.000 t/año.

1.2 MORTEROS

1.2.1 Definición

Es de común acepción definir “mortero” como una mezcla de uno o varios conglomerantes inorgánicos (cal, yeso, cemento, arcilla) combinados con material de relleno (agregado fino o arena), agua y en ocasiones con adiciones y/o aditivos lo que da lugar a una pasta plástica o fluida que después de fraguar y endurecer debido a procesos de índole química que en ella se producen confieren a la misma especiales características en estado fresco y endurecido. Los agregados (áridos) deben ser empleados para control en los posibles cambios de volumetría proporcionando igualmente a los morteros un mayor aislamiento térmico, mayor hidraulicidad, menor peso unitario, entre otras propiedades.

Para permitir la adecuada colocación del mortero es fundamental el grado de consistencia del mismo en estado fresco. Precisamente en la fabricación de bloques o bovedillas son utilizados morteros secos compactados con gran energía. Si se trata de revoques, el mortero se debe adherir a superficies verticales y en ciertos casos, puede hasta colgar de las mismas.

Si se trata de morteros en estado endurecido, estos deberán poseer resistencias mecánicas acordes al uso final. Por ejemplo un mortero aplicado en un muro deberá tener un comportamiento adecuado a las deformaciones de dicho elemento constructivo, para ello será conveniente que su módulo elástico no sea demasiado elevado ya que si dicho mortero es muy resistente y rígido tenderá a fisurarse. De gran significación es la estabilidad volumétrica que en el caso de los revoques es crítica por ser estas grandes superficies sometidas a exposición. Todo mortero con una elevada retracción tenderá inevitablemente a su fisuración pudiendo conllevar una pérdida de adherencia con el propio sustrato en el que ha sido aplicado.

La utilización de los morteros ha estado orientada fundamentalmente en la construcción de grandes elementos a partir de unidades menores a las que se

denominan mampuestos. Si no existe interposición de otro material para su colocación se habla de mampostería en seco. Si por el contrario un material en estado fresco es interpuesto entre los mampuestos adaptándose a la geometría de ellos y que adquiere resistencia en el transcurso del tiempo con capacidad de transmitir esfuerzos de compresión y corte, el mismo se denominará “mortero”.

En cuanto al empleo del mortero, este estará condicionado por sus cualidades. Si es colado en un molde (diversidad de formas) tendrá diversos empleos: bovedillas para techos, tejas, mosaicos, bloques huecos, bloques compactos, adoquines, etc. También como revestimiento o para proporcionar adherencias de distintos revestimientos al sustrato: revoques, asiento de azulejos y mosaicos, solados, etc.

El empleo de distintos materiales como ligantes en morteros y hormigones ha sido constante a lo largo de la historia de la construcción, dividiéndose estos en dos categorías: a) Aglomerantes y b) Conglomerantes.

El Diccionario de la lengua española editado por la Real Academia Española (RAE)¹⁰ define: Aglomerante: *material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico, por ejemplo el barro*. Conglomerante: *material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos, por ejemplo el yeso, la cal, el cemento, las resinas sintéticas, etc*. Queda definido el término en la norma UNE-EN 998-2¹¹: *Material utilizado para unir partículas sólidas de tal manera que formen una masa coherente*. Correspondería a la parte activa de los morteros o material que es capaz de aglutinar el árido.

Los materiales aglomerantes son sustancias que por transformaciones físicas como el desecamiento o enfriamiento se endurecen, mientras que los conglomerantes luego de haber sido amasados con agua, fraguan y se endurecen mediante transformaciones

¹⁰ <http://www.rae.es/>

¹¹ AENOR “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para Albañilería”. Norma, versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 998-2:2010.

químicas, desarrollando ciertas propiedades que les permiten unirse a otros por cohesión, pasando al estado sólido.

Se llama mortero bastardo o mixto al compuesto por cemento, cal y arena que combina las cualidades de los dos anteriores. Si en la masa se pone más cemento que cal será más resistente y si la cantidad de cal es mayor será más flexible. La denominación “concreto” se reserva para morteros cuyo conglomerante es el cemento portland.

Utilizando como conglomerante cal aérea¹² o yeso se producirán los llamados **morteros aéreos**, los cuales endurecen en contacto con el aire. Si el conglomerante es cemento portland o cal hidráulica¹³ los morteros derivados serán los denominados **hidráulicos** cuyo endurecimiento se produce por reacción con el agua siendo capaces de soportar la acción sostenida de la misma sin reblandecerse. Si los conglomerantes intervinientes son aditivos especiales que les confieren determinadas aptitudes, hidrófugo para reducir el ingreso de agua, moduladores del fraguado, acelerantes del mismo, etc., los morteros se denominan **modificados**.

Entre algunas de las condiciones que debería reunir un buen mortero se encuentran:

- Constituir una mezcla unida permitiendo una extensión fácil por medios manuales,
- trabajabilidad, dando el tiempo suficiente para que se puedan colocar correctamente ladrillos o bloques de construcción permitiendo ajustarlos en línea y nivel,
- capacidad de adhesión a la cara del ladrillo o bloque,
- endurecimiento lo suficientemente rápido como para que pueda trabajarse a un ritmo razonable, sin que salga una cantidad excesiva de mortero de la junta por la presión,
- disponer de fuerza compresiva similar a la de los ladrillos o bloques, no siendo ésta más fuerte de lo necesario, para que así se ofrezca una fuerza adecuada que cumpla con los requisitos estructurales y de durabilidad,
- tener fuerza tensora suficiente para dar soporte a las cargas de flexión y de corte,
- capacidad de resistencia a la penetración del agua y del hielo en ubicaciones exteriores,
- no dañar la apariencia de ladrillos o bloques empleados.

¹² Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio que en presencia de humedad endurece lentamente al aire por la acción del anhídrido carbónico atmosférico.

¹³ Producto cementicio compuesto de cal hidratada y cantidades apropiadas de compuestos hidráulicos sílico-aluminosos cálcicos que aseguren su endurecimiento bajo agua.

1.2.2 Componentes: características y normativa

Los componentes de los morteros son (Fig. 1.18):

- Conglomerantes
- Áridos
- Aditivos
- Adiciones
- Agua

Fig. 1.18 Componentes de los morteros

CONGLOMERANTES

Los conglomerantes cumplen una doble función, por un lado, la función física de adherirse a la superficie de las partículas/árido a las que debe unir, así como, rellenar los huecos entre las partículas de árido, y otra, la función química de polimerizar o combinarse con el disolvente formando una serie de compuestos químicos capaces de conformar una estructura, conseguir la adherencia y desarrollar una elevada resistencia (Pitarch R., A. M., 2003).

Según la norma UNE-EN 998-2 los morteros se pueden clasificar de acuerdo a diferentes aspectos:

- Según el conglomerante o característica específica (composición)
- Según su aplicación
- Según el concepto
- Según el método de fabricación
- Según la forma de suministro

A su vez cada clasificación general tiene clasificaciones específicas y detalladas. Para la finalidad del presente trabajo solo se presenta la clasificación según el tipo de conglomerante (Tabla 1.7). (Crespo Escobar, S., 2010).

Tabla 1.7 Tipos de mortero según el conglomerante.
Fuente: Crespo Escobar, S. Materiales de construcción para edificación y obra civil.
Editorial Club Universitario. pp. 295, San Vicente (Alicante), 2010.

Tipo	Descripción
Mortero de yeso	Elaborado a base de yeso, arena y agua. Es menos resistente que otros morteros pero endurece rápidamente. Normalmente no se utiliza para levantar tabiques de división interior; se emplea con mayor frecuencia para fijar elementos de obra. Nunca debe aplicarse en labores de enfoscado o revoco sobre paramentos en los que se presume la existencia de humedades, ya que el yeso tiene una gran capacidad de absorción, por lo que puede almacenar una gran cantidad de agua.
Mortero de cal	Compuesto por cal (hidráulica o aérea), arena y agua. Es un mortero de gran plasticidad, fácil de aplicar, flexible y untuoso, pero de menor resistencia e impermeabilidad que el mortero de cemento.
Mortero de cal grasa	Mortero fino formado por una selección de cargas de arenas de mármol que le confieren calidad y facilidad de aplicación. Se utiliza como base de recubrimientos y estucos. También puede dejarse como acabado en blanco o de color, de aspecto más rústico.
Mortero graso	Mortero que contiene un porcentaje de finos del 25%, respecto de la mezcla seca. Es un mortero muy plástico, cuyos granos de arena no se tocan entre sí. Si lleva un exceso de conglomerante; puede perder resistencia y presentar fisuras de retracción.
Mortero de cemento	Es una mezcla de cemento, arena y agua. Posee gran resistencia y asimismo rapidez en secarse y endurecerse. Sin embargo, es escasamente flexible, y puede agrietarse con facilidad.
Mortero magro o pobre	Mortero que tiene un porcentaje de finos inferior al 15%. Es un mortero poco plástico al cual se ha añadido una proporción mayor de arena. Es menos resistente que el mortero graso.
Mortero bastardo o mixto	Mortero compuesto por cemento, cal y arena que combina las cualidades de los dos anteriores. Si en la masa se pone más cemento que cal será más resistente y si la cantidad de cal es mayor será más flexible.

De igual forma el conglomerante utilizado ha sido el cemento por lo que la descripción que sigue está vinculada al mismo elemento.

CEMENTO

De acuerdo a la norma UNE-EN 197-1:2011¹⁴ se trata del conglomerante hidráulico más empleado en la construcción, siendo un material inorgánico finamente molido que al ser amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece, por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.¹⁵ Al dosificar y mezclar apropiadamente con agua y áridos, puede producir un hormigón o mortero que conserve su trabajabilidad durante tiempo suficiente, para alcanzar en un periodo de tiempo definido, los niveles especificados de resistencia y estabilidad de volumen a largo plazo.

La Instrucción para la recepción de cementos RC-08¹⁶ define al cemento como un producto al que una vez se le ha incorporado agua, tiene la capacidad de fraguar y endurecerse tanto en el aire como sumergido en el agua. La base de esta mezcla es el clinker (producto resultante de la cocción de diversos minerales con contenidos predominantes de cal y arcilla), que unido a otro conglomerante de yeso, adiciones y/o aditivos, se convierten en cemento.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo (CaO) y de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) será al menos del 50% en masa, cuando las proporciones se determinen conforme con la norma UNE-EN 196-2:2014¹⁷.

De la misma forma que la Revolución Industrial supuso la progresiva desaparición de los procesos de producción artesanales, el desarrollo de las nuevas tecnologías

¹⁴ UNE-EN 197-1:2011: Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

¹⁵ IECA. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Es un Instituto privado fundado en 1985 de carácter técnico dedicado al estudio, asesoramiento y difusión de los conocimientos y tecnologías relativas al cemento y a sus productos derivados: hormigón, morteros y otras aplicaciones.

¹⁶ RC-08: Instrucción para la recepción de cementos. Real Decreto 956/2008 de 06 de Junio. BOE 19 junio 2008, núm. 148, [pág. 27794]; rect. BOE 11 septiembre 2008, núm. 220.

¹⁷ UNE-EN 196-2:2014: Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.

actuales han permitido la evolución y mejora del cemento y de su proceso de fabricación¹⁸.

Actualmente, la investigación sobre el cemento ha ido de la mano del desarrollo de nuevas propiedades del mismo, mientras que la referida a las instalaciones ha optado por la implantación de las mejores técnicas disponibles como garantía de la apuesta de la industria por la sostenibilidad.

En relación al producto, la investigación se ha centrado fomentar las adiciones al cemento para mejorar algunas de sus propiedades y minimizar la huella ambiental de su producción. Además, el uso de algunos residuos industriales, como materia prima del cemento, es una vía de reciclado de desechos que suponían un grave problema ambiental, permitiendo a la industria ser más eficaces medioambientalmente tanto por la utilización del residuo como por la menor emisión de CO₂ que su uso supone.

Componentes de los cementos

Los cementos están compuestos de diferentes materiales (componentes) que adecuadamente dosificados mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

Existen, desde el punto de vista de composición normalizada, dos tipos de componentes (Fig. 1.19).

- **Componente principal:** material inorgánico, especialmente seleccionado, usado en proporción superior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y minoritarios.
- **Componente minoritario:** cualquier componente principal, usado en proporción inferior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y minoritarios.

¹⁸ OFICEMEN. Agrupación de fabricantes de cemento de España.

Fig. 1.19 Componentes de los cementos. Fuentes: RC-08: Instrucción para la recepción de cementos.
 UNE-EN 934-1:2009 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes.
 UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones.
 Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.

Designación de los cementos comunes

Se consideran cementos comunes los definidos en la norma UNE-EN 197-1¹⁹ y son clasificados en cinco tipos (Tabla 1.8).

Tabla 1.8 Designación de los cementos comunes.

Fuentes: Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)²⁰ / UNE-EN 197-1:2011²¹

TIPO	DESIGNACIÓN
CEM I	El cemento Pórtland se designará con las siglas CEM I , seguidas de la clase de resistencia (32,5 - 42,5 - 52,5) y de la letra (R) si es de alta resistencia inicial o de (N) si es de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1.
CEM II	Los cementos Pórtland con adiciones se designarán con las siglas CEM II seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A o B) separada por un guión (-) de la letra que identificativa del componente principal empleado como adición del cemento: S: escoria de horno alto; D: humo de sílice; P: puzolana natural; Q: puzolana natural calcinada; V: ceniza volante silíceo; W: ceniza volante calcárea; T: esquistos calcinados; L y LL: caliza. A continuación se indicará la clase de resistencia (32,5- 42,5-52,5), y seguidamente la letra R si se trata de un cemento de alta resistencia inicial o la letra N en el caso de ser de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1. En el caso del cemento Pórtland mixto (M) se indicará, además entre paréntesis, las letras identificativas de los componentes principales empleados como adición.
CEM III	Los cementos con escorias de horno alto, los cementos puzolánicos y los cementos compuestos se designarán con las siglas CEM III , CEM IV y CEM V , respectivamente, seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A, B o C). En el caso de cementos puzolánicos tipo IV o cemento compuesto tipo V, se indicará además, entre
CEM IV	paréntesis, las letras identificativas de los componentes principales empleados como adición. A continuación, se reflejará la clase de resistencia (32,5-42,5-52,5) y
CEM V	seguidamente la letra R si se trata de un cemento de alta resistencia inicial o la letra N en el caso de ser de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1.
En el caso del cemento común de bajo calor de hidratación, se debe añadir las letras LH al final de la designación correspondiente a un cemento común. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1.	

¹⁹ UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

²⁰ RC-08: Instrucción para la recepción de cementos. Real Decreto 956/2008 de 06 de Junio. BOE 19 junio 2008, núm. 148, pp. 27794 – 27841.

²¹ UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

Prescripciones mecánicas, físicas y químicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación

Las prescripciones relativas a las características mecánicas y físicas que deben cumplir los cementos comunes según sus clases de resistencia, son (Tabla 1.9²²):

Tabla 1.9 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación.

Fuente: Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)

Clase de resistencia ¹⁾	Resistencia a compresión UNE-EN 196-1 ²⁾				Tiempo de fraguado UNE-EN196-3		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3	Calor de hidratación ³⁾	
	Resistencia inicial (N/mm ²)		Resistencia nominal (N/mm ²)		Inicio (min)	Final (h)	Expansión (mm)	UNE-EN 196-9 (J/g)	UNE-EN 196-8 (J/g)
	2 días	7 días	28 días					41 horas	7días
32,5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10		≤ 270
32,5R	≥ 10,0	-							
42,5N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60				
42,5R	≥ 20,0	-							
52,5N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45				
52,5R	≥ 30,0	-							

¹⁾ R = Alta resistencia inicial

N = Resistencia inicial normal

²⁾ 1 N/mm² = 1 MPa

³⁾ Solo para los comunes de bajo calor de hidratación

Prescripciones químicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación

Las prescripciones relativas a las características químicas que deben cumplir los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación, figuran en la Tabla 1.10²³

Tabla 1.10 Prescripciones químicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación.

Fuente: Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción ¹⁾
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0%
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2 ²⁾	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0%
Contenido de sulfatos (expresado como SO ₃)	UNE-EN 196-2	CEM I CEM II ³⁾ CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5%
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0%
			Todas	
		CEM III ⁴⁾	Todas	
Contenido de cloruros (Cl ⁻)	UNE-EN 196-2	Todos ⁵⁾	Todas	≤ 0,10% ⁶⁾
Puzolanicidad	UNE-EN 196-5	CEM IV	Todas	Puzolanicidad a la edad de 8 ó 15 días

1) En el caso en que las prescripciones se expresan en porcentajes, estos se refieren a la masa del cemento final.

2) La determinación del residuo insoluble se realizará por el método basado en la disolución de la muestra en ácido clorhídrico y posterior ataque con disolución de carbonato de sodio.

3) El cemento tipo CEM II/B-T puede contener hasta el 4,5% de sulfato para todas las clases de resistencia.

4) El cemento tipo CEM III/C puede contener hasta el 4,5% en masa de sulfato.

5) El tipo de cemento CEM III puede contener más del 0,10% de cloruros, pero en tal caso el contenido máximo debe ser consignado en los envases y en los albaranes de entrega.

6) Para aplicaciones de pretensado, el cemento puede haber sido fabricado expresamente con valores de cloruros inferiores al máximo admisible. En este caso, se debe expresar el valor real en los envases y albaranes de entrega, reemplazando en su caso, el valor por defecto del 0,10% en masa.

²² BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 148). Págs. 27794-27841. Jueves 19 junio 2008: REAL DECRETO 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08).

²³ BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO (BOE Núm. 148). Págs. 27794-27841. Jueves 19 junio 2008: REAL DECRETO 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08).

ÁRIDOS

Los áridos se pueden definir de diferentes formas dependiendo de la fuente consultada:

- *Aggregates²⁵: Minerales como arena, grava y piedra triturada. Dividido en dos tamaños, finos y gruesos, cuando se añaden al cemento junto con agua producen el hormigón.*
- *La Asociación Europea de Áridos (UEPG)²⁶: Los áridos son materiales granulares utilizados en la construcción. Los áridos naturales más comunes de origen mineral son la arena, la grava y la roca triturada. Aunque sean un producto final en sí mismo como el balasto para el ferrocarril o las piedras para escolleras, los áridos son también materias primas usadas en la fabricación de otros productos esenciales para la construcción, como el hormigón preparado (constituido en un 80% de áridos), otros productos prefabricados, asfalto (constituido en un 95% de áridos), cal y cemento.*
- *La Asociación Nacional Española de Fabricantes de Áridos (ANEFA): Los áridos son materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales. Coloquialmente son conocidos como arena, grava, gravilla, etc.*

Existen otras definiciones más detalladas respecto al origen como a las aplicaciones de los áridos. López Jimeno, C. (1994)²⁷ establece que *los áridos son los materiales minerales, sólidos inertes, que con las granulometrías adecuadas se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla íntima con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cales, cementos, etc.) o con ligantes bituminosos.*

²⁵ NCRS Construction Dictionary.

²⁶ UEPG es el acrónimo de Unión Europea de Productores de Áridos (European Aggregates Association).

²⁷ López Jimeno, C. Manual de áridos. Editorial: Autor-Editor. pp. 612. Madrid. 1994.

El Instituto Geológico Minero de España (IGME)²⁸, en la publicación Panorama Minero 2014, define los áridos como *una serie de rocas que, tras un proceso de tratamiento industrial (simple clasificación por tamaños en el caso de los áridos naturales, o trituración, molienda y clasificación en el caso de los áridos de machaqueo), se emplean en la industria de la construcción en múltiples aplicaciones, que van desde la elaboración, junto con un material ligante, de hormigones, morteros y aglomerados asfálticos, hasta la construcción de bases y sub-bases para carreteras, balastos y sub-balastos para las vías de ferrocarril, o escolleras para la defensa y construcción de puertos marítimos.*

La norma UNE-EN 998-2:2012²⁹, define al árido como *material granular que no contribuye a la reacción de endurecimiento del mortero.*

La norma UNE-EN 13139:2003³⁰, define al árido como *material granular utilizado en la construcción. Los áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados.*

- **Árido natural:** *Árido de origen mineral que únicamente ha sido sometido a un proceso mecánico.*
- **Árido artificial:** *Árido de origen mineral resultante de un proceso industrial que comprende una modificación térmica o de otro tipo.*
- **Árido reciclado:** *Árido resultante del tratamiento de material inorgánico previamente empleado en la construcción.*

El árido empleado en los morteros es un material inerte inorgánico, que sustituye parcialmente al conglomerante. Las características mecánicas del árido mejoran la resistencia y reducen el efecto de retracción en los morteros de cemento y de cal. Es decir, le da estructura al mortero, ya que cohesionado con el conglomerante pasa a formar parte de un material compacto. El conglomerante tiene que tener la capacidad de envolver al árido dándole cohesión, formando con ello una matriz que impida contactos de partículas del árido entre sí, ya que ello produciría superficies de árido sin cohesión, generando discontinuidades en ciertos planos del mortero.

²⁸ IGME Instituto Geológico y Minero de España. Marchán Sanz, C.; Regueiro, M.; González B. Panorama Minero 2014. Ministerio de Economía y Competitividad. pp. 365. Madrid. 2014.

²⁹ UNE-EN 998-2:2012: Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería.

³⁰ UNE-EN 13139:2003: Áridos para morteros.

Por ésta razón, la geometría y tamaño de los áridos resulta muy importante en el momento de facilitar las uniones de los mismos a través del conglomerante. Conseguir uniones resistentes con mínimas cantidades de pasta conglomerante es el objetivo. De esa manera se establece la relación óptima entre precio del producto y sus prestaciones mecánicas.

Como se observa en la definición de árido expresada en la norma UNE-EN 13139:2003, esta no refleja la función del mismo como componente del mortero, pero si especifica las condiciones mínimas que deben reunir los áridos para morteros para poder implantar un modelo de utilización fundamentado en experiencias recogidas con distintos tipos de áridos (Tabla 1.12).

Tabla 1.12 Clasificación de los áridos por tipo de roca.
Fuente: Asociación Nacional Española de Fabricantes de Áridos (ANEFA)

ÁRIDOS NATURALES			ÁRIDOS RECICLADOS	ÁRIDOS ARTIFICIALES
- Procedentes de la corteza terrestre - Suponen el 99% del consumo			- Procedentes del tratamiento de residuos de construcción y demolición - Actualmente representan menos del 1% del consumo.	- Procedentes de escorias de otras industrias generadas en procesos térmicos. - Actualmente su uso es escaso.
ROCAS ÍGNEAS	ROCAS SEDIMENTARIAS	ROCAS METAMÓRFICAS		
Plutónicas Granitos Dioritas Gabros	Calcáreas Calizas Dolomías			
Hipoabisales Diabasas Pórfidos	Arenosas Arenas Arenas silíceas Gravas Conglomerados Areniscas Grauvacas	Gneises Cuarzitas Mármoles	Hormigones Ladrillos Tejas Carreteras Mezclas	Escorias de horno alto Escorias de acería Otras escorias
Volcánicas Basaltos Riolitas Traquitas Andesitas				

Dicho modelo establece para los áridos una serie de requisitos:

Requisitos geométricos:

- Tamaños del árido
- Granulometría
- Forma de las partículas y contenido en conchas
- Contenido y calidad de los finos

Requisitos físicos:

- Densidad de las partículas
- Absorción de agua
- Resistencia al hielo y al deshielo

Requisitos químicos:

- Contenido en cloruros solubles en agua
- Contenido en sulfatos solubles en ácido
- Componentes que alteran la velocidad de fraguado y la de endurecimiento del mortero
- Durabilidad (reactividad álcali-sílice)
- Para los áridos artificiales se establecen una serie de requisitos adicionales:
 - Las sustancias solubles en agua no deben exceder del 1% en masa
 - La pérdida por calcinación no debe exceder del 3% si se trata de escorias de alto horno enfriadas por aire o del 5% en el caso de cenizas volantes pulverizadas

En la norma se establece que todos los áridos se deben describir en términos de tamaños del árido empleando la designación ***d/D***, excepto para los áridos adicionados como filleres, que deben ser descritos como filler del árido.

Los tamaños de los áridos se deben designar por un par de tamices (***d y D***) en milímetros, ***d*** corresponde al límite menor del tamiz o máxima luz de malla que deja pasar menos del 10% de la mezcla y ***D*** al límite superior del tamiz o mínima luz de malla que deja pasar más del 90% de la mezcla, designación con la que se encuentra la mayor parte de la granulometría del árido (0/4 mm, 0/2 mm, 2/4 mm, etc.). Según ello se definen dos tipos de áridos:

- **Árido grueso:** árido con $D \geq$ de 4 mm y $d \geq$ de 2 mm, correspondientes a los tamaños 0/8, 2/4 y 2/8 mm.
- **Árido fino:** árido con $D \leq$ de 4 mm, correspondientes a los tamaños 0/1, 0/2 y 0/4 mm.

La granulometría de los áridos para morteros según la designación d/D es:³¹

0/1 mm	0/2 mm	0/4 mm	0/8 mm	2/4 mm	2/8 mm
--------	--------	--------	--------	--------	--------

Los agregados sustitutivos del árido que se han utilizado en la confección de los morteros y hormigones de este trabajo de investigación, ROCA son materiales de densidades aparentes bajas, entre 340-380 kg/m³, muy inferiores a lo que se establece en la norma UNE-EN 13055-1:2003³² en su nota 1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN, donde anota: *“Se aplica a los áridos ligeros de origen mineral con una densidad de partículas no superior a 2,00 Mg/m³ (2.000 kg/m³), o con una densidad aparente no superior a 1.200 kg/m³ (1,20 Mg/m³), ...”*. Para este tipo de áridos denominados ligeros, dicha norma no establece condiciones distintas a las exigidas en la norma UNE-EN 13139:2003, con la excepción de la densidad inferior a los 1.200 kg/m³.

En todos los casos, la normativa está referida a áridos de carácter mineral inorgánico (áridos naturales; áridos fabricados a partir de materiales naturales o de subproductos obtenidos en los procesos industriales; subproductos obtenidos en procesos industriales; áridos reciclados), no dando opción a la utilización de materiales de origen orgánico como es el caso de las cáscaras de almendra. Sin embargo en el erratum UNE-EN 13055-1/AC que modifica a la norma UNE-EN-1:2003 se borra la nota 1 (OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN) y se sustituye por la nueva nota 1 que aparece a continuación:

- *“NOTA 1 - Los áridos usados en construcción deberían cumplir con todos los requisitos de esta norma europea. El mandato M/125³³ “Áridos” incluye áridos reciclados **y algunos materiales de origen nuevo o no habitual** así como los áridos naturales y manufacturados conocidos y tradicionales. Los áridos reciclados se incluyen en las normas existiendo normas de métodos de ensayo específicos para áridos reciclados que se encuentran en estado avanzado de elaboración. Para materiales no habituales de origen secundario, sin embargo, el trabajo de normalización ha empezado recientemente y se necesita más tiempo para definir claramente el origen y características de estos materiales.*

³¹ UNE-EN 13139:2003: Áridos para morteros.

³² UNE-EN 13055-1:2003: Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado.

³³ M/125 rev.1 Amendment to mandate to CEN and CENELEC concerning the execution of standardisation work for harmonised standards on aggregates. EUROPEAN COMMISSION ENTERPRISE AND INDUSTRY DIRECTORATE-GENERAL. New Approach Industries, Tourism and CSR. Construction, Pressure Equipment, Metrology. Brussels, 29th June 2010.

Durante este tiempo, estos materiales no habituales, cuando se pongan en el mercado como áridos, deben cumplir totalmente con esta norma y con la reglamentación nacional sobre sustancias peligrosas dependiendo de su uso previsto. Se pueden pedir características y requisitos específicos caso por caso dependiendo de la experiencia de uso del producto, definidos en documentos contractuales.

ADITIVOS Y ADICIONES

En los ANEXOS de este documento se detallan cada uno de estos componentes.

AGUA

El agua desempeña un papel importante como agua de amasado y principalmente como agua de curado en morteros y hormigones.

- **Agua de amasado**³⁴: por un lado participa en la reacción de hidratación del cemento, y por otro actúa a manera de lubricante mojando las partículas del árido, facilitando el grado de trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra (moldeo y compactación). Según las condiciones prevalecientes en obra su dosificación debe limitarse al mínimo estrictamente necesario confiriendo a la pasta la trabajabilidad requerida. Un exceso de agua se evaporará creando una red de poros capilares que harán disminuir su resistencia.
- **Agua de curado**³⁵: es esta la más importante durante la etapa del fraguado y el primer endurecimiento. Como objetivos se encuentran: evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento y evitar la retracción prematura.

Dado que el agua de curado tiene actuaciones más duraderas que el agua de amasado, se corren por tanto más riesgos si se aportan sustancias perjudiciales con el agua de curado que con el agua de amasado.

³⁴ Agua que se ha empleado en la preparación de algún tipo de mezcla como cemento, hormigón, mortero, etc., sin contar con la que ha sido absorbida previamente por el árido.

³⁵ Es la cantidad de agua adicional que requiere el mortero y hormigón una vez endurecidos a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fueron diseñados.

El agua de amasado y curado de morteros y hormigones debe ser inocua, no portando sustancias perjudiciales que puedan alterar el proceso de fraguado de los conglomerantes o en su caso las propiedades del resto de componentes. Son aceptadas en general las aguas potables, sancionadas por la experiencia sobre las mismas, sin necesidad de garantizar su calidad. Deben ser por tanto aguas razonablemente limpias que no contengan proporciones indeseadas de materia orgánica, fango y sales. La presencia excesiva de impurezas en el agua de mezclado afectan no solo el tiempo de fraguado, la resistencia y la estabilidad del volumen sino también provocan eflorescencias o corrosiones en los elementos de refuerzo (como puede ser en los hormigones).

1.2.3 Clasificación de los morteros (AFAM, 2013)

Tabla 1.13 Clasificación de los morteros.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Según el conglomerante	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros de cemento - Morteros de cal hidráulica - Morteros de cal aérea - Morteros mixtos de cemento y cal hidráulica - Morteros mixtos de cemento y cal aérea - Morteros para formación de fábricas - Morteros de revoco/enlucido 	
Según su aplicación	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros para solados - Morteros cola - Morteros de reparación - Morteros impermeabilizantes 	
Según el concepto	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros diseñados - Morteros de receta o prescritos 	
Según su método de fabricación	- Morteros hechos "in situ"	
	- Morteros industriales semiterminados	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros predosificados - Morteros premezclados de cal y arena
	- Morteros industriales	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros húmedos - Morteros secos

Los morteros para albañilería se definen como "mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua, y a veces, de adiciones y/o aditivos para fábricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado y trabazón

de albañilería". Dichas mezclas deben ser homogéneas y sus componentes se deben utilizar en unas proporciones determinadas, de acuerdo con la utilización prevista del mortero. Los morteros para albañilería se clasifican según su:

- Fabricación
- Aplicación
- Concepto
- Conglomerante

Morteros según su fabricación

Los morteros pueden fabricarse en la obra, morteros "in situ", o en una fábrica, morteros industriales. El empleo de los morteros hechos en obra tradicionales requiere actualmente un gran esfuerzo de fabricación y control para alcanzar las nuevas exigencias demandadas por el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico HS-1.

Entre los morteros Industriales hay distintos tipos, que varían en función de su lugar de fabricación y suministro: morteros secos, morteros húmedos y morteros de dos componentes. Los morteros Industriales Secos se suministran mediante silos o sacos para mezclarse con agua en la obra. Por su alto control, permiten adaptarse a cualquier requisito demandado por el prescriptor y la normativa actual.

Morteros según su aplicación

Tabla 1.14 Tipos de mortero de albañilería según su aplicación.
Fuente AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Tipo	Definición
Morteros uso corriente (G)	Son morteros para albañilería sin características especiales.
Morteros juntas y capas finas (T)	Son morteros para albañilería diseñados para realizar juntas y capas finas, cuyo tamaño máximo del árido sea menor o igual que 2 mm.
Morteros ligeros (L)	Son morteros para albañilería diseñados cuya densidad, en estado endurecido y seco, es igual o menor de 1.300 Kg/m ³ . En estos morteros se utilizan, por regla general, áridos ligeros.

Morteros según el concepto

Tabla 1.15 Tipos de mortero de albañilería según el concepto.
Fuente AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Tipo	Características
Morteros diseñados	Su composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante para obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación). Se someten a los correspondientes ensayos por parte del fabricante.
Morteros de receta o prescritos	Se fabrican a partir de los componentes primarios (conglomerantes y áridos) en unas proporciones predeterminadas. Sus propiedades dependen de las características de sus componentes y de su dosificación, que se han declarado.

Morteros según el conglomerante

- Morteros de cemento
- Morteros de cal hidráulica
- Morteros de cal aérea
- Morteros mixtos de cemento y cal hidráulica
- Morteros mixtos de cemento y cal aérea

1.2.4 Propiedades, características y requisitos de los morteros de albañilería. Estado fresco

Tabla 1.16 Propiedades del mortero en estado fresco.
Fuentes: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero
AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

TIEMPO DE UTILIZACIÓN	
Tiempo durante el cual un mortero tiene la suficiente trabajabilidad para utilizarlo sin adición posterior de agua, con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento producido por el principio de fraguado.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-9:2000	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.
UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007*	Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.
CONSISTENCIA	
La consistencia se expresa por el escurrimiento experimentado (valor medio del diámetro) por la probeta de mortero ensayada, en mm. La consistencia de los morteros frescos hechos con conglomerantes minerales y áridos normales y ligeros, se determina por medio de la mesa de sacudidas.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-3:2000	Métodos de ensayo para morteros de albañilería.
UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005*	Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco
UNE-EN 1015-3:2000/A2:2007*	(por la mesa de sacudidas).

* "Léase también..."

TIEMPO DE FRAGUADO

Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia alcanza un valor apreciable denominado fraguado final.

Método de ensayo	Designación
UNE-EN 480-2:2007	Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado.

DENSIDAD APARENTE

Relación entre la masa del material y el volumen de su envoltente, incluyendo su contenido en aire.

Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.
UNE-EN 1015-6:1999*	Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

CONTENIDO EN IONES CLORURO SOLUBLES EN AGUA

La presencia de iones cloruro, solubles en el agua de amasado del mortero, puede influir en el proceso de corrosión en el caso de existir armaduras, así como en la aparición de eflorescencias. Por consiguiente, es necesario determinar su contenido en aquellos morteros que vayan a tener armaduras.

Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-17:2001	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.
UNE 83827:1994 EX *	Parte 17: Determinación del contenido en cloruros solubles en
UNE-EN 1015-17:2001/A1:2005*	agua de los morteros frescos.

CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA

La retención de agua influye en el grado de hidratación de los conglomerantes y por consiguiente en la velocidad de endurecimiento de los morteros y en las resistencias mecánicas finales. De esta propiedad depende la trabajabilidad del mortero fresco. La retención de agua se haya íntimamente relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta.

Método de ensayo	Designación
prEN 1015-13	Methods of test for mortar for masonry. Part 13. Determination of dimensional stability of hardened mortars.

CONTENIDO EN AIRE

El contenido en aire resulta un parámetro altamente influyente en el conjunto de propiedades del mortero. El aire en el seno de un mortero puede ocasionarse por medio de efectos mecánicos o por la incorporación en su masa de aditivos aireantes. En su relación con la resistencia, a mayor cantidad de aire ocluido menor es la resistencia a compresión del mortero obtenida. Además, en lo que respecta al conjunto de la fábrica el aumento de aire minorará la resistencia a tracción y flexión del elemento. No obstante, un cierto contenido en aire puede beneficiar otras propiedades.

Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-7:1999	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.
	Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.

* "Léase también..."

1.2.5 Propiedades, características y requisitos de los morteros de albañilería. Estado endurecido

Tabla 1.17 Propiedades del mortero en estado endurecido.
Fuente: AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

RESISTENCIA A COMPRESIÓN	
La resistencia mecánica a compresión del mortero para albañilería, que debe ser declarada por el fabricante, se determina a 28 días sobre probetas prismáticas de 40x40x160 mm confeccionadas y curadas de acuerdo al procedimiento operatorio que recoge la norma abajo indicada.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 UNE-EN 1015-11:2000*	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
RESISTENCIA DE UNIÓN (ADHESIÓN)	
Se fundamenta en la resistencia a tracción de la unión entre un mortero y un soporte definido, siendo relevante en los morteros para revocos y morteros cola. Se determina mediante ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-12:2000	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes.
ABSORCIÓN DE AGUA	
Afecta de manera directa a morteros expuestos de forma directa a la lluvia. La capacidad de absorción de agua determina la permeabilidad de un enfoscado o del mortero que constituye las juntas de una fábrica. Morteros permeables al agua permitirán el paso de esta hacia su interior dando lugar a la aparición de humedades por filtración.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-18:2003	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA	
El paso del vapor a través de la estructura capilar del material también favorece la aparición de condensaciones en el interior por lo que es importante determinar el grado de permeabilidad al vapor de agua de los morteros, especialmente de aquellos para revocos exteriores.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1745:2013	Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar las propiedades térmicas.
DENSIDAD EN SECO	
Estará condicionada por la densidad que tengan sus componentes: arenas, adiciones, etc., siendo determinante la granulometría y volumen que los mismos ocupen en la dosificación. La densidad de los morteros para albañilería ligeros debe ser igual o menor de 1.300 kg/m ³ .	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1015-10:2000 UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007*	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
Esta propiedad indica la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo por una unidad de superficie del material que dependerá de la densidad de éste de su porosidad, etc. entre otros parámetros.	
Método de ensayo	Designación
UNE-EN 1745:2013	Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar las propiedades térmicas.

* "Léase también..."

DURABILIDAD

Resulta fundamental conocer las posibilidades de los morteros de albañilería frente a diversas condiciones de exposición, de tipo climático, de mantenimiento y el propio diseño de la construcción de forma que la integridad estructural de dichos morteros se mantenga a lo largo de la duración prevista, por lo que previa su elección deberá conocerse la agresividad del medio y su grado de exposición al que el mortero va a estar sometido.

En el momento de recoger información para este trabajo de investigación ha de indicarse que no se dispone de un método de ensayo europeo normalizado. Se considera que la aptitud del empleo de un mortero para albañilería en medios agresivos puede ser basada en los resultados de los ensayos realizados por laboratorios cualificados y/o en la propia experiencia de que dispone el fabricante sobre el comportamiento del mortero a partir de ensayos de laboratorio y/o en su propia experiencia práctica, todo ello en relación directa con las condiciones medioambientales de exposición.

La naturaleza del sistema de poros del mortero (abiertos, cerrados, capilares, interconectados, etc.) facilita el acceso del agua al mortero. En dicha porosidad juega un papel determinante el tipo de conglomerante utilizado (cemento con o sin adiciones, cales, etc.), la cantidad empleada de agua, el sistema de preparación del mortero, la edad del mismo, el grado de hidratación, etc.

Dos situaciones son de destacar en cuanto a agresividad hacia el mortero en condiciones de exposición: por un lado, la acción de iones sulfato, y por otra, el contenido en iones cloruro.

REACCIÓN FRENTE AL FUEGO

Es un requisito adicional para los morteros para juntas y capas finas (UNE-EN 998-2:2012).

Dicha norma expresa: El fabricante debe declarar la clase de reacción frente al fuego de los morteros para albañilería. Los morteros para albañilería que contengan una fracción igual o menor del 1% (en masa o en volumen, el valor más crítico) de materiales orgánicos distribuidos homogéneamente, se clasifican como clase A1 de reacción frente al fuego sin necesidad de ensayos (decisión de la Comisión 96/603/CE, y sus modificaciones).

Los morteros para albañilería que contengan una fracción mayor del 1% (en masa o en volumen, el valor más crítico) de materiales orgánicos distribuidos homogéneamente, se deben clasificar de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 y declararse con la clase correspondiente de reacción frente al fuego.

Método de ensayo	Designación
UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010	Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

* "Léase también..."

Tabla 1.18 Clases de mortero endurecido de acuerdo a los valores de resistencia a compresión.
Fuente: UNE-EN 998-2:2012 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería

Clase	M-1	M-2,5	M-5	M-7,5 ⁽¹⁾	M-10	M-15	M-20	Md
Resistencia a compresión N/mm²	1	2,5	5	7,5	10	15	20	d

d es una resistencia a compresión mayor de 20 N/mm² y múltiplo de 5, declarada por el fabricante.

⁽¹⁾ Aunque la clase M-7,5 no figura en la Norma UNE-EN 998-2:2012, esta clase es válida en España según la Instrucción para criterios de puesta en práctica del Marcado CE en Morteros del Ministerio de Industria (Febrero 2007).

1.2.6 Designación de los morteros de albañilería

Morteros diseñados

Los morteros para albañilería diseñados se designan por su clase resistente, es decir por la letra M seguida de su resistencia a compresión a 28 días, en N/mm². Además, en esta designación, se pueden incluir aquellas características que el responsable de la fabricación del mortero considere oportunas.

Morteros prescritos

La designación de los morteros prescritos, referenciará sus componentes y cantidades.

1.2.7 Selección de los morteros de albañilería según su aplicación

Tabla 1.19 Clases de mortero de albañilería para formación de fábricas.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Formación de fábricas	
Tipo de aplicación	Tipo de mortero ⁽¹⁾
Tabiquería, Particiones	M-5
Fábrica no resistente	M-5
revestida. Cerramientos	M-7,5
	M-5
	M-7,5
	Absorción ⁽²⁾
Fábrica vista. Cerramientos	c ≤ 0,4 para Juntas tipo J1 ⁽³⁾
	c ≤ 0,2 para Juntas tipo J2 ⁽³⁾
Fábrica resistente no armada	M-7,5
Fábrica armada	M-7,5
Fábrica de alta resistencia	M-10 o superior

⁽¹⁾ Para evitar roturas frágiles de los muros, la resistencia a compresión del mortero no debe ser superior al 0,75 de la resistencia normalizada de las piezas.

⁽²⁾ Coeficiente de absorción de agua por capilaridad según Norma UNE-EN 998-1:2010³⁶ c (Kg./m² · min. 0,5). Designación de Juntas según CTE DB HS-1 Fachadas.

Además del tipo de mortero propuesto, en función de sus propiedades principales, la selección se puede completar con la decisión del tipo de composición (mortero de cemento, mixto de cemento y cal o de cal), y si es necesario especificar alguna propiedad o característica adicional (consistencia, tiempo de retardo de fraguado, tiempo de utilización, contenido en aire, etc.).

³⁶ UNE-EN 998-1:2010 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.

Tabla 1.20 Clases de mortero de albañilería para solados.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Solados⁽¹⁾ (2)	
Tipo de aplicación	Tipo de mortero
Pieza a pieza	M-7,5 M-10
Extensión simple	M-2,5
Extensión simple ⁽³⁾	M-5
Extensión con adhesivos cementicios	M-2,5
Extensión con adhesivos no cementicios	M-7,5 M-10

⁽¹⁾ Las baldosas cerámicas se recibirán conforme a los materiales indicados en la Norma UNE-EN 12004:2008+A1:2012³⁷.

⁽²⁾ En el caso de morteros retardados el tiempo máximo de retraso será de 8 h.

⁽³⁾ La adherencia se confía a una interfase producida por la aplicación sobre el mortero fresco de un espolvoreado de cemento en polvo o lechada de cemento.

Morteros de revoco (exterior) / enlucido (interior)

Tabla 1.21 Morteros de revoco / enlucido. Rangos de resistencia a compresión. Designación.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

RANGOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	
Resistencia a compresión a 28 días (N/mm²)	Categoría
0,4 < Resistencia a compresión < 2,5	CS I
1,5 < Resistencia a compresión < 5,0	CS II
3,5 < Resistencia a compresión < 7,5	CS III
Resistencia a compresión ≥ 6	CS IV

³⁷ UNE-EN 12004:2008+A1:2012 Adhesivos para baldosas cerámicas. Requisitos, evaluación de la conformidad, clasificación y designación.

Tabla 1.22 Morteros de revoco / enlucido.
Rangos de absorción de agua por capilaridad. Conductividad térmica. Designación.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

RANGOS DE ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD	
Coefficiente de absorción capilar c (kg/m ² .min 0,5)	Categoría
$c < 0,4$	W1
$c < 0,2$	W2
valor no declarado	W0
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (T)	
	T1, T2

Tabla 1.23 Clases de mortero de revoco / enlucido. Aplicación.
Fuente: AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

Revoco / enlucido		Tipo de mortero
Tipo de aplicación		
Revestimientos exteriores	Revestimientos interiores	CS II – W0 CS III – W0
	Revestimientos intermedios	CS III – W1 CS III – W2 CS IV – W1 CS IV – W2
	Enfoscado revoco visto	CS III – W1 CS IV – W1
	No monocapa	CS III – W2 CS IV – W2
	Enfoscado tras plaquetas, chapados, etc.	CS IV – W1
	Monocapa (OC)	(OC) CS III – W1 (OC) CS IV – W1
		(OC) CS III – W2 (OC) CS IV – W2
		CS III – W1 – T2 CS IV – W1 – T2
	Revestimientos aislantes	

1.3 HORMIGONES

1.3.1 Definición

La palabra hormigón procede del latín, *“formicō”* o *“concrētus”*, que traducido quiere decir homogéneo con molde o forma. Es un material destinado a usos constructivos que resulta de la mezcla y amasado de áridos (finos y gruesos), un conglomerante y agua en las debidas proporciones para que fragüe y endurezca. Para mejorar algunas prestaciones, en el momento del amasado se pueden añadir otros productos “aditivos” (reductores de agua, fluidificantes, colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, impermeabilizantes, ocluidores de aire, etc.) o materiales “adiciones” (fibras, cenizas, etc.). En este trabajo de investigación se estudian los hormigones fabricados con cemento como conglomerante.

En cada tipo de hormigón fabricado sus características pueden variar notablemente de acuerdo al cemento utilizado, de la proporción entre éste y el árido empleado, y de la incorporación de aditivos. De igual manera el modo en que se utilice el hormigón y el tratamiento que reciba su superficie repercuten en su apariencia y calidad.

La diferencia con los componentes de los morteros definidos anteriormente radica en la inclusión de árido grueso en la mezcla.

Como elemento estructural en obras de edificación y obra civil es muy generalizado su uso, debido a: a) las prestaciones de manipulación (docilidad) del hormigón fresco, y b) elevada resistencia a compresión del hormigón endurecido. Permite por tanto su colocación en multitud de formas y elementos en su estado fresco, y proporciona altas resistencias a compresión una vez fraguado y endurecido.

La Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)³⁸ recoge en su CAPÍTULO I PRINCIPIOS GENERALES, Artículo 5º “Requisitos”:

³⁸ BOE núm. 203, viernes 22 agosto 2008, pp. 35176-35178 REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08).

a) seguridad y funcionalidad estructural, consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que la estructura tenga un comportamiento mecánico inadecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso previsto, considerando la totalidad de su vida útil,

b) seguridad en caso de incendio, consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de la estructura sufran daños derivados de un incendio de origen accidental,

c) higiene, salud y protección del medio ambiente, en su caso, consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que se provoquen impactos inadecuados sobre el medio ambiente como consecuencia de la ejecución de las obras.

Para la consecución de los anteriores requisitos, deberán cumplirse las exigencias siguientes:

- **Exigencias relativas al requisito de seguridad estructural**

- **Exigencia de resistencia y estabilidad:** La resistencia y la estabilidad de la estructura serán las adecuadas para que no se generen riesgos inadmisibles como consecuencia de las acciones e influencias previsibles, tanto durante su fase de ejecución como durante su uso, manteniéndose durante su vida útil prevista. Además, cualquier evento extraordinario no deberá producir consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original.

- **Exigencia de aptitud al servicio:** La aptitud al servicio será conforme con el uso previsto para la estructura, de forma que no se produzcan deformaciones inadmisibles, se limite a un nivel aceptable, en su caso, la probabilidad de un comportamiento dinámico inadmisibles para la confortabilidad de los usuarios y, además, no se produzcan degradaciones o fisuras inaceptables. Se entenderá que la estructura tiene deformaciones admisibles cuando cumpla las limitaciones de flecha establecidas por las reglamentaciones específicas que sean de aplicación.

- **Exigencias relativas al requisito de seguridad en caso de incendio**

- **Exigencia de resistencia de la estructura frente al fuego:** La estructura deberá mantener su resistencia frente al fuego durante el tiempo establecido en las correspondientes reglamentaciones específicas que sean aplicables de manera que se limite la propagación del fuego y se facilite la evacuación de los ocupantes y la intervención de los equipos de rescate y extinción de incendios. En el caso de estructuras de edificación, la resistencia al fuego requerida para cada elemento estructural viene definida por lo establecido en el Documento Básico DB-SI del Código Técnico de la Edificación³⁹.

- **Exigencias relativas al requisito de higiene, salud y medio ambiente**

- **Exigencia de calidad medioambiental de la ejecución:** Cuando así se exija, la construcción de la estructura deberá ser proyectada y ejecutada de manera que se minimice la generación de impactos ambientales provocados por la misma, fomentando la reutilización de los materiales y evitando, en lo posible, la generación de residuos.

1.3.2 Componentes: características y normativa

Como en los morteros, los componentes de los hormigones son (Fig. 1.20):

- Conglomerante
- Áridos
- Aditivos
- Adiciones
- Agua

Fig. 1.20 Componentes de los hormigones

³⁹ BOE núm. 74, martes 28 marzo 2006, pp. 11816-11831 REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación

CONGLOMERANTE

CEMENTO

Como ya se ha manifestado anteriormente, el conglomerante utilizado para la fabricación de hormigones ha sido el cemento, el cual ha quedado descrito en el apartado de morteros.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)⁴⁰ especifica en su Artículo 26º “Cementos”: *El cemento deberá ser capaz de proporcionar al hormigón las características que se exigen al mismo en el Artículo 31º, en cuanto a su:*

- Composición
- Condiciones de calidad
- Características mecánicas
- Valor mínimo de la resistencia
- Docilidad del hormigón

En el ámbito de aplicación de dicha Instrucción, podrán utilizarse aquellos cementos que cumplan las siguientes condiciones:

- ✓ ser conformes con la reglamentación específica vigente,
- ✓ cumplan las limitaciones de uso establecidas en la Tabla 1.24, y
- ✓ pertenezcan a la clase resistente 32,5 o superior.

Tabla 1.24 Tipos de cemento utilizables.
Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

Tipo de hormigón	Tipo de cemento
Hormigón en masa	Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/BQ, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C
Hormigón armado	Cementos para usos especiales ESP VI-1 Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/BQ, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B
Hormigón pretensado	Cementos comunes de los tipos CEM I y CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M(V,P)

⁴⁰ BOE núm. 203, viernes 22 agosto 2008, pp. 35176-35178 REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).

A los efectos de la presente Instrucción, se consideran cementos de endurecimiento lento los de clase resistente 32,5N, de endurecimiento normal los de clases 32,5R y 42,5N y de endurecimiento rápido los de clases 42,5R, 52,5N y 52,5R.

ÁRIDOS

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) especifica en su Artículo 28º “Áridos”: *Las características de los áridos deberán permitir alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón que con ellos se fabrica, así como cualquier otra exigencia que se requieran a éste en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto. Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según UNE-EN 12620⁴¹, rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620 y, en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.*

Aunque los áridos no toman parte en el fraguado y endurecimiento de los hormigones, desempeñan un papel económico y técnico muy importante en sus características. Del volumen total del hormigón aproximadamente el 80% es ocupado por los áridos.

Dado que la presente investigación introduce la cáscara de almendra como agregado en la sustitución parcial de árido para la fabricación del hormigón valorando las propiedades finales del mismo resulta importante caracterizar adecuadamente los materiales a emplear como se detalla en el capítulo siguiente.

La bibliografía especializada sobre áridos, es extensa y variada, por lo que a continuación se resumen las características fundamentales que deben reunir los áridos empleados en la fabricación de hormigones.

⁴¹ UNE-EN 12620:2003+A1:200 9 Áridos para hormigón.

Naturaleza y procedencia de los áridos

En la Tabla 1.12 se recoge la clasificación de los áridos por tipo de roca. Como áridos para la fabricación de hormigones (EHE-08) pueden emplearse:

- **Áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas)**, según UNE-EN 12620, rodados o procedentes de rocas machacadas.
- **Escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620**. Se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos inestables.
- En general, **cualquier otro tipo de árido** cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.
- En el caso de **áridos reciclados**, se seguirá lo establecido en el Anejo nº 15 de la EHE-08.
- En el caso de **áridos ligeros**, se deberá cumplir lo indicado en el Anejo nº 16 de esta Instrucción EHE-08, y en particular, lo establecido en UNE-EN 13055-1⁴².

Dada su peligrosidad, sólo se permite el empleo de áridos con una proporción muy baja de sulfuros oxidables. Los áridos deben ser transportados y acopiados de manera que se evite su segregación y contaminación, debiendo mantener las características granulométricas de cada una de sus fracciones hasta su incorporación a la mezcla.

Designación de los áridos

A los efectos de la EHE-08, los áridos se designarán, de acuerdo con el siguiente formato (Tabla 1.25):

Tabla 1.25 Designación de los áridos.
Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

d/D Fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo, d, y un tamaño máximo, D, en mm.
IL Forma de presentación: R , rodado; T , triturado (de machaqueo); M , mezcla.
Preferentemente, se indicará también la naturaleza del árido (C , calizo; S , silíceo; G , granito; O , ofita; B , basalto; D , dolomítico; Q , traquita; I , fonolita; V , varios; A , artificial; R , reciclado), en cuyo caso, la designación sería: d/D – IL – N

⁴² UNE-EN 13055-1:2003 Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado.

Tamaños máximo y mínimo de un árido

La EHE-08 en su Artículo 28.3. denomina tamaño máximo **D** de un árido grueso o fino, la mínima abertura de tamiz UNE EN 933-2⁴³ que cumple los requisitos generales recogidos en la Tabla 1.26, en función del tamaño del árido.

Se denomina tamaño mínimo **d** de un árido grueso o fino, la máxima abertura de tamiz UNE EN 933-2 que cumple los requisitos generales recogidos en la Tabla 1.26, en función del tipo y del tamaño del árido. Los tamaños de los áridos no deben tener un D/d menor que 1,4.

Tabla 1.26 Requisitos generales de los tamaños máximo D y mínimo d.
Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

		Porcentaje que pasa (en masa)				
		2D	1,4 D ^(a)	D ^(b)	d	d/2 ^(a)
Árido grueso	$D > 11,2$ o $D/d > 2$	100	98 a 100	90 a 99	0 a 15	0 a 5
	$D \leq 11,2$ o $D/d \leq 2$	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
Árido fino	$D \leq 4$ y $d = 0$	100	95 a 100	85 a 99	-	-

^(a) Como tamices 1,4D y d/2 se tomarán de la serie elegida o el siguiente tamaño del tamiz más próximo de la serie.

^(b) El porcentaje en masa que pase por el tamiz D podrá ser superior al 99 %, pero en tales casos el suministrador deberá documentar y declarar la granulometría representativa, incluyendo los tamices D, d, d/2 y los tamices intermedios entre d y D de la serie básica más la serie 1, o de la serie básica más la serie 2. Se podrán excluir los tamices con una relación menor a 1,4 veces el siguiente tamiz más bajo.

Estudio granulométrico

La granulometría de los áridos es uno de los parámetros más importantes empleados para la dosificación del hormigón puesto que constituye su esqueleto y tiene una gran influencia sobre sus propiedades. La mayoría de los métodos de dosificación presentan especificaciones sobre las granulometrías óptimas que deben tener los áridos. El estudio consiste en determinar la distribución por tamaños de las partículas que lo forman, es decir, separar el árido en diferentes fracciones de partículas del mismo tamaño y hallar el porcentaje que entra de árido en cada una de dichas fracciones.

⁴³ UNE-EN 933-2:1996 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

Este estudio de la distribución por tamaños de un árido se realiza mediante cribado a través de una serie de tamices normalizados, norma UNE-EN 933-1:2012⁴⁴.

Al realizar el análisis granulométrico se inicia el cribado por el tamiz de mayor abertura de la serie, hasta llegar al tamiz límite que estará de acuerdo con los tamaños de los áridos analizados, en el caso de esta investigación es el de 0.063 mm.

La relación entre el peso retenido por cada tamiz con respecto al peso total de la muestra, proporciona el porcentaje retenido parcial de ese tamiz. Sin embargo lo realmente útil son los porcentajes retenidos acumulados, con los que se elaboran las curvas granulométricas.

Las curvas granulométricas permiten identificar el exceso de fracciones gruesas o finas o la presencia de discontinuidades en la distribución de tamaños. Si un árido posee granos en tamaños y cantidades tales que cada grupo de ellos está en condiciones de rellenar los huecos o vacíos dejados por los de tamaño inmediatamente superior, tal árido podrá adquirir por asentamiento compacidad máxima.

Cuando en un árido existen fracciones de todos los tamaños comprendidos entre el más pequeño y el mayor del mismo, se dice que el árido posee una "granulometría continua". Si, por el contrario, la continuidad de tamaños desaparece, faltando algunas fracciones, se dice que el árido posee "granulometría discontinua".

Se denomina "granulometría óptima" a la que, para una misma consistencia y relación agua/cemento, le corresponde un consumo mínimo de cemento, dando, además, el mínimo de segregación. Esta última exigencia no debe ser menospreciada puesto que, mezclas dóciles y que pueden producir hormigones resistentes y económicos pueden dar origen a que estos sean débiles, coquerosos y poco durables si se produce la segregación de los áridos.

⁴⁴ UNE-EN 933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

En principio, parece que las granulometrías óptimas deberían ser las que dejaran menos huecos o sea, las que diesen la máxima compacidad. Feret (1986), demostró que el mínimo de huecos corresponde a las granulometrías discontinuas, es decir, con falta de tamaños medios. Llegó a esta conclusión investigando arenas y las representó en diagramas triangulares. Asimismo, preparó numerosas mezclas de granos gruesos, medios y finos, cuyas compacidades determinó preparando un diagrama de curvas de isocompacidad, encontrando que las arenas con un solo tamaño de grano son las menos compactas; que la ausencia de finos conduce a compacidades escasas y que la arena era más compacta con un 60% de granos gruesos y un 40% de granos finos dando unos valores de compacidad por encima del 72,5%.

Más tarde, otro norteamericano, Fuller, ampliando los ensayos de Feret a áridos de cualquier tamaño, demostró que las granulometrías continuas proporcionaban hormigones más trabajables, con lo cual corrigió las teorías de Feret e hizo que se pasase al empleo de las granulometrías continuas. La representación gráfica de la ecuación resultante es la llamada Parábola de Gessner. Si la curva granulométrica de un árido propuesto coincide con la de Gessner, se dice que su graduación granular es óptima.

Bolomey y Otto Graf, llegan más lejos haciendo intervenir, por primera vez, al cemento como si fuese un árido fino y viendo la relación cemento/árido que daba lugar a la granulometría óptima. La representación gráfica de la ecuación resultante es la llamada Parábola de Bolomey. En definitiva, las granulometrías continuas dan lugar a hormigones más dóciles que las discontinuas requiriendo menos energía de compactación que éstas. Bolomey, perfecciona el método de Fuller al tener en cuenta la consistencia y la forma de los áridos. Cuanto mayor es la cantidad de cemento, menor será la cantidad de arena necesaria para sustituir el cemento a ésta en sus funciones de dar compacidad y docilidad. En el método de Bolomey, al existir más variación del tamaño de áridos, se adaptan mejor a la curva teórica, dando un hormigón de mayor calidad. La compacidad de un árido es la relación entre el volumen del mismo y su volumen de conjunto. A mayor compacidad menor volumen de huecos y cantidad de pasta de cemento para rellenarlos.

Las granulometrías de compacidad elevada se consiguen con mezclas relativamente pobres en fracciones finas de la arena y muchos gruesos, y que estas requieren poca agua de amasado. Sin embargo, estas granulometrías de elevada compacidad dan masas poco dóciles, que se disgregan con facilidad salvo que se disponga de medios energéticos adecuados de puesta en obra, consiguiéndose, en estos casos, hormigones muy durables y con poca retracción.

Para considerar que una curva está ajustada, no es necesario que coincidan las proporciones del árido compuesto para cada tamiz con todos los correspondientes a la curva teórica referenciada, si no que basta que, las áreas existentes entre la curva hallada y la teórica o de referenciada, situadas por encima y por debajo de esta coincidan, lo que es índice de que las dos curvas poseen el mismo módulo granulométrico. De todas formas, siempre se debe ajustar lo más posible la zona de la curva correspondiente a las arenas por la importancia que las mismas tienen en las propiedades del hormigón.

La composición de los áridos para que la granulometría de la mezcla se adapte a la curva de referencia, puede realizarse de varias formas; una muy simple, es mediante tanteos y otra más exacta que se fundamenta en los módulos granulométricos o de finura.

Árido fino y árido grueso

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) define como árido fino (arena) a la fracción del mismo que pasa por el tamiz de 4 mm⁴⁵, siendo árido grueso (grava) la fracción del mismo que queda retenida en este tamiz. De igual manera se pueden reconocer otros tamaños granulométricos, en las arenas cabe distinguir entre las gruesas de tamaño 2-4 mm y finas las comprendidas entre 0,063-2 mm; denominándose finos o "filler" a la fracción de tamaño inferior a 0,063 mm. Los finos se determinan mediante el ensayo reflejado en la norma UNE-EN 933-8:2012⁴⁶.

⁴⁵ UNE-EN 933-2:1996 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

⁴⁶ UNE-EN 933-8:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.

La arena es el árido de mayor incidencia en el comportamiento mecánico de los hormigones. Variaciones granulométricas en los áridos gruesos (gravas) influyen poco en la resistencia final de los hormigones fabricados, a igualdad en la relación agua/cemento; sin embargo, no ocurre igual con las variaciones en la granulometría de los áridos finos (arenas), ya que condicionan sensiblemente las propiedades del hormigón. En el caso de exceso de finos hace que la calidad del hormigón disminuya en todos los aspectos.

La resistencia de los áridos gruesos viene dada por la dureza, densidad, compacidad y módulo de elasticidad que éstos presentan.

Los áridos finos y gruesos influyen en la resistencia del hormigón como consecuencia de su dureza y de la adherencia con la pasta de cemento.

El grado de adherencia es importante, puesto que se da el caso de que ciertas calizas duras mejoran la resistencia del hormigón debido a la buena adherencia que presentan con la pasta, dando mayores resistencias que otros áridos más duros pero con menor adherencia a la misma. Este aumento de adherencia es consecuencia de un fenómeno epitáxico⁴⁷ que se produce entre la cal procedente del cemento y la propia caliza.

La influencia que sobre la retracción y fluencia tienen los áridos es muy importante, oponiéndose tanto más a estos fenómenos cuanto más resistentes sean y mayor sea su tamaño.

Densidad

Generalmente, los áridos tienen poros que pueden ser accesibles, abiertos o con comunicación con el exterior e, inaccesibles, cerrados o aislados del exterior. Esto hace que no se pueda hablar de una sola densidad del árido sino de varias que dependerán de que en el volumen que se esté contemplando se incluyan o no los dos tipos de

⁴⁷ Deposición de capas cristalinas sobre un sustrato también cristalino, entre la capa que crece y el sustrato queda un registro del crecimiento.

poros y que la muestra de árido esté seca en estufa o posea agua llenando sus poros abiertos, es decir, que se encuentre en el estado denominado saturada de agua pero con superficie seca.

Las densidades de las partículas de árido con tamaño comprendido entre 31,5 mm y 63 mm se determinan mediante el método de la balanza hidrostática siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 1097-6:2014⁴⁸.

Para obtener la densidad aparente del árido, se determina mediante la norma UNE-EN 1097-3:1999⁴⁹. Las densidades de las partículas de árido con tamaños comprendidos entre 4 mm y 31,45 mm, o entre 0,063 mm y 4 mm, se determinan mediante el método del picnómetro indicado también en la norma anteriormente referenciada.

Las densidades relativas y aparentes saturadas con superficie seca, son muy utilizadas en dosificación de hormigones.

La densidad de un hormigón, a igualdad de otros factores, dependerá de la de los áridos que entran en su composición lo cual es muy importante en la fabricación de hormigones ligeros, pesados e incluso convencionales.

Las densidades mencionadas se refieren a áridos aislados y es interesante conocerlas, porque van a decir mucho sobre las propiedades de los mismos y sobre la densidad que van a poseer los hormigones en los que se empleen, sin embargo, en obra no se usan partículas aisladas, sino conjuntos de ellas y entre las mismas existen huecos más o menos grandes dependiendo de la forma de éstas y de la variabilidad de los tamaños de las partículas que forman estos conjuntos. A la relación existente entre el peso de un conjunto de áridos y su volumen se denomina "densidad de conjunto". Esta depende de la densidad del árido, de la distribución de tamaños o granulometría del mismo, así como de la forma de los granos, de su humedad y de la forma y tamaño del

⁴⁸ UNE-EN 1097-6:2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

⁴⁹ UNE-EN 1097-3:1999 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

recipiente en el que se hace la determinación, así como también del grado de compactación que tengan estos granos dentro de él.

El conocimiento de la densidad de conjunto es interesante en el caso de dosificar el hormigón en volumen, en vez de en peso, así como en el caso de empleo de áridos ligeros o pesados.

Porosidad y absorción

La porosidad y absorción de los áridos tiene una gran influencia en su adherencia con la pasta de cemento y por tanto, en las resistencias mecánicas del hormigón. Igualmente, influye en el comportamiento de los áridos frente a los ciclos hielo-deshielo y en definitiva en su durabilidad.

En una partícula de árido, considerada independientemente, se puede definir como "porosidad" a la relación existente entre el volumen de huecos accesibles al agua y el volumen real de dicha partícula.

En el caso de un conjunto de granos o partículas, podemos definir la "oquedad" como la relación existente entre el volumen de los huecos comprendido entre los granos y el volumen de conjunto, y la "compacidad de conjunto" como la relación entre el volumen total de los granos y el volumen de conjunto de estos. La compacidad de conjunto es, por tanto, el complemento a uno de la oquedad.

Salvo que los poros sean de gran tamaño, lo normal es que la pasta de cemento no penetre en ellos debido a su alta viscosidad; sin embargo, sí lo hace el agua, especialmente si los áridos están secos y tanto más cuanto más capilares sean estos poros, restando de esta forma al hormigón agua de amasado, con lo cual se acusa en una ligera pérdida de docilidad de la masa, aunque, posteriormente, este agua sea devuelta al hormigón participando en su curado.

La EHE-08 exige que la absorción de agua por los áridos determinada según la norma UNE-EN 1097-6:2014⁵⁰ sea igual o inferior al 5 %. Para obtener la porosidad del árido, se determina mediante la norma UNE-EN 1097-3:1999⁵¹.

Humedad

Determinar la humedad que poseen los áridos, especialmente las arenas, es muy importante por la gran repercusión que puede tener ésta, en la relación agua/cemento real que se esté empleando en el hormigón.

De acuerdo con el contenido de agua de los áridos estos pueden clasificarse en:

- **Secos en estufa**, a temperatura superior a 100° C, hasta peso constante.
- **Húmedos o secos al aire**, es decir, sin humedad superficial pero sí interna.
- **Saturados con superficie seca**, es decir, sin presentar agua libre superficial.
- **Mojados**, con agua libre en la superficie.

En los dos primeros estados, los áridos pueden absorber más agua y de hecho así ocurre al fabricar el hormigón; en el último estado, es decir, cuando los áridos están mojados ceden agua a los demás componentes del hormigón.

La importancia de la humedad de los áridos y especialmente de la arena, es muy grande por el efecto negativo que puede tener en las resistencias del hormigón salvo que se hagan las oportunas correcciones. La humedad del árido se determinara mediante la norma UNE-EN 1097-5:2009⁵².

Entumecimiento

El entumecimiento de las arenas es el incremento de volumen que experimentan cuando se humedecen. Al aumentar la cantidad de agua contenida en una arena hasta un determinado límite, el volumen de conjunto de la misma crece como consecuencia de la película de agua que envuelve a cada uno de los granos.

⁵⁰ UNE-EN 1097-6:2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

⁵¹ UNE-EN 1097-3:1999 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

⁵² UNE-EN 1097-5:2009 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa.

El entumecimiento de una arena depende no sólo de la humedad que contenga ésta sino también de su finura. El aumento de volumen llega a ser del 20 al 30% para contenidos de humedad del 5 al 8% aunque con arenas muy finas puede llegarse a entumecimientos del 40%.

Los áridos gruesos experimentan un entumecimiento muy reducido debido a que el espesor de la película de agua es muy pequeño en comparación con el tamaño del árido.

Resistencias mecánicas

Un hormigón no puede tener más resistencia a compresión que la que tienen los áridos que lo forman. Resulta difícil determinar las resistencias mecánicas de los áridos aislados lo que obliga a tener que recurrir a realizar determinaciones indirectas, bien a través de probetas talladas de las rocas de las que proceden, bien determinando mediante un ensayo a compresión el "índice de machacabilidad" de un conjunto de áridos introducidos en un molde muy rígido o bien mediante el ensayo a compresión de un hormigón confeccionado con los áridos a estudiar.

A veces es conveniente emplear áridos de bajo módulo de elasticidad, es decir, deformables, debido a que no dan lugar a fuertes tensiones cuando está sometido el hormigón a grandes variaciones térmicas o higrométricas; con áridos muy rígidos estas tensiones provocarían la fisuración de la pasta de cemento o la pérdida de adherencia de ésta con aquellos.

Dureza

El conocer la dureza y resistencia al desgaste es también importante en determinados casos, por ejemplo en pavimentos. Los ensayos empleados en su determinación pueden ser de abrasión en pista de acero o bien de desgaste por rozamiento de unas partículas de rocas contra otras. Uno de los métodos más empleados es el ensayo denominado "Los Ángeles", norma UNE-EN 1097-2:2010⁵³.

⁵³ UNE-EN 1097-2:2010 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

El ensayo de Los Ángeles es muy útil debido a que da una buena correlación, no sólo con el desgaste por abrasión del árido en el hormigón sino también con la resistencia a compresión del mismo. La Instrucción EHE-08 indica que el coeficiente de Los Ángeles debe ser ≤ 40 . Otro método empleado para gravas y arenas es el ensayo UNE-EN 1097-1:2011⁵⁴, que permite conocer su resistencia a la fragmentación mediante la determinación del coeficiente de friabilidad de las mismas.

Forma

La forma externa del árido tiene una gran influencia en algunas de las propiedades del hormigón fresco y endurecido, como pueden ser, entre otras, la docilidad y las resistencias mecánicas, respectivamente.

Dado que las partículas de un árido se pueden asimilar a cuerpos de tres dimensiones es difícil describir la forma de las mismas, aunque, en una clasificación muy escueta cabe dividir las en: redondeadas o rodadas; angulosas que son las que presentan ángulos, aristas vivas y superficies más o menos planas; planas o laminares que son aquellas en las que predominan dos dimensiones sobre la otra.

Con áridos redondeados o rodados se obtienen hormigones muy dóciles y tanto más resistentes cuanto más se aproxime la forma de aquéllos a la esfera. Los áridos machacados, por el contrario, dan lugar a hormigones menos trabajables aunque el efecto será tanto menor cuanto más se aproximen a poliedros regulares de mayor número de caras. Los áridos laminares dan lugar a hormigones de peor calidad puesto que estas formas no sólo influyen en las resistencias sino que, además, como ocurre en los áridos laminares, tienden a orientarse en un plano acumulando debajo de ellos agua y aire lo que repercute desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones.

La forma del árido se determina mediante su "índice de lajas", según la norma UNE-EN 933-3:2012⁵⁵. Con este ensayo se halla el contenido de áridos con formas laminares o aciculares. El valor de dicho índice debe ser inferior a 35.

⁵⁴ UNE-EN 1097-1:2011 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval).

⁵⁵ UNE-EN 933-3:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

Otro método eficaz de medir la forma de los áridos es mediante el "coeficiente de forma", según la norma UNE-EN 933-4:2008⁵⁶.

Textura superficial

Los áridos presentan texturas superficiales muy variadas que oscilan desde la pulida hasta la cavernosa pasando por la suave, granular, rugosa y cristalina.

La textura superficial depende de la naturaleza de la roca de origen, de su dureza, tamaño de los granos, porosidad, etc., así como de las acciones a que hayan estado sometidas las partículas.

La textura superficial del árido, junto con su forma, tiene una gran influencia en las resistencias del hormigón, repercutiendo más en la resistencia a flexotracción que en la de compresión, especialmente cuando se quieren obtener hormigones de altas resistencias. Este efecto parece ser debido a que cuanto más rugoso es un árido mayor superficie de contacto tiene con la pasta de cemento y por consiguiente, mayor adherencia presentará con ella.

Adherencia árido-pasta

La adherencia de la pasta de cemento al árido depende de su forma, porosidad, naturaleza y especialmente, de su estado superficial. La superficie del árido debe ser la adecuada. La presencia en ella de arcilla es indeseable debido a que contribuye a disminuir la resistencia a tracción por falta de adherencia. Su eliminación debe hacerse por lavado.

La adherencia mecánica que permite la unión a escala macroscópica depende del estado superficial de los áridos. Es mayor cuanto más rugosa es la superficie y así, los áridos machacados proporcionan la mayor adherencia y resistencia a tracción.

⁵⁶ UNE-EN 933-4:2008 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.

Sustancias perjudiciales

a) *Impurezas orgánicas*

Un árido con buenas resistencias, puede que no deba utilizarse en la fabricación de hormigón por contener impurezas orgánicas que retrasen el fraguado del cemento o incluso, repercutan desfavorablemente en sus resistencias al alterar las reacciones de hidratación del mismo. La forma de conocer su efecto sobre el hormigón es determinando la resistencia que dan las probetas de éste hechas con él y compararlas con las que da el mismo hormigón en el que se han utilizado áridos no contaminados.

b) *Arcillas y partículas finas*

Sí los áridos tienen depositados sobre sus superficies partículas finas tales como polvo, arcilla o finos procedentes del propio machaqueo de éstos, la adherencia con la pasta de cemento queda muy disminuida e incluso, los hormigones y morteros hechos con ellos, pueden exigir mayor cantidad de agua de amasado como consecuencia del pequeño tamaño de estos finos.

La EHE-08 limita el contenido máximo, en peso, de finos que pasan por el tamiz de 0,063 mm, según se trate de árido fino o grueso, rodado o procedente machaqueo de rocas calizas o no calizas, y del tipo de exposición a que vaya a estar expuesto el hormigón.

Existe un ensayo sencillo de realizar en obra para hallar la cantidad de partículas finas procedentes de machaqueo o de contaminación arcillosa en una arena, es el ensayo denominado "equivalente de arena", norma UNE-EN 933-8:2012⁵⁷ realizado sobre el árido fino.

⁵⁷ UNE-EN 933-8:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.

ADITIVOS Y ADICIONES

En los ANEXOS de este documento se detallan cada uno de estos componentes.

AGUA

El agua es el segundo componente del hormigón, empleándose en el amasado del mismo y en su curado. El agua de amasado participa en las reacciones de hidratación del cemento y además confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para su correcta puesta en obra. Dependiendo que se utilice con uno u otro fin se le exigirán unas u otras características.

Hay cuatro tipos de aguas:

- **Naturales:** se encuentran en la superficie de la tierra y nunca son puras. Pueden ser:
 - **Agua de lluvia:** tiene indicios de sales minerales (nitratos y nitritos).
 - **Aguas de superficie o subterráneas:** son aguas con contenidos de CO₂, sulfatos, cloruros, nitritos, nitratos, sales de calcio y sustancias orgánicas.
 - **Aguas de mar:** contiene muchas sales (35 g/l). La EHE-08 expresa que podrán emplearse aguas de mar o aguas salinas análogas para el amasado o curado de hormigones que no tengan armadura alguna. Salvo estudios especiales, se prohíbe expresamente el empleo de estas aguas para el amasado o curado de hormigón armado o pretensado.

- **Aguas potables:** Aquellas que son aptas para beber. Es necesario que contengan en solución algunos gases como aire y CO₂, sales de K, Na, Ca y Mg (generalmente en forma de bicarbonatos), algo de cloruros y fluoruros y pequeña cantidad de sílice para igualar los líquidos del organismo humano. Deberá tener un pH=7.

- **Aguas minerales:** contienen sustancias especiales en solución en cantidades relativas importantes.

- Agua de amasado

El agua que se añade en la hormigonera, junto con los demás componentes del hormigón, tiene las siguientes misiones: una primera, de hidratación de los componentes activos del cemento; una segunda, de actuar como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable y, una tercera, de creadora de espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

Para que un agua sea apta para el amasado de un hormigón debe estar limpia y encontrarse libre de impurezas por encima de determinados límites a fin de que no se produzcan alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en su fraguado y endurecimiento, reducciones en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad (Cánovas F., M., 2013).

La EHE-08 recoge en su Título 3º. Propiedades tecnológicas de los materiales. Capítulo VI. Materiales. Artículo 27º que: El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.

En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas, y salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al hormigón, deberán cumplir las siguientes condiciones:

- exponente de hidrógeno pH (UNE 83952:2008)⁵⁸ ≥ 5
- sustancias disueltas (UNE 83957:2008)⁵⁹ ≤ 15 gramos por litro (15.000 ppm)
- sulfatos, expresados en SO_4^{2-} (UNE 83956:2008)⁶⁰, excepto para el cemento SR en que se eleva este límite a 5 gramos por litro (5.000 ppm) ≤ 1 gramo por litro (1.000 ppm)

⁵⁸ UNE 83952:2008 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Determinación del pH. Método potenciométrico.

⁵⁹ UNE 83957:2008 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Determinación del residuo seco.

⁶⁰ UNE 83956:2008 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Determinación del contenido en ion sulfato.

- ión cloruro, Cl^- (UNE 83958:2014)⁶¹:

a) para hormigón pretensado ≤ 1 gramo por litro (1.000 ppm)

b) para hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración ≤ 3 gramos por litro (3.000 ppm)

- hidratos de carbono (UNE 83959:2014)⁶² = 0

- sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 83960:2014)⁶³ ≤ 15 gramos por litro (15.000 ppm) realizándose la toma de muestras según la UNE 83951:2008⁶⁴ y los análisis por los métodos de las normas indicadas.

- Agua de curado

Las aguas adecuadas para el amasado lo son también para el curado.

1.3.3 Propiedades del hormigón fresco

Las propiedades más características del hormigón fresco son: la consistencia, la docilidad y la homogeneidad. A continuación se realiza una breve explicación de estas características y cómo influyen en el hormigón endurecido.

Consistencia y docilidad

Cuando el hormigón está endurecido, los áridos que, generalmente, son los componentes más pesados quedan encapsulados por la pasta de cemento, pero cuando el hormigón está fresco estos componentes no se encuentran ligados por ella y por las acciones del transporte y puesta en obra pueden separarse con facilidad dando lugar a problemas de "segregación" y de "exudación". La composición de la masa va a tener una gran importancia en la cohesión de los componentes al igual que la va a tener en la oposición que presente para experimentar deformaciones, es decir, en su "consistencia"; desde este punto de vista, la forma, granulometría, y tamaño máximo del árido, así como la dosificación de cemento, cantidad de agua de amasado y

⁶¹ UNE 83958:2014 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Determinación del contenido en cloruros.

⁶² UNE 83959:2014 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado. Determinación cualitativa de hidratos de carbono.

⁶³ UNE 83960:2014 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado. Determinación del contenido de sustancias orgánicas solubles en éter.

⁶⁴ UNE 83951:2008 Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Toma de muestras.

eventual empleo de aditivos, tienen una influencia muy elevada en estas propiedades (Cánovas F., M., 2013).

Por otra parte, la resistencia de un hormigón de composición fija, colocado en un molde determinado con los medios disponibles de compactación, depende del grado de compactación que tenga, y éste, a su vez, es proporcional a la aptitud de ese hormigón para colocarse en ese molde y con esos medios de compactación, es decir, a su "docilidad".

Indiscutiblemente ambas propiedades: consistencia y docilidad, no son totalmente independientes sino que están relacionadas lo que permite tomar la consistencia como un índice de la docilidad al ser de más fácil medida que ésta.

Al estar ambas relacionadas para un tipo de elemento determinado, se puede decir que de la consistencia van a depender la mayor parte de las características de un hormigón, como son: la cohesión, compacidad, densidad, resistencias mecánicas, impermeabilidad, acabado superficial, etc. Debido a su importancia, la consistencia de un hormigón debe ser considerada en el proyecto, como una cualidad tan importante como la propia resistencia.

La EHE-08 en su Título 3º. Propiedades tecnológicas de los materiales. Capítulo VI. Materiales. Artículo 31.5 expresa que: La docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan coqueras.

La docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia según UNE-EN 12350-2:2009⁶⁵. Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono, serán los siguientes (Tabla 1.27):

⁶⁵ UNE-EN 12350-2:2009 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

Tabla 1.27 Distintas consistencias y valores límite del asentamiento del cono.
Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Salvo en aplicaciones específicas que así lo requieran, se evitará el empleo de las consistencias seca y plástica. No podrá emplearse la consistencia líquida, salvo que se consiga mediante el empleo de aditivos superplastificantes.

Homogeneidad

El hormigón es una mezcla de componentes sólidos muy diferentes y de un líquido, por consiguiente y por su propia naturaleza, tiene que ser un material heterogéneo; sin embargo, al decir que un hormigón debe ser homogéneo se indica que debe ser uniformemente heterogéneo, es decir, que en cualquier parte de su masa los componentes del hormigón deben estar perfectamente mezclados y en la proporción prevista al diseñar la mezcla (Cánovas F., M., 2013).

La mezcla adecuada de los componentes del hormigón y la homogeneidad de la masa se logran en la amasadora y hormigonera pero, esta mezcla puede dislocarse, dando lugar a que los elementos constitutivos del mismo tiendan a separarse unos de otros y a decantarse de acuerdo con su tamaño y densidad. A este fenómeno se le denomina segregación, y es indeseable, no sólo porque puede dar lugar a hormigones con coqueras, sino, también por la gran repercusión negativa que tiene en la durabilidad y en las resistencias mecánicas. La "exudación" es una forma de segregación en la que el agua tiende a elevarse hacia la superficie del hormigón como consecuencia de la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos al irse compactando. Esta agua crea en la superficie del hormigón una capa delgada, débil y porosa que no tiene resistencias ni es durable.

1.3.4 Dosificación de hormigones

Los métodos de dosificación de hormigones tienen por finalidad encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes componentes de los mismos para conseguir mezclas que posean determinadas características de: consistencia, compactadad, resistencia, durabilidad, etc. (Fig. 1.21).

Fig. 1.21 Esquema del proceso de dosificación del hormigón.
Fuente: Jiménez Montoya; Arroyo Montero; Morán Cabré; García Meseguer

El cálculo teórico de las proporciones en que hay que mezclar a los componentes no exime de la comprobación experimental para la puesta a punto de la composición a adoptar, esto es debido a que ningún método de dosificación puede tener en cuenta la gran cantidad de factores que influyen en las propiedades del hormigón a conseguir.

No existe un método único de dosificación sino que dependiendo de las condiciones que deba reunir el hormigón, y de las características de los propios componentes del mismo, el proyectista podrá elegir uno entre varios de los muchos existentes y los resultados que se consigan con él serán buenos cuando éste se haya seleccionado

convenientemente y se hayan realizado las correcciones oportunas, después de hacer masas de prueba.

Los métodos de dosificación pueden dividirse en dos grupos fundamentales: uno, formado por los que tienen como dato principal de partida la dosificación de cemento, teniendo además en cuenta otras características como pueden ser la consistencia, tamaño máximo del árido a emplear, tipos de áridos, aire ocluido en determinadas proporciones, clase de ambiente, etc., el cual fue elegido para realizar las dosificaciones en este proyecto, y otro, formado por los que se basan en las propiedades del hormigón, especialmente la resistencia a compresión y a la que deben acompañar otros datos como los indicados anteriormente para los hormigones definidos por su dosificación de cemento (Cánovas F., M., 2013). Los métodos de dosificación en los que se fija la cantidad de cemento por m^3 son:

- Método de Fuller (utilizado en este trabajo de investigación)
- Método de Bolomey
- Método de Faury

Como se ha indicado al dosificar un hormigón deben tenerse en cuenta tres factores fundamentales, a partir de los cuales deben determinarse las cantidades necesarias de agua, cemento y áridos para obtener el hormigón deseado al más bajo coste posible:

- La resistencia
- La consistencia
- El tamaño máximo del árido

Según el esquema representado en la Fig. 1.21 el orden a seguir en la dosificación de un hormigón sería:

1. Fijar la resistencia característica del hormigón de acuerdo con las condiciones previstas para la ejecución de la obra.
2. Elección del tipo de cemento en función de la clase de obra, la agresividad del medio y las condiciones climáticas.
3. Determinación de la relación agua/cemento que corresponde a la resistencia media del hormigón, según el tipo de cemento y áridos empleados.
4. Determinación del tamaño máximo del árido, en función de los distintos elementos de la obra.

5. Estudio de la consistencia más conveniente del hormigón, según la forma de compactación en obra y como consecuencia, fijar la cantidad aproximada de agua determinando la correspondiente cantidad de cemento.
6. Establecer la proporción en la que han de mezclarse los áridos disponibles para que la curva granulométrica del árido total sea la más conveniente al hormigón en estudio.
7. Cálculo de las cantidades de agua, cemento y áridos necesarias para la obtención de 1 m³ de hormigón.
8. Efectuar amasados de prueba para comprobar si el hormigón obtenido tiene las características deseadas y en caso contrario, hacer las correcciones necesarias.

1.3.5 Tipos de hormigones

Tabla 1.28 Clasificación de los hormigones según su uso.

Fuente: Apuntes de hormigón armado adaptados a la EHE-08 (Varona Moya, F.; et al, 2012)

USO ESTRUCTURAL	
Hormigones convencionales (HA)	Aquellos de resistencias características a compresión no superiores a 50 MPa; para su aplicación en estructuras de hormigón armado y pretensado, la resistencia característica deberá ser igual o superior a 25 MPa.
Hormigones de alta resistencia (HA)	Son hormigones convencionales con resistencias características entre 50 y 100 MPa.
Hormigones con fibras (HRF)	Un hormigón reforzado con fibras incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas de acero o materiales poliméricos; la adición de fibras, que no deberá superar el 1,5% en volumen, es admisible en hormigón en masa, armado o pretensado; el aporte de fibras puede obedecer a un fin estructural, como la mejora del comportamiento en “Estados Límite Últimos” a edades tempranas o con el hormigón ya endurecido; también puede obedecer a fines no estructurales como la mejora de la resistencia al fuego, el control de la fisuración o la modificación de otras propiedades no estructurales.
Hormigones reciclados (HR)	Dada la posibilidad de reciclar áridos procedentes de la demolición de obras de hormigón y emplearlos en nuevas realizaciones, la EHE-08 admite el empleo de áridos reciclados en una nueva obra hasta un 20% del peso total de áridos sin que deban modificarse las propiedades y bases de cálculo para un hormigón convencional; el hormigón reciclado puede emplearse para estructuras de hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 MPa, no pudiendo utilizarse para hormigón pretensado.
Hormigón ligero estructural (HLE)	Se trata de hormigones que poseen una cierta proporción de árido ligero, natural o artificial y cuya densidad está entre 1.200 y 2.000 kg/m ³ , siendo inferior a la de un hormigón convencional; sin embargo, debido a la naturaleza de los áridos ligeros, la densidad en estado fresco puede ser superior; la resistencia característica mínima es de 15 o 20 MPa y la máxima es de 50 MPa, aunque existe constancia de experiencias con hormigones ligeros de alta resistencia; suelen necesitar de una compactación más enérgica que los convencionales, pero no deberá ser excesiva, ya que puede favorecer la flotabilidad de los áridos; son hormigones adecuados cuando se trate de elementos poco cargados y en los que el peso propio suponga una fracción importante de la carga total (p.ej. cubiertas); también debe considerarse su uso en el caso de losas de hormigón soportadas por estructuras rehabilitadas, en cerramientos resistentes, etc.
Hormigones de alta densidad	Al contrario que los hormigones ligeros, éstos poseen áridos de alta densidad, naturales o sintéticos (bolas de acero, escorias pesadas, etc.), que le confieren

	al hormigón una densidad superior a la del hormigón convencional, en torno a 2.800 a 3.500 kg/m ³ ; sus ámbitos de aplicación son fundamentalmente la protección radiológica (hospitales, centrales nucleares, etc.) y el efecto de "lastre" (losas de cimentación, contrapesos de puentes móviles, etc.); estos hormigones pueden necesitar de técnicas especiales para su puesta en obra, para evitar la tendencia a la segregación que tienen los áridos pesados.
Hormigones autocompactantes (HA/AC)	Como su propio nombre indica, son aquellos que no precisan de ningún aporte de energía de vibración para lograr su compactación, sino que ésta se consigue gracias exclusivamente al peso propio; un hormigón autocompactante fresco debe ser capaz de fluir hasta ocupar todo el volumen del elemento sin que se produzca segregación, bloqueo del árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada. Estos hormigones deben aplicarse en piezas cuyo hormigonado sea difícil debido a una gran densidad de armado; no deben emplearse áridos con D > de 25 mm, pero se aconseja que el tamaño máximo esté entre 12-20 mm; además del árido grueso y del árido fino necesitan de una tercera fracción de filleres; su docilidad no puede medirse igual que la de los hormigones convencionales y llevan asociados una serie de ensayos específicos (escurrimiento, caja en L, etc.); estos hormigones necesitan de aditivos superfluidificantes y moduladores de la viscosidad.
Hormigones proyectados	Se trata de hormigones que se proyectan a gran velocidad contra un encofrado, por lo que necesitan de dosificaciones muy especiales para paliar el problema de la segregación del árido; en Norteamérica este tipo de hormigón se denomina <i>shotcrete</i> (<i>shot</i> se traduce como disparo) y en España se ha popularizado con el nombre de <i>gunita</i> (del inglés <i>gun</i> , pistola); existen dos tipologías de pistola de proyección, de rotor o de pistón (flujo denso), siendo ésta a la que más se tiende en la actualidad; además del inconveniente de la segregación del árido, este tipo de hormigones presentan otros problemas como la pérdida de material durante la proyección del hormigón fresco y la gran emisión de polvo; no obstante, son especialmente indicados para la ejecución de bóvedas de túneles y taludes para contención de tierras.

USO NO ESTRUCTURAL

Hormigón de limpieza (HL)	Es un hormigón que tiene como finalidad el evitar la desecación del hormigón estructural durante su vertido así como una posible contaminación de éste durante las primeras horas de su hormigonado (p.ej. la capa de hormigón de limpieza previa a la ejecución de un elemento de cimentación).
Hormigón no estructural (HNE)	Es un hormigón que tiene como fin conformar volúmenes de material no resistente (p.ej. aceras, bordillos, rellenos, etc.).
Hormigón para acabados con árido visto	Empleados fundamentalmente en pavimentos rugosos y antideslizantes, resistentes a los agentes atmosféricos; se puede conseguir una amplia gama de efectos estéticos combinando áridos de distintos colores y con distintos ataques de profundidad.
Hormigón traslúcido	Inventión del Arquitecto húngaro Áron Losonczi (2005), en la que se combina el hormigón con fibras ópticas de cristal orientadas (hasta un 4% de volumen); es un material apto para bloques de hormigón en masa, aunque la particularidad de que las fibras deban estar orientadas complica y compromete estructuralmente la intersección de elementos verticales y horizontales, especialmente si están armados; por esta razón no es adecuado para su uso estructural en la actualidad.

1.4 BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC)

En este epígrafe se realiza una breve introducción en los denominados bloques de tierra comprimida dado que la incorporación de residuos orgánicos como la cáscara de almendra en su condición de agregado podría generar el interés de desarrollar futuras líneas de investigación orientadas a evaluar su aplicación en estos elementos constructivos.

1.4.1 Definición

A lo largo de la evolución en los sistemas constructivos se ha evidenciado la potencialidad de la tierra como material de construcción. Una variedad de obras a nivel mundial ratifica este uso. Sin embargo, las tendencias de la sociedad moderna pretenden olvidar una técnica constructiva que se encuentra al alcance de muchos constituyendo una fuente inagotable de recursos.

Desde la antigüedad la tierra ha sido el material de construcción mayormente utilizado con mayor siendo fundamento de una de las tecnologías mejor adaptadas al medioambiente y al pensamiento contemporáneo de concebir los sistemas de construcción sostenible.

Entre los materiales utilizados se encontraban grumos de barro, lodo, piedras, madera y fibras naturales, en clara relación con sistemas constructivos tradicionales. Mayoritariamente se empleaban tierra o barro, cuya granulometría y humedad determinan la elección del sistema constructivo.

Desde la visión de la arquitectura sostenible, resulta obligado recuperar la tierra como material de construcción. El desarrollo de nuevas y mejoradas técnicas facilita que este tipo de sistema constructivo sea competitivo, aprovechando muchas de las ventajas que ofrece, como son: la abundancia de materia prima, la localización y disponibilidad de la misma, el reciclaje, la producción sin consumo de energía, el bajo costo y parámetros resistentes, aparte de sus propiedades aislantes, térmicas y acústicas.

Todo ello conlleva a valorar construcciones sostenibles desde el punto de vista medioambiental.

Al adicionar a la tierra algún agregado, el material puede ser moldeado con el fin de obtener las características deseadas. Tal y como se ha expresado, los avances tecnológicos implementados a esta modalidad de construcción, permiten desarrollar proyectos arquitectónicos cuya material a emplear es la tierra cruda.

Debe destacarse la presencia en la actualidad de la tierra cruda en la edificación. En los países con mayor necesidad de viviendas y menos recursos como sucede en casi toda África, Oriente Medio y América Latina, la tierra es el material de construcción que predomina. En China e India hay más de 50 millones de casas de tierra. En zonas como Europa, sin embargo, la tierra está prácticamente ignorada en la construcción nueva, aunque forma parte del paisaje cotidiano en muchas regiones rurales donde todavía se mantienen viviendas y patrimonio de tierra.

Dada la heterogeneidad del suelo, considerando su uso como materia prima, este debe tener en su composición bajos contenidos de material orgánico y de arcilla expansiva, ya que con la absorción y secado del agua dichas arcillas incrementan su volumen favoreciendo la aparición de grietas. La tierra contiene arenas, limos y arcillas, y agua y aire. Con adecuadas estabilizaciones el grado de cohesión es mejorado. De ello se desprende que de acuerdo al tipo de arcilla que el suelo contenga se obtendrá la humedad óptima de compactación y por ende el sistema constructivo a emplear. El proceso de estabilización puede ser homogéneo o heterogéneo dependiendo del tipo de material que se incorpora para obtenerla. Así, para graduar la cohesión de los materiales, es la arcilla o la arena los materiales agregados, siempre en estado seco y semejantes al material a estabilizar.

Cuando por el contrario se trata de un proceso heterogéneo son otros diferentes materiales los que se incorporan con el mismo objetivo, aportar estabilización al suelo.

El tipo de estabilizador utilizado debe cumplir alguna de las siguientes funciones (Bestraten, S., *et al.*, 2011):

Incrementar los parámetros de resistencia a compresión e impacto de la construcción de tierra, reduciendo su tendencia a la dilatación o contracción al aglutinar las partículas de suelo unas con otras. Son los denominados estabilizadores consolidantes ya que enlazan las granulometrías finas manteniéndolas unidas. La cal es uno de los mejores estabilizantes por consolidación, debido a que liga las partículas del suelo, aumentando su resistencia a los esfuerzos compresión y cortante; también disminuye la absorción del agua. La cal no modifica la porosidad, y la tierra no pierde su adherencia. En cuanto a sustancias orgánicas, algunas cumplen la función de aglutinantes, presentes en vegetales. En el caso de este trabajo de investigación el consolidante utilizado ha sido el cemento.

Reducir expansiones y contracciones excesivas al realizar el refuerzo con la adición de fibras. Con los estabilizantes por fibras se controla el comportamiento de dilatación y retracción o contracción durante el fraguado; este consiste en la adherencia de material fibroso a la tierra, formando redes al unirse. Estas fibras pueden ser de origen vegetal, como paja, diferentes gramíneas, virutas de madera, acículas de pináceas, cáscaras de coco, tallos del maíz y fibras de pita o fique, o de origen animal, como lana, crines de caballo, etc. El material agregado debe estar seco, para evitar que se descomponga. Las fibras como estabilizantes impiden la aparición de fisuras y siguen actuando con el tiempo; también cumplen la función de articular la estructura y volverla flexible ante movimientos sísmicos. En el caso de este trabajo de investigación el estabilizante utilizado ha sido la cáscara de almendra, cuyo residuo orgánico centra la atención acerca de su posible incorporación como agregado y estabilizante..

Reducir o en su caso eliminar completamente la absorción de agua, la cual es responsable de dilataciones, contracciones y erosión, sellando todos los vacíos y poros que pudieran existir, y cubriendo las partículas de arcilla con una película de carácter impermeable. Su función es aislar el exceso de agua por capilaridad y por lluvia. Los impermeabilizantes actúan como una capa sobre las arcillas, regulando el paso del agua y evitando así que las arcillas expansivas actúen. Las grasas, de tipo vegetal, animal o fósil, son parte de los materiales usados como impermeabilizantes. La cantidad debe ser la apropiada para que no interfieran con el comportamiento de las arcillas.

Reducir el agrietamiento dándole la flexibilidad necesaria que permitirá que el suelo se expanda o contraiga en algún grado.

El efecto de la estabilización se incrementa generalmente cuando el suelo se compacta. Algunas veces la compactación sola es suficiente para estabilizar el suelo, sin embargo, sin un estabilizador apropiado, el efecto puede no ser permanente, particularmente en el caso de una mayor exposición al agua.

El uso de la tierra como material constructivo puede ir desde las paredes, hasta los revocos y los suelos. El material empleado deberá tener una composición determinada para poder aprovechar correctamente las características plásticas idóneas, o la utilización de los posibles estabilizantes de la tierra (desde la paja o la cal, al cemento, etc.).

En cuanto a la granulometría del suelo resulta importante que su curva granulométrica no sea uniforme. Ello implica que los huecos entre partículas son rellenados y que al ser sometidos a un proceso de apisonamiento se logra obtener una masa densa y suficientemente compacta donde la gravilla dentro de la fábrica de tierra proporciona valores de resistencia mecánica, adecuados. Todo ello debido a la proporcionalidad entre densidad obtenida y resistencia alcanzada. Una distribución homogénea de los componentes en la masa permitirá conseguir la mayor compacidad. Por otra parte con la tierra en estado seco, los limos no llegan a aportar cohesión, por el contrario si lo harán al estar la tierra suficientemente húmeda. Ello conlleva incrementos de volumen en presencia de agua y las consiguientes retracciones del material al producirse la desecación.

Dada la naturaleza de los materiales y el sistema constructivo hay que considerar que las tierras a utilizar serán las provenientes del lugar de emplazamiento de la obra. De lo contrario, no se estaría compartiendo el fundamento que se deriva de este tipo de fábricas. Un cribado adecuado permitirá compensar el reparto granulométrico, añadiendo o quitando las fracciones que correspondan. Ello obliga a un correcto amasado que homogeneice la tierra previo su sometimiento a moldeado del elemento previsto a construir. Se consideran tierras adecuadas para este tipo de fábricas aquellas cuyas proporciones en volumen son:

- Limos, del 20 al 30%
- Arcilla, del 15 al 25%
- Gravilla, hasta un 15%
- Arena, del 40 al 50%

Las experiencias en cuanto a la proporción de estos componentes para obtener óptimos resultados, indican relaciones limo/arcilla próximas a la unidad, con un

contenido global de ambas fracciones granulométricas en el intervalo 30-50% del total. Las fracciones de arena y grava se encontrarían entre el 55-65% del total.

Los diversos componentes mineralógicos de las arcillas aportan a cada tipo de suelo propiedades específicas muy diferentes, por lo que es necesario identificar estos minerales cuya presencia variará dependiendo del lugar de procedencia del suelo utilizado. Entre estos componentes mineralógicos de las arcillas se encuentran la illita, caolinita, vermiculita, montmorillonita, entre otros.

1.4.2 Tipologías constructivas a base de tierra

Existen diferentes técnicas para trabajar la tierra cruda, y la mayoría de ellas son técnicas ancestrales que se han mantenido con pequeños cambios desde la antigüedad hasta nuestros días, aunque otras son aportaciones modernas (RED CONSTRUTIERRA, 2012).

BTC (bloques de tierra comprimida): son elementos prismáticos usados en obras de fábrica, se obtienen de aplicar presión a la tierra en el interior de un molde, de esta forma se mejora las propiedades mecánicas del material. Suelen emplearse estabilizados con cal, cemento o yeso. Lo característico de este tipo de bloques de tierra, como indica su nombre, es que la tierra que los compone es compactada, por medios manuales o mecánicos.

El BTC es de fácil producción, y para que su desempeño estructural tenga mayor estabilidad se mezcla con una parte de cemento y arena, y se realizan ensayos para determinar los límites de consistencia y granulometría. Los bloques se pueden fabricar con diversas geometrías.

Adobe: El adobe es un bloque formado por una masa de barro sin cocer. Se fabrica con tierra con un alto porcentaje de arcilla, mediante un molde, y se deja secar al sol. Para evitar que se agriete al secar se añaden a la masa paja, heno seco etc.

Tapial: La técnica del tapial se basa en la compactación de la tierra húmeda por tongadas mediante su apisonado in situ. Se utiliza un encofrado desmontable de madera (cajón) de varias dimensiones. Su proceso de construcción incluye tres fases: montaje del cajón o encofrado relleno y compactación del mismo y desmontaje o desencofrado. El proceso de compactado se realiza tradicionalmente con un pisón, compactador manual en la actualidad se utilizan vibradores.

Otra aplicación moderna de la tierra, aunque todavía en desarrollo, son las casas de bolsas de tierra, que mediante bolsas de polipropileno o textiles rellenas de tierra permite construcciones de gran solidez. Estas últimas técnicas se barajan como alternativas para mejorar los problemas de vivienda en los países más desfavorecidos.

Para lograr integrar nuevamente la tierra como un material de construcción de uso habitual, se hace necesaria la creación de normativas que regulen su utilización. La UNE 41410:2008⁶⁶ proporciona las especificaciones y definiciones necesarias para el uso y la clasificación de los BTC.

1.4.3 Componentes de los BTC

Los componentes de los BTC son (Fig. 1.22):

- Estabilizantes (cemento)
- Tierras (limos, arcilla, arena, grava)
- Agua

Como ya se ha manifestado, el estabilizante utilizado para la fabricación de los BTC ha sido el cemento, tanto este como los áridos y agua de amasado, han sido descritos en los apartados de morteros y hormigones.

⁶⁶ UNE 41410:2008 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

Fig. 1.22 Componentes de los BTC

1.4.4 Descripción, designación y clasificación de los BTC⁶⁷

Norma UNE 41410:2008 *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.*

Descripción y designación

La designación de los bloques de tierra comprimida comprende, por orden, las indicaciones siguientes:

- **“BTC”** (para bloques de tierra comprimida),
- **categoría de uso:** **O** (comunes) o **P** (cara vista),
- **clase de resistencia a compresión** (El fabricante debe declarar la resistencia normalizada a compresión del BTC en N/mm². El valor declarado debe corresponder a la resistencia normalizada a compresión (fractil del 5%) f_c en el momento del suministro, y debe ser como mínimo el valor indicado en la tabla 2 de la norma (Tabla 1.29 del documento). Además, ningún resultado debe ser inferior a 0,8 veces el valor de esta resistencia).

⁶⁷ UNE 41410:2008 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

Tabla 1.29 Clases de resistencia normalizada a compresión.
Fuente: Norma UNE 41410:2008 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques.
Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

Tabla 2 – Clases de resistencia normalizada a compresión			
Bloques	BTC 1	BTC 3	BTC 5
Resistencia normalizada, f_c (fractil 5%), en N/mm ²	1,3	3	5

Para la determinación de la resistencia normalizada a compresión, se debe seguir el procedimiento descrito en el apartado 8.2 de esta norma: *“Resistencia a compresión: Para el cálculo de la resistencia a compresión del BTC, se seguirá el procedimiento descrito en la Norma UNE-EN 772-1:2011⁶⁸....*

Para el cálculo de la resistencia normalizada a compresión, se aplicará a la resistencia característica obtenida tras el ensayo solamente el factor de forma correspondiente, sin aplicar el factor de conversión debido al acondicionamiento de la pieza”.

- **dimensiones de fabricación expresadas por orden:** longitud-anchura-altura (en mm),
- **referencia a esta norma.**

Ejemplos de denominación:

BTC O 3, 295x140x95, UNE-41410.

BTC P 5, 220x220x95, UNE-41410.

BTC P 5, 300x145x105, UNE-41410.

Clasificación

Se distinguen dos categorías de bloques de tierra comprimida:

categoría O: bloques comunes destinados a ser recubiertos por una protección cualquiera;

categoría P: bloques cara vista.

En cada categoría, los bloques se clasifican en función de su resistencia mecánica mínima garantizada a compresión.

⁶⁸ UNE-EN 772-1:2011 Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.

Según su resistencia mecánica mínima garantizada a compresión con respecto a la sección bruta y expresada en N/mm^2 , los bloques se clasifican de acuerdo con una de las clases de resistencia definidas en la Tabla 2 anterior (Tabla 1.29 del documento).

BTC 1.

BTC 3.

BTC 5.

1.4.5 Usos del BTC

Las piezas de BTC pueden ser utilizadas en aplicaciones de distinta naturaleza, debiendo exigirse para cada una de ellas las prestaciones adecuadas. En caso de que la aplicación sea novedosa, será el responsable del diseño de la construcción quien especifique las prestaciones mínimas exigibles.

Las aplicaciones particulares son las siguientes:

Fábrica común: aquella que se emplea en exteriores o interiores, sin un fin estético, pudiendo ser portante o no.

Fábrica protegida: aquella que se emplea en exteriores o interiores, protegida frente a la penetración de agua, pudiendo ser portante o no.

Fábrica para revestir: aquella que se emplea en exteriores o interiores, que se recubrirá de una capa protectora adecuada, pudiendo ser portante o no.

Fábrica vista: aquella que se emplea, con un fin estético, en exteriores o interiores, pudiendo ser portante o no. Constituida por piezas cuyo acabado sea atractivo, emplea sistemas de montaje y acabados con juntas de mortero adecuados a este tipo de piezas.

Fábrica estructural: Aquella que se utiliza en exteriores o interiores, capaz de soportar cargas, además de su peso propio. Puede ser vista, común o revestida. Se considera que la fábrica de BTC, por sí sola, no posee capacidad resistente ante acciones sísmicas.

Los muros de fábrica tienen que garantizar prestaciones específicas ante los casos de incendio y ofrecer buen aislamiento acústico y térmico. Si fuera necesario se especificarán estas prestaciones en notas adicionales.

Los bloques de BTC tendrán que superar las condiciones de exposición locales para asegurar tanto la integridad estructural como la funcionalidad de la obra.

Capítulo 2

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA Y ROCCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS

Capítulo 2. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA Y ROCCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS

El presente capítulo consiste en la evaluación experimental de distintas propiedades que caracterizan el comportamiento de morteros con la adición de ROCA y ROCCA tanto a lo que se refiere a su estado fresco como a su estado endurecido.

En este contexto, se ha planteado la influencia en la incorporación de los ROCA en sustitución parcial del árido patrón y de los ROCCA como sustitución parcial del cemento de referencia CEM I 42,5 R. En este sentido se analizan las propiedades de morteros con distintos porcentajes de estos residuos orgánicos. Una vez analizados los resultados se pretende acotar el porcentaje óptimo de estas adiciones.

Para la valoración de los ROCA y ROCCA como agregados y adiciones en la elaboración de morteros se establece en este capítulo del trabajo realizar una previa caracterización de los componentes básicos de los morteros: cemento, áridos y agua y los de objeto de estudio: ROCA y ROCCA. Una vez completada esa primera etapa de caracterización se desarrolla la correspondiente campaña experimental tomando como referencia trabajos previos realizados con residuos de naturaleza agroindustrial para su posterior aplicación en la fabricación de materiales de construcción. Con dicha campaña se establecen las características físicas, químicas y mecánicas de los ROCA y ROCCA empleados, así como de los materiales donde los mismos son incorporados formando parte integrante de la mezcla, para la fabricación de morteros. Para ello se realizan dosificaciones preliminares con la preparación de diversas probetas, evaluando diferentes parámetros físicos y mecánicos. La normativa específica utilizada para la realización de los ensayos fue la UNE actualmente vigente.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES BÁSICOS UTILIZADOS

2.1.1 CEMENTO

El cemento utilizado en el presente trabajo de investigación es del tipo CEM I 42,5 R (corresponde a un cemento de clase resistente 42,5 y alta resistencia inicial¹), el cual ha sido proporcionado por la empresa Grupo Cementos Portland Valderrivas (GCPV) procedente de la fábrica El Alto, localizada en el término municipal de Morata de Tajuña (Madrid). El cemento fue suministrado a granel a través de recipientes de material inerte, cerrados herméticamente y llenos por completo. Cada envase tenía cantidad suficiente para realizar una serie completa de ensayos (Fig. 2.1). Durante la etapa experimental el cemento se almacenó aislado de cualquier fuente de humedad lo que hizo que se mantuvieran las condiciones óptimas para su uso.

Fig. 2.1 Recepción y conservación del cemento CEM I 42,5 R

El criterio de selección de dicha categoría de cemento se ha fundamentado en su composición, la cual se caracteriza por presentar un contenido en clinker igual o superior al 95%, pudiendo incorporar hasta un 5% de otros componentes adicionales (Tabla 2.1). Esto significa que al estar libre de cualquier tipo de adiciones (puzolanas,

¹ INSTRUCCIÓN PARA LA RECEPCIÓN DE CEMENTOS (RC-08). Real Decreto 956/2008 de 06 de Junio. Consolidada incluso rectificaciones de BOE11/09/2008.

cenizas volantes o escorias) se evitan posibles reacciones con la incorporación de los ROCA y ROCCA.

Tabla 2.1 Componentes del cemento CEM I 42,5 R. Fuente GCPV

Características del cemento		Norma ²	Habitual
Componentes	clinker (%)	95-100	95
	Caliza (L) (%)	-	5
	Puzolana (P) (%)	-	-
	Cenizas volantes (V) (%)	-	-
	Escoria siderúrgica (S) (%)	-	-
	Regulador de fraguado, “yeso” (%)	-	5

La caracterización del cemento se ha realizado en el Laboratorio de Control de Calidad que el Grupo Cementos Portland Valderrivas tiene en las instalaciones de El Alto-Madrid. A continuación se detallan los resultados de los ensayos realizados (Tablas 2.2 y 2.3):

Tabla 2.2 Certificado de características técnicas CEM I 42,5 R (N: 015/001810/08; CE: 0099/CPR/A33/0647)
Fuente: GCPV Laboratorio de Control de Calidad

ENSAYOS	Resultados Valor Promedio	Especificación Norma UNE-EN 197-1:2011
Características Químicas		
Pérdida por Calcinación/Pérdida al fuego (%)	2,9	< 5,0
Residuo Insoluble (%)	1,1	< 5,0
Sulfatos (SO ₃) (%)	3,6	< 4,0
Cloruros (%)	0,02	< 0,10
Características Físicas y Mecánicas		
Agua de Consistencia Normal (%)	27,5	
Principio de Fraguado (min)	142	> 60
Final de Fraguado (min)	184	< 720
Expansión Le Chatelier (mm)	0,2	< 10
Superficie específica (Blaine) (cm ² /g)	4092	

² UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

Resistencia mecánica a compresión a 2 días (MPa)

Media mensual	31,9	> 20,0
Media acumulada (03/2014 – 02/2015)	31,8	> 20,0
Desv. Std. acumulada (03/2014 – 02/2015)	2,2	

Resistencia mecánica a compresión a 28 días (MPa)

Media mensual	60,3	42,5 – 62,5
Media acumulada (03/2014 – 02/2015)	57,9	42,5 – 62,5
Desv. Std. acumulada (03/2014 – 02/2015)	2,4	

Tabla 2.3 Características químicas del clinker empleado en este cemento
Fuente: GCPV Laboratorio de Control de Calidad

Composición mineralógica del clinker

Contenido en aluminato tricálcico (C_3A)	12,9%
Contenido en ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF)	6,6%
Contenido en silicato tricálcico (C_3S)	65%
Contenido en silicato bicálcico (C_2S)	11,3%

Difracción de Rayos X (DFX)

Determinación cuantitativa de cal libre	0,92%
---	-------

Fluorescencia de Rayos X (FRX). Datos promedio

Pérdida por calcinación	2,87%
Contenido en SiO_2 total	19,72%
Contenido en Fe_2O_3	2,58%
Contenido en Al_2O_3 total	5,63%
Contenido en CaO total	64,46%
Contenido en MgO	0,93%
Residuo insoluble en HCl y KOH	1,14%
Contenido en CO_2 teórico	2,41%
Contenido en sulfatos (expresado como SO_3)	3,54%
Contenido en cloruros	0,01%
Humedad	0,46%

En el ANEXO II se incorpora “CERTIFICADO DE EVALUACIÓN. ESTADÍSTICA DE LA PRODUCCIÓN” 015/001810 Cemento: CEM I 42,5 R, emitido por AENOR³ CTC-015 “Cementos”, bajo la norma UNE-EN 197-1:2011. Periodo estudiado: 02/2014 – 01/2015.

2.1.2 ÁRIDOS PARA MORTEROS

La norma UNE-EN 196-1:2005 “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas” establece en su epígrafe 5.1.1 Generalidades, que se deben utilizar arenas normalizadas CEN, que son producidas en varios países. La arena de referencia CEN, es una arena natural, silíceas, de granos redondeados, y cuyo contenido en sílice es al menos del 98%. La “arena normalizada CEN EN 196-1” debe cumplir con la distribución granulométrica indicada en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN
Fuente: UNE-EN 196-1:2005 “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”

Dimensiones malla cuadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Residuo acumulado sobre tamices (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

La arena normalizada CEN debe estar preenvasada en bolsas con un contenido de (1.350 ± 5) g; la naturaleza del material utilizado para las bolsas no debe afectar a los resultados de los ensayos de resistencia y el contenido de cada bolsa debe cumplir con la distribución granulométrica especificada en la Tabla 2.4.

La arena utilizada en la fabricación de los morteros en el presente trabajo de investigación ha sido una arena normalizada CEN, cuyo fabricante es la empresa NORMENSAND GmbH⁴, localizada en Beckum (Alemania) y es comercializada en sacos

³ AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación.

⁴ Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH) (Sociedad de responsabilidad limitada).

de papel con 36 bolsas en su interior, con el etiquetado CEN-NORMSAND DIN⁵ EN 196-1 (Fig. 2.2).

Fig. 2.2 Arena normalizada CEN utilizada

Además se procedió a realizar ensayo de microscopía electrónica de barrido (MEB) en dicha arena normalizada, cuyos resultados son mostrados más adelante.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Lugar de ensayo

Laboratorio centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Equipo utilizado

Para la preparación y análisis de la muestra se emplearon los siguientes equipos: el microscopio electrónico Hitachi S-570 “Scanning Electron Microscope con analizador Kevex 1728”, el “BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply” y el “Polaron SEM Coating System” (Fig. 2.3 y Fig. 2.4).

⁵ DIN Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización). Berlín.

Fig. 2.3 Microscopio electrónico Hitachi S-570 y sus partes componentes;
a) depósito de nitrógeno líquido, b) cámara de los filamentos, c) cañón electrónico, d) cámara de alto vacío,
e) mandos para introducir y retirar la muestra de la cámara de alto vacío y para variar los ángulos de la posición de
la muestra, y f) módulo acoplado: monitor para visualizar la imagen durante el barrido
y botones de control de operaciones

Fig. 2.4 Equipos de grafitación de las pastillas "BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply"
y el "Polaron SEM Coating System"; a) electrodos, b) compresor y c) cámara de alto vacío

Fundamento del método

La microscopía electrónica es un método de análisis no destructivo que permite conocer la morfología, las relaciones entre los componentes y la composición elemental de las muestras analizadas, llegándose a obtener imágenes microscópicas de hasta 1μ de resolución.

El fundamento del método consiste en el análisis de la radiación obtenida a partir de una muestra sólida bombardeada por un haz de electrones convenientemente dirigido y del espectro que se genera durante la interacción del flujo electrónico con la muestra. Los resultados pueden ser cualitativos y cuantitativos.

La monitorización del haz se efectúa mediante diafragmas y dos lentes electromagnéticas, una de condensación y otra tipo objetivo, cuya finalidad es la modificación de la intensidad y el tamaño del haz. El sistema está sometido al vacío (P

< 10⁻⁴ Torr), con la finalidad de evitar la absorción de los rayos X por el aire.

Preparación de las muestras

Se analizaron una muestra de árido natural. La muestra se molió hasta 0,2 y 0,5 centímetros y se esparció sobre una cinta grafitada con propiedades adhesivas que se colocó en el portamuestras. Posteriormente, la muestra fue cubierta con una capa de grafito al vacío (Fig. 2.5) e inmediatamente se colocó en el portamuestras del microscopio electrónico para su análisis (Fig. 2.6).

Fig. 2.5 Ubicación de la barra de grafito en los bornes de la cámara de alto vacío

Fig. 2.6 Portamuestras del microscopio electrónico; a) en plena extracción, b) visualización del portamuestras

La muestra se fijó con un ángulo de 30° con respecto al tubo detector semiconductor, para que el haz emitido por el cañón de electrones incidiera en la muestra y los desprendimientos energéticos recogidos perpendicularmente por dicho tubo. La composición del tubo detector es de silicio y litio, y la temperatura del sistema de -60°C. En el análisis de la muestra se empleó una intensidad de radiación electrónica de 20 kilovoltios; mientras que para los elementos pesados es de 25 kilovoltios. Todo

el proceso fue controlado desde una consola conectada al microscopio (Fig. 2.7).

Las lecturas de los elementos que componen la muestra, los espectros de emisión y las microfotografías de los sectores de la muestra previamente elegidos se obtuvieron mediante los softwares Winshell y Printerface.

Fig. 2.7 Panel de control para las operaciones con el microscopio electrónico

2.1.3 AGUA PARA MORTEROS

Sin presencia de agua no se puede elaborar morteros, hormigones y ni siquiera una simple pasta de cemento. El agua, los morteros y hormigones son los materiales más extensamente utilizados por el hombre, siendo el agua quien ocupa el primer lugar. De ello se deduce que el agua juega un papel fundamental en la fabricación de morteros y hormigones, bien como agua de amasado o como agua de curado (véanse Capítulo 1, epígrafes 1.2.2 y 1.3.2).

A pesar de que el agua es uno de los componentes de más bajo costo para la elaboración de morteros y hormigones, tiene una relevante importancia similar a la del cemento, ya que variaciones de su contenido en una mezcla permiten éstas realizar las respectivas dosificaciones incidiendo en los valores de resistencia, trabajabilidad, consistencia, plasticidad, permeabilidad, entre otros. Con el desconocimiento de la calidad del agua utilizada, su procedencia y composición química, se corren grandes

riesgos, porque aunque la relación agua/cemento sea la adecuada, no se saben los efectos que la misma provocarán en morteros y hormigones.

Carbonatos o bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sales de hierro, sales inorgánicas, ácidos, materia orgánica, aceites, o sedimentos, son impurezas presentes en las aguas presentándose disueltas o en forma de suspensión pudiendo interferir en el proceso de hidratación del cemento, modificaciones en el tiempo de fraguado, reducción de la resistencia mecánica, causar eflorescencias en la superficie de morteros y hormigones y aumentar el riesgo de corrosión de las armaduras en estos últimos.

La EHE-08 recoge en su Título 3º. Propiedades tecnológicas de los materiales. Capítulo VI. Materiales. Artículo 27º que: *El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.*

Como criterio asumido se establece que si el agua es potable, es adecuada para agua de amasado, tanto así que una gran parte de los morteros y hormigones se elaboran con aguas de este tipo. Sin embargo, muchas aguas no aptas para el consumo humano (potables) son adecuadas como aguas de amasado. En todo caso, las especificaciones indicadas en normas establecen las cantidades máximas de impurezas que pueden ser aceptadas, dependiendo del tipo de mortero y hormigón a fabricar. Ante la duda de la calidad de las aguas de amasado, éstas deberán ser sometidas a los correspondientes ensayos de laboratorio los cuales determinarán ser o no aptas para formar parte de las respectivas dosificaciones. Existe la excepción de uso de las aguas de alta montaña, que debido a su gran pureza les confiere un carácter agresivo. La EHE-08 establece las condiciones deberán cumplir.

La norma UNE-EN 196-1:2005⁶ indica en su epígrafe 5.3 que: *Para los ensayos de validación se debe utilizar agua destilada, o desionizada. Para otros ensayos se puede utilizar agua potable. En caso de litigio se debe emplear agua destilada o desionizada.*

Dada la valoración que se quiere hacer sobre la incorporación de los ROCA y ROCCA en la mezcla es por lo que en el presente trabajo de investigación se ha utilizado para la preparación de los morteros agua desionizada, empleando como equipo el depósito de almacenamiento de agua purificada de polietileno de 100 litros, marca Merck MILLIPORE modelo TANKPE100 presente en el Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE) de la Escuela Politécnica de Cuenca (Fig. 2.8). El agua de alimentación de tal depósito proviene de la red pública de abastecimiento de la ciudad de Cuenca (España).

Fig. 2.8 Depósito de almacenamiento de agua purificada de polietileno de 100 litros, marca Merck MILLIPORE modelo TANKPE100.

⁶ UNE-EN 196-1:2005 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Tal y como quedaba expresado al inicio del actual capítulo, la valoración de los ROCA y ROCCA como agregados y adiciones en la elaboración de morteros precisa de su caracterización, tanto física como química. Ello permite interpretar los resultados obtenidos de los ensayos realizados cuando dichos residuos orgánicos son incorporados en las diferentes mezclas efectuadas. En la campaña experimental se establecen las características físicas, químicas y mecánicas de los ROCA y ROCCA empleados, así como de los materiales donde los mismos son incorporados formando parte integrante de la mezcla, para la fabricación de morteros y hormigones. Se pretende evaluar la incorporación de los ROCA como agregado en sustitución parcial del árido en las proporciones 10, 20 y 30% en peso y la de los ROCCA en las mismas proporciones (% en peso) como sustituto parcial del cemento.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS ROCA Y ROCCA

Los residuos ROCA son proporcionados por la empresa Almendras de la Mancha, S.A. ubicada en el polígono industrial San Rafael de la población de Hellín (Albacete). Dicha empresa posee la certificación ISO 22000⁷ y en ella se producen diariamente entre 300 a 350 t de cáscara de almendra como resultado del proceso de descascarado (Fig. 1.8).

La empresa ha proporcionado dichos residuos con tamaños del resultado del proceso de descascarado y otros con granulometrías inferiores a 4 mm, habiendo sido sometidos en este caso a proceso de molienda y cribado previos en sus instalaciones (Fig. 2.9).

⁷ UNE-EN ISO 22000:2005 Sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos.

MAPA CONCEPTUAL 1. MORTEROS. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

MAPA CONCEPTUAL 2. MORTEROS. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Fig. 2.9 Proceso de molienda y cribado de los ROCA

El suministro de los ROCA ha sido a granel, en sacos de polipropileno que permiten mantener en óptimas condiciones el producto y además constituyen suficiente protección para el contenido, evitando contaminaciones por polvo en las normales condiciones de manipulación, transporte y distribución del producto dentro del laboratorio.

Una vez en el laboratorio determinadas cantidades de estos residuos con granulometrías inferiores a 4 mm han sido envasados en recipientes secos y estancos de cristal (Fig. 2.10).

Fig. 2.10 Recepción y conservación de los ROCA

Por su parte los residuos ROCCA han sido proporcionados por la empresa PANADERÍA CARMELA S.L. localizada en la población de Elche de la Sierra (Albacete) siendo el resultado de la calcinación de cáscaras de almendra en un horno de leña marca J. LLOPIS (Barcelona-España), de plataforma de cocción giratoria con superficie en material acumulativo (Fig. 2.11).

Fig. 2.11 Horno de leña marca J. LLOPIS, de plataforma de cocción giratoria con superficie en material acumulativo

La biomasa para calentamiento es exclusivamente a base de este residuo agroindustrial, lo cual impide cualquier contaminación que pudiera haber con cenizas procedentes de la calcinación de otro material distinto (orujillo, etc.). El consumo de cáscara de almendra es de 45 a 50 kg/día, con un tiempo de encendido de ± 2 horas lo cual hace conservar una temperatura de cocción promedio de $\pm 230^{\circ}\text{C}$. Ello está controlado por un cuadro de control con autómata y pantalla táctil, preparado para aplicaciones industriales (Fig. 2.12).

Fig. 2.12 Cuadro de control con autómata y pantalla táctil

La empresa Natural Fire (Yecla-Murcia) dedicada a la fabricación de quemadores de biomasa en forma de pellet o material triturado, como cáscaras de almendra y de pistachos, huesos de oliva y de piñas de pinos, incorpora a dichos quemadores un innovador software integrado que simplifica al máximo las labores de instalación y mantenimiento del quemador, al mismo tiempo que proporciona una experiencia de manejo cómoda y sin complicaciones. Sus especificaciones técnicas destacadas son:

Permite modulación por sonda de temperatura, presostato, señales de control externas al equipo, o combinación de las anteriores. Su manejo visual simple e

intuitivo con capacidad total de control sobre la máquina, sin necesidad de aplicaciones, PCs o equipos externos.

Tiene modulación entre 4 niveles de potencia totalmente configurables. Captura de señales de arranque/parada y de cambio de potencia simultáneas. Captura de señales analógicas.

Funcionamiento por sonda PT100 (hasta 250°C) para control de potencias/seguridades. Modos de funcionamiento límite o modulado. Arranque progresivo y cambio progresivo.

Limpiezas periódicas por control de ventilación, movimiento de parrilla o EV.

Temporizador semanal completo.

Combinación ultrarrápida de potencias en kW/h.

Gestión de configuraciones, permitiendo guardar y restaurar configuraciones predefinidas y personalizadas.

Multilenguaje.

Estadísticas de trabajo y consumos del quemador (Fig. 2.13).

Fig. 2.13 Estadísticas de trabajo y consumos del quemador

Cambio instantáneo de tipo de material (hasta 3 tipos de biomasa diferentes) (Fig. 2.14).

Fig. 2.14 Tres (3) tipos de biomasa diferentes posibles de alimentación del horno

La forma de recogida de la ceniza producto de la calcinación de la cáscara de almendra se hace por la zona inferior del quemador (Fig. 2.15), a través de un compartimento con bandeja extraíble que posteriormente se deposita en recipiente metálico (Fig. 2.16).

Mediante la utilización de este horno en el que se realizó la combustión de unos ± 45 kg de cáscara de almendra, se consiguió una ceniza (ROCCA), sobre cuyas propiedades físico-químicas se centra parte de este proyecto de investigación, para su posible empleo como adición. Se presentan igualmente resultados sobre el poder de combustión de la cascara. Mediante mezclas de ROCCA con distintas proporciones de cemento portland, se han conseguido conglomerantes cuyas propiedades se estudian en el caso de morteros. El objetivo último del trabajo es mostrar la factible aplicabilidad de la cáscara de almendra como adición, sin olvidar sus excelentes cualidades como combustible lo que hace especialmente idónea en países en vías de desarrollo, deficitarios en cemento y recursos energéticos. Para este proyecto de investigación, la ceniza fue recogida, enfriada a temperatura ambiente y tamizada por

personal de la propia panadería, eliminando cualquier agregado que pudiera haberse formado. Posteriormente se envasó en recipiente plástico hermético y fue transportada al LACAE para evaluar su empleo en diferentes dosificaciones como elemento sustitutivo parcial del cemento en la fabricación de morteros.

Fig. 2.15 Quemador. Detalle entrada del horno donde se inserta dicho quemador

Fig. 2.16 Recogida de la ceniza producto de la calcinación de la cáscara de almendra por la zona inferior del quemador, a través de un compartimento con bandeja extraíble que posteriormente es depositado en recipiente metálico

Posteriormente en laboratorio el producto calcinado (ceniza) se ha secado en estufa a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se ha alcanzado masa constante y a continuación se ha tamizado a través de un tamiz de 0,125 mm. Obteniendo de esta forma un grado de finura similar al del cemento, lo que facilita su homogeneización al ser ambos mezclados en el momento de añadir las diversos % en peso como elemento de sustitución (Fig. 2.17).

Fig. 2.17 Secado y tamizado de los ROCCA

Realizada la desecación y al igual que con los ROCA la ceniza ha sido envasada en recipientes similares de cristal, secos y estancos (Fig. 2.18).

Fig. 2.18 Recepción y conservación de los ROCCA

2.2.1.1 Caracterización física

En este apartado se describen los ensayos realizados en el Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE) de la Escuela Politécnica de Cuenca (UCLM).

LISTADO DE ENSAYOS

UNE-EN 1097-6:2014

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.

Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

UNE-EN 1097-6: 2014

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.*

Objeto y campo de aplicación

Esta norma europea especifica los métodos de referencia utilizados para los ensayos tipo y, en caso de litigio, para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua de áridos de peso normal y ligeros. La cáscara de almendra al tener una densidad aparente inferior a $1,8 \text{ kg/m}^3$ se deberá considerar como árido ligero y deberá tener esta consideración a la hora de realizar este ensayo. Debido a esto se utiliza la metodología expuesta en el Anexo C de la presente norma UNE. Este anexo especifica el método de referencia para la determinación de las densidades aparentes de partículas, secada en estufa, saturada y secada superficialmente y la absorción de agua de áridos ligeros. Las densidades de partículas de áridos ligeros se determinan siempre después del pre-secado.

Este método utiliza un picnómetro para determinar las densidades de partículas y la absorción de agua de áridos ligeros, utilizando un tiempo de inmersión de 24 h. Se plantean dos métodos para realizar este ensayo:

Método de la balanza hidrostática, que es el utilizado para granulometrías entre 31,5 - 63 mm y entre 4 – 31,5 mm.

Método del picnómetro, que analiza granulometrías entre 4 y 0,063 mm.

Principio del método

La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina por pesada de la porción de ensayo en la condición saturada y secada superficialmente, y de nuevo en la condición secada en estufa. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, tanto por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática como mediante pesadas en el método del picnómetro.

MÉTODO DE LA BALANZA HIDROSTÁTICA

La norma exige una masa mínima de muestra a ensayar dependiendo del tamaño máximo del material de ensayo, (M_0).

Tabla 2.5 Masa mínima de las porciones de ensayo

Tamaño de árido superior (D) mm	Masa mínima de las porciones de ensayo (kg)
31,5	5
16	2
8	1
4	≥ 1

Equipo utilizado

Tamices de ensayo:

de 0,063 mm, 4 mm, 31,5 mm y 63 mm, con aberturas como se especifica en la Norma UNE EN 933-2.

Estufa ventilada, controlada termostáticamente para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Tanque estanco, que contenga agua a $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ en el cual pueda colgarse la cesta libremente con una holgura mínima de 50 mm entre la cesta y los lados del tanque.

Balanza, con exactitud del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo y de suficiente capacidad para ser capaz de que se cuelgue y pese en agua la cesta de tela metálica que contiene la muestra.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Termómetro, de 0,1 de exactitud.

Paños absorbentes suaves secos

Equipo de lavado

Cronómetro

Escudador

Cesta de tela metálica, o recipiente perforado de tamaño adecuado para que pueda colgarse de la balanza. La cesta o el recipiente deben ser resistentes a la corrosión.

Malla de plástico, con un diámetro capaz de impedir la pérdida de muestra de menor

tamaño.

Preparación de la muestra de ensayo (Fig. 2.19)

Dado que la cáscara de almendra tiene una granulometría mínima de 4 mm se toma una muestra de 1 kg (M_0). Se satura introduciéndola durante 24 horas en un recipiente de agua desionizada a una temperatura de 22,5°C. De esta manera se evita que la muestra absorba agua durante el ensayo, al sumergirlo en el tanque estanco de la balanza hidrostática. Una vez saturada la muestra de cáscara de almendra, se pasa la muestra por un escurridor para quitarle el agua y se seca con un paño para eliminar el agua superficial. Se vuelve a pesar la muestra (M_1) y se procede a su ensayo.

Fig. 2.19 Preparación de la muestra de cáscara de almendra para el ensayo en balanza hidrostática

Procedimiento operatorio

Se coloca la porción de ensayo preparada en la cesta de tela metálica y se sumerge en el tanque que contiene agua a una temperatura de $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, cubriéndose con, al menos, 50 mm de agua sobre la parte superior de la cesta. Inmediatamente después de la inmersión, se retira el aire atrapado de la porción de ensayo preparada elevando la cesta unos 25 mm por encima de la base del tanque y se deja caer 25 veces, una vez por segundo. Se deja la cesta y la muestra permanecer completamente sumergidos en el agua a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de $(24 \pm 0,5)$ h.

En este caso, para impedir la pérdida de cáscara de almendra durante el ensayo dentro del tanque estanco de la bañera hidrostática, la muestra será introducida en una especie de bolsa hecha con malla de plástico, de manera que deje pasar el agua sin pérdida de material. Esta malla deberá ser pesada antes de colocar en ella la muestra, para descontar así su peso cuando se calcule M_2 .

Se sacude la cesta y la porción de ensayo y se pesan en agua a una temperatura de $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, M_2 . Se registra la temperatura del agua cuando se determina M_2 . Si es necesario que se transfiera la porción de ensayo a un tanque diferente para la pesada, se sacude la cesta y la porción de ensayo 25 veces como se hizo previamente en el nuevo tanque antes de la pesada M_2 .

Se retira la cesta y la muestra del agua y se deja escurrir durante unos pocos minutos. Con cuidado se vacía la muestra de la cesta sobre uno de los paños secos. Se devuelve la cesta vacía al agua, se sacude 25 veces y se pesa en agua, M_3 . Con cuidado se seca la superficie de la muestra y se transfiere a un segundo paño absorbente suave seco cuando el primero no retire más humedad. Se esparce la muestra en una sola capa sobre el segundo paño, y se deja expuesta a la atmósfera apartado de la luz directa del solo de cualquier otra fuente de calor hasta que todas las películas visibles de agua se hayan eliminado pero de forma que la muestra permanezca con apariencia húmeda. Se pesa la misma, M_1 .

Se transfiere la muestra a una bandeja y se coloca en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta que haya alcanzado masa constante. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa, M_4 . Se registran todas las masas con una exactitud del 0,1% de la masa de la porción de ensayo, M_4 , o mejor (Fig. 2.20).

Fig. 2.20 Balanza hidrostática. Porción de ensayo introducida en una especie de bolsa hecha con malla de plástico, pesada y colocada en la cesta de tela metálica, sumergida en el tanque que contiene agua y enfriada a temperatura ambiente después de haber sido calentada en estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante

Cálculo y expresión de los resultados

Se calculan las densidades de partículas (ρ_a , ρ_{rd} y ρ_{ssd} , como sea apropiado) en megagramos por metro cúbico de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Densidad aparente de partículas

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - \{M_2 - M_3\}}$$

Densidad de partículas secadas en estufa

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - [M_2 - M_3]}$$

Densidad de las partículas saturadas y secadas artificialmente

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - [M_2 - M_3]}$$

Y la absorción de agua después de la inmersión durante 24 h, WA_{24} , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura registrada cuando se determina M_2 , en megagramos por metro cúbico;

M_1 es la masa de la muestra saturada y secada superficialmente, pesada al aire, en gramos;

M_2 es la masa aparente en agua de la cesta que contiene la muestra saturada, en gramos;

M_3 es la masa aparente en agua de la cesta vacía, en gramos;

M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

MÉTODO DEL PICNÓMETRO

Con este ensayo se pretende determinar la densidad aparente tanto de la cáscara de almendra como de la ceniza de cáscara de almendra.

Equipo utilizado

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,001$ g.

Picnómetro con una capacidad nominal de 50 ml

Jeringa con aguja

Preparación de la muestra de ensayo

La muestra de ceniza de cáscara de almendra es tomada de los recipientes estancos en los que se almacena el material secado en estufa y tamizado por un tamiz de 0,1 mm. Se toma una muestra de 50 gr. La muestra de cáscara de almendra debe de tener una finura que no obstruya el picnómetro y se pueda ejecutar el ensayo correctamente. Por ello es molida en el molino de bolas planetario. Para proceder a la fragmentación de la muestra, se introduce la cáscara de 4 mm en el vaso rotatorio junto con las bolas de acero. Se cierra el vaso a presión y se muele durante 15 minutos a una velocidad de 600 rpm. La cáscara de almendra presenta una gran resistencia a la fragmentación (Fig. 2.21).

Fig. 2.21 Preparación de la muestra de cáscara de almendra en el molino de bolas planetario

Procedimiento operatorio

Primero se llena el picnómetro de agua destilada hasta la señal de enrase que tiene el tapón del picnómetro. Una vez lleno y comprobando que no contiene burbujas de aire, se pesa el picnómetro en la balanza, se anota este dato (m_2). A continuación se extrae el agua del picnómetro, se retira el tapón y se introduce la muestra en polvo. Se coloca nuevamente el tapón y por el capilar del mismo con ayuda de la jeringa se va rellenando el picnómetro con agua destilada, con la precaución de no dejar burbujas de aire en su interior. Cuando el nivel del agua llega a la señal de enrase, se seca el exterior del picnómetro y se vuelve a pesar (m_1) (Fig. 2.22).

Fig. 2.22 Pesada del picnómetro relleno con agua destilada; porción de muestra a ensayar; picnómetro relleno con la porción de muestra más el agua destilada

Cálculo y expresión de los resultados

Para averiguar la densidad de la cáscara de almendra se tiene en cuenta que el volumen en el picnómetro con el agua es igual al volumen del picnómetro con la muestra y que la densidad se define como el cociente de la masa entre el volumen, por lo que, con el mismo volumen, la densidad es proporcional a la masa. La densidad del material ensayado se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{m_2} \rho_2$$

donde:

m_1 masa de muestra contenida en el picnómetro (g)

m_2 masa de agua contenida en el picnómetro (g)

ρ_1 densidad de la muestra contenida en el picnómetro (t/m³)

ρ_2 densidad del agua contenida en el picnómetro (t/m³)

PESO ESPECÍFICO

El objeto del siguiente ensayo es determinar el peso específico de cáscara de almendra y ceniza de cáscara de almendra mediante el volumenómetro de Le Chatelier, que consiste en establecer la relación entre una masa de muestra (g) y el volumen (ml) de líquido que ésta masa desplaza en el matraz.

El volumenómetro de Le Chatelier es un recipiente de cristal de formas definidas por norma, cuya capacidad es de 250 ml y está graduado de 0 a 1 ml y de 18 a 24 ml, con graduaciones de 0,1 ml. Lleva incorporado un tapón de vidrio esmerilado,

Equipo utilizado

- Matraz de Le Chatelier
- Balanza
- Termómetro
- Embudo de vidrio
- Jeringa con aguja
- Vaso de precipitado

Procedimiento operatorio

El volumenómetro de Le Chatelier limpio y libre de humedad se llena hasta las señales de 0 ml ó 1ml, (V_1). El líquido utilizado para realizar el ensayo, debe tener un peso específico inferior a 1 g/cm^3 , por ejemplo, de tetracloruro de carbono, petróleo, bencina, esencia de trementina, kerosene, xilol (dimetil benceno).

Se pesa una cantidad de muestra, m , que previamente se ha tanteado o calculado para que el volumen que se obtenga sea aproximadamente de unos 20 cm^3 .

Se añade con ayuda del embudo la muestra en el matraz con especial cuidado para no perder muestra y de que no se produzcan salpicaduras ni que el material se adhiera a las paredes. Una vez introducida la muestra se coloca el tapón y se agita enérgicamente hasta que todo quede mezclado y sean eliminadas las burbujas de aire ocluido en el material. Se deja reposar el matraz en una superficie totalmente horizontal hasta que la lectura del líquido en el matraz permanezca constante y se anota el nivel alcanzado en esta segunda lectura, (V_2) (Fig. 2.23).

Fig. 2.23 Volumenómetro de Le Chatelier

Cálculo y expresión de los resultados

Finalmente el peso específico se calculará aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho_e = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

donde:

m masa de la muestra a ensayar (g)

V_1 volumen del matraz con el líquido (cm³)

V_2 volumen del matraz con el líquido y la muestra (cm³)

2.2.1.2 Caracterización química

En este apartado se describen los diferentes ensayos realizados para caracterizar los ROCA y ROCCA.

LISTADO DE ENSAYOS

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Espectroscopía infrarroja (IR)

UNE-EN 196-5:2011

Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.

UNE-EN 14774-1:2010

Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.

Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Lugar de ensayo

Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada (IRICA).

Unidad de instrumentación y apoyo a la investigación.

Campus universitario de Ciudad Real. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

Equipo utilizado

El equipo es un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X, Philips, modelo Magix Pro, dispersivo de longitud de onda, tubo de RX con ánodo de Rh, radiación KAlpha, con un goniómetro simple basado en medidas de canal, cubriendo el rango total de medida. La preparación de la muestra ha sido en pastilla prensada y su medida con una aplicación semicuantitativa (iq+), de 15 patrones de muestras sintéticas de sustancias puras barriendo el espectro de energías desde el F hasta el final del sistema periódico (Fig. 2.24).

Fig. 2.24 Espectrómetro PHILIPS Magix Pro

Fundamento del método

La técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX) se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos de la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, convenientemente colimada, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico d) que la difracta en un ángulo (ϑ) dependiente de su longitud de onda (λ) por la ley de Bragg ($\text{sen } \vartheta = n\lambda/2d$). Un detector que puede moverse sobre un determinado rango de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Lugar de ensayo

Laboratorio Centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Equipo utilizado

Para la preparación y análisis de las muestras se emplearon los siguientes equipos: el microscopio electrónico Hitachi S-570 "Scanning Electron Microscope con analizador Kevex 1728", el "BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply" y el "Polaron SEM Coating System" (Figs. 2.25 y 2.26).

Fig. 2.25 Microscopio electrónico Hitachi S-570 y sus partes componentes;

- a) depósito de nitrógeno líquido, b) cámara de los filamentos, c) cañón electrónico, d) cámara de alto vacío, e) mandos para introducir y retirar la muestra de la cámara de alto vacío y para variar los ángulos de la posición de la muestra, y f) módulo acoplado: monitor para visualizar la imagen durante el barrido y botones de control de operaciones

Fig. 2.26 Equipos de grafitación de las pastillas “BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply” y el “Polaron SEM Coating System”; a) electrodos, b) compresor y c) cámara de alto vacío

Fundamento del método

La microscopía electrónica es un método de análisis no destructivo que permite conocer la morfología, las relaciones entre los componentes y la composición elemental de las muestras analizadas, llegando a obtener imágenes microscópicas de hasta $1\ \mu$ de resolución.

El fundamento del método consiste en el análisis de la radiación obtenida a partir de una muestra sólida bombardeada por un haz de electrones convenientemente dirigido y del espectro que se genera durante la interacción del flujo electrónico con la muestra. Los resultados pueden ser cualitativos y cuantitativos.

La monitorización del haz se efectúa mediante diafragmas y dos lentes electromagnéticas, una de condensación y otra tipo objetivo, cuya finalidad es la modificación de la intensidad y el tamaño del haz. El sistema está sometido al vacío ($P < 10^{-4}$ Torr), con la finalidad de evitar la absorción de los rayos X por el aire.

Preparación de las muestras

Se analizaron una muestra de cáscara de almendra en estado natural y una muestra de ceniza de cáscara de almendra calcinada.

Las muestras se molieron hasta 0,2 y 0,5 centímetros y se esparcieron sobre una cinta grafitada con propiedades adhesivas que se colocó en el portamuestras. Posteriormente, las muestras fueron cubiertas con una capa de grafito al vacío (Fig. 2.27) e inmediatamente se colocaron en el portamuestras del microscopio electrónico para su análisis (Fig. 2.28).

Fig. 2.27 Ubicación de la barra de grafito en los bornes de la cámara de alto vacío

Fig. 2.28 Portamuestras del microscopio electrónico; a) en plena extracción, b) visualización del portamuestras

Las muestras se fijaron con un ángulo de 30° con respecto al tubo detector semiconductor, para que el haz emitido por el cañón de electrones incidiera en la muestra y los desprendimientos energéticos recogidos perpendicularmente por dicho tubo. La composición del tubo detector es de silicio y litio, y la temperatura del sistema de -60°C . En el análisis de las muestras se empleó una intensidad de radiación electrónica de 20 kilovoltios; mientras que para los elementos pesados es de 25 kilovoltios. Todo el proceso fue controlado desde una consola conectada al microscopio (Fig. 2.29).

Las lecturas de los elementos que componen la muestra, los espectros de emisión y las microfotografías de los sectores de la muestra previamente elegidos se obtuvieron mediante los softwares Winshell y Printerface.

Fig. 2.29 Panel de control para las operaciones con el microscopio electrónico

Espectroscopía infrarroja (IR)

Lugar de ensayo

Laboratorio Centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Equipos utilizados

Equipo Bruker, modelo Vector 22 (Fig. 2.30), una prensa 30 TON PRESS C-30, un mortero de ágata y el software EZ-Opus.

Fig. 2.30 Equipo Bruker, modelo Vector 22

Fundamento del método

El método se basa en el estudio del comportamiento de una muestra cuando es atravesada por un rayo de luz infrarroja. Se mide fundamentalmente la absorción a partir del nivel de coincidencia entre las frecuencias de excitación de un enlace y las ondas que componen el rayo. En estas condiciones, se registra la cantidad de energía absorbida en cada longitud de onda, en forma de espectros de transmitancia o absorbancia, que muestran las longitudes de onda a las que la muestra absorbe el IR, permitiendo así la interpretación adecuada sobre los enlaces presentes. Las absorciones se expresan en cm^{-1} .

Esta técnica funciona, principalmente, en los casos en que están presentes los enlaces covalentes; por ello es ampliamente utilizada en química orgánica.

Preparación de las muestras

En el presente trabajo se analizaron dos muestras de residuos tipo ROCA; la primera de ellas en estado natural, mientras que la segunda en estado calcinado.

Se trituró una pequeña cantidad de muestra ($< 0,02$ g) en el mortero de ágata hasta lograr su completa pulverización. A continuación se mezcló este polvo con 0,025 g de bromuro potásico, el cual posee excelentes propiedades aglomerantes. La mezcla obtenida fue introducida en un molde especial o troquel y sometida a presiones del rango de 700 a 1.000 Kg/cm^2 , durante 5-10 minutos, mediante lo cual se obtuvo una pastilla transparente de 1 cm de diámetro, aproximadamente.

La pastilla se analizó con el auxilio del equipo Bruker, y los resultados fueron procesados mediante el software EZ-Opus.

UNE-EN 196-5:2011

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos

Lugar de ensayo

Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO).
Fundación Gómez-Pardo (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía-
Universidad Politécnica de Madrid-UPM).

Objeto y campo de aplicación

Esta norma describe el método para la medida de la puzolanidad de los cementos puzolánicos de acuerdo con la Norma EN 197-1. Esta norma no es de aplicación a los cementos portland con puzolana ni a las puzolanas. Este método constituye el

procedimiento operatorio de referencia.

Fundamento

La puzolanicidad se determina por comparación de la concentración del ión calcio, expresado como hidróxido de calcio, que contiene la disolución acuosa en contacto con el cemento hidratado, tras un periodo de tiempo fijo, con la cantidad de ión calcio capaz de saturar una disolución de la misma alcalinidad. El cemento se considera que cumple el ensayo, es decir, da un resultado positivo, si la concentración de ión calcio en la disolución es menor que la concentración de saturación.

Preparación de la muestra

Antes del análisis químico, la muestra de laboratorio obtenida de acuerdo con la Norma EN 196-7 se trata como sigue para obtener una muestra para ensayo homogénea. Se toman, aproximadamente 100 g de la muestra de laboratorio por medio de un divisor de muestras (cuarteador) o por cuarteo. Se tamiza esta porción en un tamiz de 150 μm o de 125 μm hasta que el residuo permanece constante. Seguidamente, se muele el material retenido hasta que pase por completo por el tamiz de 150 μm o de 125 μm . Se transfiere la muestra a un frasco limpio y seco con cierre hermético y se agita vigorosamente para homogeneizarla. Las operaciones precedentes se deben efectuar lo más rápido posible con el fin de asegurar que la muestra esté expuesta al aire durante un tiempo mínimo.

Reactivos

Ácido clorhídrico

aproximadamente 0,1 mol/l, preparado por adición de 8,5 ml de ácido clorhídrico concentrado ($\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$ a $1,19 \text{ g/cm}^3$), medidos con bureta a un matraz aforado de 1l que contiene unos 500 ml de agua. A continuación, se enrasa con agua hasta 1.000 ml. Se determina el factor de normalidad de la disolución.

Disolución de EDTA

(sal di-sodio, di-hidrato del ácido etilendiaminotetraacético), aproximadamente 0,03 mol/l, preparada disolviendo $(11,17 \pm 0,01)$ g de EDTA en agua y completando el

volumen hasta 1.000 ml. Se conserva en un frasco de polietileno hermético. Se determina el factor de molaridad de la disolución.

Aparatos

Compartimento termostático de temperatura uniforme, controlada la misma termostáticamente a $(40 \pm 1)^{\circ}\text{C}$.

Balanza, capaz de pesar con una exactitud de $\pm 0,0005\text{ g}$

pH-metro, capaz de medir con una exactitud de $\pm 0,05$.

Fotómetro

Valoración de las disoluciones

Valoración de la disolución EDTA

Se pesa, con una exactitud de $\pm 0,0005\text{ g}$, $(1,00 \pm 0,01)\text{ g}$ de carbonato de calcio (6.8) (ml) Y se coloca en un vaso de 400 ml con, aproximadamente, 100 ml de agua. Se cubre el vaso con un vidrio de reloj y se introducen, con precaución, aproximadamente 10 ml de ácido clorhídrico. Se agita con una varilla de vidrio y se asegura que la disolución es completa, y se lleva la disolución a ebullición con el fin de eliminar el dióxido de carbono disuelto. Se enfría la disolución a la temperatura ambiente, se transfiere a un matraz aforado y se lava el vaso y el vidrio de reloj con agua; las aguas de lavado se adicionan cuidadosamente a la disolución y, por último, se completa el volumen hasta 1.000 ml con agua. Se introducen, por medio de una pipeta, 50 ml de la disolución de calcio en un vaso adaptado al aparato de medida. Se diluye, inmediatamente, la disolución con agua a un volumen apropiado para la utilización del aparato. Con ayuda de un pH-metro se ajusta el pH de esta disolución a $(12,5 \pm 0,2)$ con otra disolución de hidróxido de sodio. Se determina el punto [mal mediante uno de los dos métodos siguientes:

a) Determinación fotométrica del punto final (punto de equivalencia) (método de referencia).

Se adiciona, aproximadamente y sin pesarlo, 0,1 g del indicador murexida o del indicador mixto. Se coloca el vaso en el aparato, regulado a 620 nm cuando se utiliza murexida o a 520 nm cuando se utiliza el indicador mixto y, agitando continuamente la disolución, se valora con la disolución de EDTA 0,03 mol/l. En las proximidades del

cambio de color del indicador, se construye una curva con los valores de las absorbancias en función del volumen de EDTA añadido. El volumen V_1 utilizado se determina por la intersección de la línea de pendiente máxima en las proximidades del cambio de color con la línea de absorbancia prácticamente constante después del cambio de color. El factor f_1 de la disolución EDTA se determina por medio de la fórmula:

$$f_1 = \frac{m_1 \times 50}{100,09 \times 0,03 \times V_1} = \frac{m_1}{V_1} \times 16,652$$

Donde

m_1 es la masa de carbonato de calcio, en gramos;

V_1 volumen de la disolución de EDTA utilizada en la valoración, en ml.

100,09 es la masa molecular del carbonato de calcio.

b) Valoración de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l

Se pesan, con una exactitud de $\pm 0,0005$ g, $(0,200 \pm 0,001)$ g de carbonato de sodio, m_2 , se pasan al matraz cónico (Erlenmeyer) de 250 ml, y se disuelven en 50 ml a 75 ml de agua. Se añaden a la disolución cinco gotas del indicador de naranja de metilo y se valora con ácido clorhídrico diluido 0,1 mol/l hasta el cambio de color de amarillo a naranja. Se calcula el factor, f_2 , de la disolución de ácido clorhídrico mediante la siguiente fórmula:

$$f_2 = \frac{2 \times m_2}{105,989} \times \frac{1000}{0,1 \times V_2} = \frac{m_2}{V_2} \times 188,70$$

donde

m_2 es la masa de carbonato de sodio, en gramos;

V_2 es el volumen de ácido clorhídrico utilizado en la valoración, en mililitros;

105,989 es la masa molecular del carbonato de sodio.

Procedimiento operatorio

Conservación y filtración

Se vierten en un recipiente de polietileno 100 ml de agua recién hervida medidos con pipeta; se cierra herméticamente el recipiente y se pasa al compartimento termostático hasta que se alcance el equilibrio térmico (aproximadamente 1 h). Se saca el recipiente del compartimento termostático. Se pesan $(20,00 \pm 0,01)$ g de la muestra que se va a ensayar y se pasan al recipiente de polietileno, utilizando para ello un embudo de vástago ancho. Inmediatamente, se cierra el recipiente herméticamente. Se agita vigorosamente la mezcla durante unos 20 s para evitar la formación de grumos de cemento. Para ello, se aplica al recipiente un movimiento giratorio horizontal para evitar que una parte de la muestra o del líquido se proyecte hacia la parte superior y quede separada del resto de la disolución.

Se vuelve a colocar el recipiente en el compartimento termostático y se comprueba que la base sobre la que descansa aquél es perfectamente horizontal, para conseguir un espesor uniforme de la capa depositada de cemento. Todas las operaciones que se realicen fuera del compartimento termostático se deben hacer con la mayor rapidez posible (duración máxima 1 min) para evitar que se produzca un descenso apreciable de la temperatura del contenido del recipiente. Transcurrido un período de 7 días en el compartimento termostático, se saca el recipiente del compartimento termostático y se procede, inmediatamente, en menos de 30 s (para evitar la absorción de dióxido de carbono ambiente y un descenso sensible de la temperatura de la disolución), al filtrado de la disolución a vacío sobre un embudo Buchner usando un papel de filtro doble y seco (recogiendo el filtrado en el matraz para filtrado a vacío. Se cierra rápidamente el matraz para filtrado a vacío y se deja enfriar el filtrado a la temperatura ambiente (Fig. 2.31).

Fig. 2.31 Equipo de vacío empleado para el filtrado

Determinación de la concentración de iones hidroxilo

Se homogeneiza el filtrado por agitación del matraz para filtrado a vacío, se toman con pipeta 50 ml de la disolución y se pasan a un vaso de 250 ml (Fig. 2.32).

Fig. 2.32 Agitador magnético "Bunsen".

Se muestra la tonalidad amarilla luego de ser agregado el indicador de naranja de metilo

Se añaden cinco gotas del indicador de naranja de metilo y se determina la alcalinidad total de la disolución con ácido clorhídrico diluido 0,1 mol/l. El punto final de la valoración se corresponde con el cambio de color de amarillo a rosa (Fig. 2.33).

Fig. 2.33 Tonalidad rosada clara después de valorar con ácido clorhídrico

Se guarda la disolución valorada, A, para la determinación de la concentración del óxido de calcio.

Se calcula la concentración en iones hidroxilo $[OH^-]$, en milimoles por litro, mediante la siguiente fórmula:

$$[OH^-] = \frac{1000 \times 0,1 \times V_3 \times f_2}{50} = 2 \times V_3 \times f_2$$

donde

V_3 es el volumen de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l utilizado en la valoración, en mililitros;

f_2 es el factor de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l.

Determinación de la concentración de óxido de calcio

Usando la disolución valorada, A, remanente después de haber completado el apartado anterior, se ajusta el pH a $(12,5 \pm 0,2)$ con la disolución de hidróxido de sodio, utilizando el pH-metro. Se valora con la disolución de EDTA 0,03 mol/l,

determinando el punto final por uno de los dos métodos comentados. Se calcula la concentración de óxido de calcio, $[CaO]$, en milimoles por litro, mediante la siguiente fórmula:

$$[CaO] = \frac{1000 \times 0,03 \times V_4 \times f_1}{50} = 0,6 \times V_4 \times f_1$$

donde

V_4 es el volumen de la disolución de EDTA utilizado en la valoración, en mililitros;

f_1 es el factor de la disolución de EDTA

Resultados

Cálculo y expresión de los resultados

Se calculan las concentraciones de iones hidroxilo y de ión calcio (expresado como óxido de calcio), expresadas cada una con una aproximación de 0,1 mmol/l. Cuando se han obtenido dos resultados de dos ensayos, el resultado se expresa como el valor medio de dichos resultados con una aproximación de 0,1 mmol/l. Si los resultados de dos ensayos difieren en más de dos veces la desviación típica de repetibilidad, se repite el ensayo y se toma el valor medio de los dos resultados más próximos.

Evaluación de la puzolanicidad

Se llevan las concentraciones de iones hidroxilo y de ión calcio (expresado como óxido de calcio) en la disolución, obtenidas de acuerdo con el apartado anterior, por medio de un punto, a un diagrama que representa la concentración de saturación en ión calcio de la disolución (expresada como óxido de calcio) en función de la concentración de iones hidroxilo a 40°C.

La muestra cumple el ensayo de puzolanicidad cuando el punto que se obtiene en la curva de ión calcio (expresado como óxido de calcio) está situado por debajo de la curva de concentración de saturación patrón (Fig. 2.34).

Fig. 2.34 Diagrama para la representación gráfica de los resultados de la puzolanicidad para diferentes edades

UNE-EN 14774-1:2010

*Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.
Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.*

Lugar de ensayo

Laboratorio de Combustibles y Petroquímica (LCP)
Fundación Gómez-Pardo (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía-
Universidad Politécnica de Madrid-UPM).

Preparación de la muestra para análisis

Las muestras de biomasa, antes de ser analizadas en el laboratorio, necesitaron un tratamiento previo para una buena representatividad de los resultados. Para ello, y siguiendo las directrices establecidas en la norma UNE EN 14780 “*Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras*”, se trituyó la muestra con un molino de bolas y con ayuda de un tamizado manual, se obtuvo la muestra representativa para el análisis de las cáscaras de almendra. El tamaño de partícula de la muestra fue inferior a 25 mm.

Determinación del contenido en humedad

La determinación de la humedad total de la muestra de biocombustible, se llevó a cabo según normativa UNE EN 14774-1 “*Método de secado en estufa*”. La muestra de biocombustible se seca a una temperatura de 105⁰C en una atmósfera de aire hasta que se alcanza una masa constante. El porcentaje de humedad se calcula a partir de la pérdida de masa de la muestra e incluye un procedimiento para la corrección de los efectos de la flotabilidad. El equipo usado es una estufa de la marca Heraeus de 110 l de capacidad con ventilación forzada.

UNE-EN 15104:2011

Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales

Determinación del análisis elemental (carbono, hidrógeno y nitrógeno)

El contenido en carbono, hidrógeno y nitrógeno se llevó a cabo según la normativa UNE-EN 15104 “*Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales*”. El objetivo de dichas determinaciones reside en la importancia de:

- Determinación el contenido en carbono para la determinación de las emisiones de CO₂.
- Determinación de contenido en hidrógeno para el cálculo de poder calorífico neto o inferior.
- Determinación de contenido en nitrógeno para la determinación de las emisiones de NO_x y para la corrección algorítmica del software para la determinación de poder calorífico superior.

El principio del método consiste en quemar una masa conocida de la muestra en presencia de oxígeno, o bien en una mezcla oxígeno/gas portador, en condiciones tales que se convierte en cenizas y productos gaseosos de la combustión. Estos productos gaseosos consisten principalmente en dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno elemental y/u óxidos de nitrógeno, óxidos y oxiácidos de azufre y haluros

de hidrógeno. Los productos de combustión se tratan para asegurarse de que cualquier hidrógeno asociado con los productos de combustión de azufre o haluros se libera como vapor de agua. Los óxidos de nitrógeno se reducen a nitrógeno elemental y se eliminan aquellos productos de combustión que interferirían con los subsiguientes procedimientos de análisis de gases. Luego, las fracciones másicas de dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno de la corriente gaseosa se determinan cuantitativamente mediante los detectores óptimos para el análisis de gases.

En este caso, el analizador elemental usado para la determinación de contenido en carbono, hidrógeno y nitrógeno en la muestra de cáscaras de almendra es un analizador LECO modelo CHN628.

Determinación del contenido en azufre

La determinación del contenido en azufre se usa analíticamente para llevar a cabo la corrección algorítmica del software para la determinación del poder calorífico superior. Con respecto a la tecnología de la combustión, dicho parámetro se usa para determinar las emisiones de SO_x .

El principio del método es exactamente igual que el apartado anterior, usando un detector infrarrojo para la determinación de dichos gases de combustión. En esta ocasión, para la determinación de contenido en azufre, se ha usado el módulo LECO S632.

UNE-EN 14918:2011

Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico

Determinación del poder calorífico superior e inferior

La determinación del poder calorífico de una biomasa se lleva a cabo según la normativa UNE EN 14918 “*Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico*”. El principio del método consiste en determinar el poder calorífico bruto a volumen constante y a una temperatura de referencia de 25°C, usando una bomba calorimétrica calibrada mediante la combustión de ácido benzoico certificado.

Para la determinación de poder calorífico bruto o superior se pesa una porción de muestra y se quema con una presión alta de oxígeno, en una bomba calorimétrica bajo condiciones específicas. La capacidad calorífica efectiva del calorímetro se determina en experimentos de calibración mediante la combustión de ácido benzoico certificado bajo condiciones similares a las indicadas en la certificación. El incremento corregido de la temperatura se establece a partir de observación de la temperatura antes, durante y después de que tenga lugar la combustión. La duración y la frecuencia de las observaciones de la temperatura dependen del tipo de calorímetro usado. Inicialmente se añade agua a la bomba para proporcionar una fase de vapor antes de la combustión, permitiendo de ese modo que el agua formada, a partir del hidrógeno y la humedad en la muestra, se pueda considerar como agua líquida.

El valor del poder calorífico bruto se calcula a partir del incremento corregido de la temperatura y de la capacidad calorífica efectiva del calorímetro, con las correcciones que procedan por la energía de ignición, combustión de la mecha y de los efectos térmicos de las reacciones colaterales como la formación del ácido nítrico. Adicionalmente, se aplica una corrección para tener en cuenta la diferencia en energía entre el ácido sulfúrico acuoso formado en la reacción de la bomba y el dióxido de azufre gaseoso, es decir, el producto de reacción requerido por el azufre del biocombustible. El correspondiente efecto energético entre el ácido clorhídrico acuoso y gaseoso se puede rechazar debido al contenido usualmente bajo de cloro de la mayor parte de los biocombustibles (que inducen un bajo valor de corrección).

El poder calorífico neto o inferior, tanto a volumen constante como a presión constante del biocombustible, se calcula a partir del poder calorífico bruto a volumen constante determinado sobre la muestra de análisis. Para el cálculo del poder calorífico neto a volumen constante es necesario conocer la humedad y el contenido en hidrógeno de la muestra. La bomba calorimétrica usada para la determinación del poder calorífico bruto y neto de las cáscaras de almendra es de la marca PARR modelo 6200 (Fig. 2.35).

Fig. 2.35 Bomba calorimétrica para la determinación del poder calorífico (marca PARR modelo 6200)

A continuación se muestra la imagen de una bomba de combustión calorimétrica de tipo clásico con termostato (Fig. 2.36).

Fig. 2.36 Esquema de bomba de combustión calorimétrica de tipo clásico con termostato

2.2.2 METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE MORTERO

En este apartado se explican todos los detalles sobre el proceso de fabricación de las probetas de mortero destinadas a los ensayos de resistencia a compresión y a flexión, que se han realizado para determinar sus propiedades mecánicas. Todo este desarrollo experimental se ha llevado a cabo en las instalaciones del LACAE siguiendo las especificaciones establecidas en las normas españolas UNE tanto en el tamaño, dosificación y características de las probetas, como en el propio proceso de fabricación y conservación de las mismas.

2.2.2.1 Dosificación

Una vez determinados todos los componentes que conforman el mortero que se está estudiando, se fijan las dosificaciones empleadas para elaboración de las probetas.

Como se ha manifestado, este trabajo de investigación evalúa por una parte el mortero elaborado con ceniza de cáscara de almendra sustituyendo parte del cemento y por otra la del mortero elaborado con cáscara de almendra sustituyendo parte del árido. Se establecen unos porcentajes del 10, 20 y 30% de ceniza del total del cemento utilizado en peso y del mismo modo, la cáscara sustituye al árido en un 10, 20 y 30% del total de árido utilizado en peso.

Se establece un sistema de codificación para el control y seguimiento de las diferentes probetas fabricadas basado en el componente de sustitución, si se trata de cáscara de almendra calcinada (ceniza) se denota con la letra “C” y si es cáscara en estado natural con la letra “A”, seguido del porcentaje de sustitución en peso (10, 20 y 30%) (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Codificación de las probetas de mortero

Código	Tipo de probeta
PP	Probeta Patrón, con un 100% de cemento y 100% de árido
C10	Probeta con un 10% de ceniza en sustitución de cemento
C20	Probeta con un 20% de ceniza en sustitución de cemento
C30	Probeta con un 30% de ceniza en sustitución de cemento
A10	Probeta con un 10% de cáscara en sustitución del árido
A20	Probeta con un 20% de cáscara en sustitución del árido
A30	Probeta con un 30% de cáscara en sustitución del árido

Para la fabricación de las probetas de mortero se ha seguido el procedimiento especificado en la norma UNE-EN 196-1:2005 *“Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”*, que comprende la determinación de las resistencias a compresión, y opcionalmente a flexión, de probetas prismáticas de

dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm. Las probetas se han fabricado con un mortero plástico, compuesto de una parte en masa de cemento, tres partes en masa de arena normalizada CEN, y media parte de agua (relación agua/cemento de 0,50). Se hace notar que para la fabricación de la probeta C10 la relación agua/cemento fue de 0,6 con el fin de mejorar la trabajabilidad de la pasta. El agua utilizada ha sido agua desionizada.

En la Tabla 2.7 se recogen las distintas dosificaciones para la elaboración de cada amasada de mortero.

Tabla 2.7 Dosificaciones según amasadas

PROBETA	Cemento (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Ceniza Almendra (g)	Árido Almendra (g)
PP	450	1350	225	-	-
C-10	405	1350	270	45	-
C-20	360	1350	225	90	-
C-30	325	1350	225	135	-
A-10	450	1215	225	-	135
A-20	450	1080	225	-	270
A-30	450	945	225	-	405

En principio se intuye que la porosidad de la ceniza de cáscara de almendra puede provocar la absorción del agua de amasado, dificultado la hidratación del cemento durante el amasado. Al realizar el ensayo de determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen, UNE-EN 196-3:2005, se comprueba que la pasta de cemento y un 10% de ceniza como sustitución del cemento, necesitan más agua que el resto de pastas. Por este motivo, es la única dosificación que varía su contenido de agua.

Las cantidades de cáscara de almendra se fijan con la cáscara seca. Durante la fabricación de las primeras probetas de mortero con cáscara de almendra en los

distintos porcentajes de sustitución, se observa que las masas tienen una consistencia seca pero trabajable. Al desmoldar las probetas, la cáscara de almendra ha absorbido gran parte del agua de amasado dando lugar a unas probetas con grandes poros y coqueras (Fig. 2.37).

Fig. 2.37 Probeta con cáscara saturada (izquierda) y probeta con la cáscara seca (derecha)

Para dar solución a este problema, se valoran varias alternativas tomadas en investigaciones de similares características. Entre estas medidas están el uso de un aditivo fluidificante (Bonzón-Orgeirea N. 2012); el aumento del agua de amasado (Costa-Pozo A. 2012) y la saturación de la cáscara (Gonzalez-Cotera M.). De todas estas opciones se elige saturar la cáscara de almendra, con el objetivo de poder estudiar los morteros sin la influencia de ningún aditivo ni aumentar la relación agua/cemento establecida.

Para la realización de los diferentes ensayos con los que se pretende estudiar las características de los morteros, se han fabricado probetas de 4 tamaños diferentes (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Número de probetas fabricadas. Tipos de ensayos a las que son sometidas

TIPO DE PROBETA	ENSAYOS		Código	Nº DE PROBETAS	Nº DE AMASADAS		
PRISMÁTICAS 40×40×160 mm	MECÁNICOS	Flexión y Compresión	PP	15	5		
			C-10	15	5		
			C-20	15	5		
			C-30	15	5		
			A-10	15	5		
			A-20	15	5		
			A-30	15	5		
			FÍSICOS	Densidad y Absorción	PP	3	1
					C-10	3	1
	C-20	3			1		
	C-30	3			1		
	A-10	3			1		
	A-20	3			1		
	A-30	3			1		
	DURABILIDAD	Heladicidad			PP	3	1
		Ataque sales NaCl			C-10	3	1
			C-20	3	1		
			C-30	3	1		
		Ataque sales Na ₂ SO ₄	A-10	3	1		
			A-20	3	1		
			A-30	3	1		
		Total			147	49	
		CILÍNDRICAS Ø100 mm	ACÚSTICOS	Tubo de impedancia	PP	3	3
	C-10				3	3	
C-20	3				3		
C-30	3				3		
A-10	3				3		
A-20	3				3		
A-30	3				3		
Total			21	21			
CILÍNDRICAS Ø30 mm	ACÚSTICOS	Tubo de impedancia	PP	3	Se utiliza la misma amasada que la empleada en la fabricación de las cilíndricas de Ø100 mm		
			C-10	3			
			C-20	3			
			C-30	3			
			A-10	3			
			A-20	3			
			A-30	3			
Total			21				
OTRAS 250×240×20 mm	TÉRMICOS	Caja térmica	PP	1	1		
			A-10	1	1		
			A-20	1	1		
			A-30	1	1		
Total			4	4			

2.2.2.2 Fabricación de probetas prismáticas

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

En la fabricación de las probetas para los ensayos de resistencia se ha seguido lo estipulado en la norma UNE-EN 196-1 que describe el método para elaborar las probetas que serán sometidas a los ensayos de determinación de resistencias a flexión y compresión, una vez el mortero esté endurecido.

EQUIPO DE LABORATORIO

Balanza

Amasadora

Moldes de 40 mm x 40 mm x 160 mm

Espátulas

Regla metálica

Compactadora

Cámara húmeda

Recipientes de conservación para el curado de las probetas en agua

Se deben diferenciar tres pasos en la elaboración de las probetas hasta que puedan ser empleadas en los distintos ensayos. Estos pasos son: amasado, fabricación y curado.

Amasado

El procedimiento seguido para el amasado es el siguiente: se pesan las cantidades fijadas anteriormente dosificadas según el tipo de mortero que se vaya a realizar. A continuación se vierte en el recipiente de la amasadora el agua y el cemento o la mezcla de cemento con ceniza de cáscara de almendra en el caso de que fuera un mortero con sustitutivo de ceniza y se amasa a velocidad lenta durante 30 segundos. En los 30 segundos siguientes, a velocidad lenta, se va introduciendo por la tolva el árido y si el mortero que se está elaborando es el de sustitutivo de árido por cáscara de almendra en estado natural, para evitar la obstrucción de la tolva, se levanta la rejilla de seguridad y se introduce por dicha zona la cáscara de almendra en el recipiente lo más rápido posible para no perder tiempo de amasado, mientras que el árido se sigue introduciendo por la tolva. Una vez se tienen todos los materiales

introducidos se amasa durante 30 segundos a velocidad rápida, transcurrido este tiempo se para durante 90 segundos de los que los 15 primeros segundos se puede aprovechar para limpiar las paredes del recipiente con una espátula. Por último se vuelve a amasar otros 60 segundos a velocidad rápida (Fig. 2.38).

Fig. 2.38 Preparación de material para amasado: Amasadora; Colocación de recipiente con el agua y el cemento y accionamiento del inicio de amasado

Teniendo el mortero amasado, se procede a realizar las probetas prismáticas.

Fabricación

Antes de realizar las probetas los moldes han sido previamente limpiados y engrasados con desengrasante para evitar que el mortero se adhiera a las caras y facilitar su posterior desmolde. Se coloca el molde limpio y engrasado con la tolva en la compactadora. Se vacía el mortero obtenido en los tres compartimentos del molde en dos capas: la primera hasta la mitad del molde, se extiende con la espátula más larga. Se acciona la compactadora y se compacta esa primera capa con 60 golpes. Seguidamente se vierte el resto del mortero hasta un poco más del tope del molde, se extiende con la espátula más corta y se vuelve a compactar con otros 60 golpes (Figs. 2.39 y 2.40).

Fig. 2.39 Molde engrasado; Compactadora con molde; Vertido del mortero por capas

Fig. 2.40 Extendido con espátula; Vertido de la segunda capa; Aspecto de la superficie después del compactado

Por último se quita el molde de la compactadora, se le quita la tolva y se engrasa con una regla eliminando el exceso dejando la superficie lisa, sin coqueras y nivelada con el borde superior del molde. El molde con el mortero se tapa con un cristal engrasado con desmoldante para evitar que se adhiera a él y se coloca en la cámara húmeda durante 24 horas, para transcurrido este tiempo desmoldarlo y proceder a su curado.

Pasadas las 24 horas se realiza el desmoldado. Se sacan de la cámara húmeda se desmontan los moldes y se identifican las probetas con código y fecha de fabricación y se prosigue con el curado (Fig. 2.41).

Fig. 2.41 Probeta sacada de cámara húmeda; Desmoldado de probetas; Identificación

Curado

Para el curado de las probetas, estas son sumergidas en los recipientes de conservación en agua. Manteniéndolas en su interior durante 28 días, salvo las ensayadas a 7 y 14 días. Transcurrido el periodo de curado, las probetas se sacan para ser sometidas a ensayos.

Como el número de probetas necesarias para la realización de estos ensayos es alto lo que implica disponer de espacio para su curado se ha optado por fabricar cubetas de inmersión utilizando para ello cajas de plástico con tapa para evitar evaporaciones. Colocando unos perfiles que permitan que todas las caras de las probetas estén en contacto con el agua, condición que se debe cumplir en el curado.

Se llenan de agua desionizada de manera que las probetas estén totalmente cubiertas de agua por su cara superior. Estas cubetas se mantienen fijas, colocadas en el laboratorio en posición horizontal (Fig. 2.42).

Fig. 2.42 Colocación de probetas en cubetas de inmersión rellenas con agua desionizada

2.2.2.3 Fabricación de probetas cilíndricas

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

UNE-EN ISO 10534-2:2002

Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia

Las probetas cilíndricas, utilizadas para el ensayo acústico de medida en tubo de impedancia de la absorción acústica, deben ser de 100 mm de diámetro para el tubo grande que serán ensayadas a baja frecuencia y de 29 mm de diámetro para el tubo pequeño que serán ensayadas a alta frecuencia. La norma UNE-EN ISO 10534-2 no exige un espesor de las probetas, solo especifica que el espesor de las muestras sea el espesor de fábrica, siempre que no supere el espesor máximo determinado de los distintos tubos, que son de 200 mm para el caso del ensayo de medida de absorción acústica. Para esta investigación se optó por fabricar probetas de 100 mm de espesor para las de tubo grande y de 30 mm de espesor para las del tubo pequeño.

EQUIPO DE LABORATORIO

Balanza
Amasadora
Moldes de Ø100 mm y 100 mm de espesor
Gatos
Moldes de Ø 29 mm y 30 mm de espesor (se ha usado como molde las Agujas de Le Chatelier)
Plaquetas de vidrio de 50×50 mm; conjunto de dos por molde
Mordazas
Cinta adhesiva
Regla
Espátula
Aguja y martillo para compactado
Destornillador
Baldosa
Desenfofrante
Cubeta de inmersión para curado en agua

Amasado

El proceso de amasado del mortero es el mismo que indica la norma UNE-EN 196-1 para la fabricación de las probetas prismáticas seguido en el apartado anterior

Fabricación

Con una amasada se llenará un molde de las probetas cilíndricas de Ø100 mm y otro molde de las de Ø29 mm. No hay ninguna norma que regule cómo debe hacerse este tipo de probetas, por lo que se ha establecido un método propio de elaboración.

Para los moldes de Ø100 mm se llevará el siguiente procedimiento:

Primero se cierran los moldes con un gato, ya que están abiertos en un lado para facilitar el desmolde. A continuación se coloca el molde sobre una baldosa y se cubre todo el borde de apoyo con una cama de arena para retener posibles filtraciones de mortero durante el vertido (Fig. 2.43).

Fig. 2.43 Molde de Ø100 mm listo para su llenado

Se engrasan las paredes del molde con desengrasante y se procede al vertido que se hace en dos tongadas. Se vierte la primera tongada y se compacta dando golpes por los lados del molde con un martillo y se va pinchando la masa con una aguja para ayudar a que las burbujas del aire del interior de la masa vayan desapareciendo. Cuando se ve la masa compactada se procede a verter la segunda tongada compactándola de la misma manera (Fig. 2.44).

Fig. 2.44 Llenado de probetas cilíndricas de Ø100 mm

Finalmente se enrasan los moldes con la regla quitando el mortero sobrante, dejando la base lisa y sin coqueras y se deja durante 24 horas antes de su desmoldado a temperatura ambiente en el laboratorio. En el caso de los moldes de $\varnothing 29$ mm los pasos a seguir serán los siguientes:

Se cierran uniendo las patas de las agujas de Le Chatelier con cinta adhesiva, se colocan sobre una plaqueta de vidrio de 50×50 mm y se engrasa con desencofrante. Se prosigue con el llenado del molde, igual que anteriormente se hace en dos tongadas. Se vierte una primera capa y se compacta dando golpes con el martillo mientras se pincha la masa con una aguja para cerrar posibles oquedades o poros de aire. A continuación se vierte la última capa y se compacta de igual forma (Fig. 2.45).

Fig. 2.45 Llenado de probetas cilíndricas de $\varnothing 29$ mm

Por último se quita el material sobrante enrasando con la regla dejando la cara lisa y se tapa con otra plaqueta de vidrio de 50×50 mm previamente engrasada. Para sujetar el molde tapado con los dos vidrios se le coloca una mordaza que hace de pinza. Se deja secar durante 24 horas en el laboratorio a temperatura y humedad ambiente antes de proceder al desencofrado. Transcurridas las 24 horas se desmoldan las probetas. Por un lado las probetas grandes, quitando los gatos y abriendo los moldes con ayuda de un destornillador y por otro las pequeñas, quitando la mordaza que sujeta los vidrios y cortando la cinta adhesiva. Una vez desmoldadas se identifican las probetas escribiendo en una de sus caras el nombre y la fecha de fabricación (Figs. 2.46 y 2.47).

Fig. 2.46 Probetas cilíndricas de Ø100mm y Ø29 mm en proceso de fraguado

Fig. 2.47 Desmoldado de probetas cilíndricas de Ø100 mm y Ø29 mm

Curado

El proceso de curado llevado a cabo será el mismo para ambos tamaños de probetas. Se sumergen en las cubetas de curado durante 28 días (Fig. 2.48).

Fig. 2.48 Probetas cilíndricas de Ø100 mm y Ø29 mm en cubetas de curado

2.2.2.4 Fabricación de otras probetas

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

Para la realización del ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente se han fabricado probetas en forma de placas, de dimensiones 250x240 mm intentando establecer un espesor igual para todas la placas de mortero, de aproximadamente entre 20 y 30 mm. Los moldes utilizados para fabricar estas probetas han sido elaborados en el propio laboratorio, con una base de madera de aglomerado con acabado plástico para evitar absorción del agua de amasado, utilizando una cola para madera para pegar en los bordes un listón del mismo material de 30 mm de altura, consiguiendo un vacío interior de las dimensiones de las probetas que se quieren fabricar (Fig. 2.49).

Fig. 2.49 Molde para fabricación de probetas para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente

EQUIPO DE LABORATORIO

Báscula

Amasadora

Moldes de aglomerado con superficie interior 250x240x30 mm

Cola para madera

Regla

Espátula

Martillo para compactado

Destornillador

Desenconfante

Cámara húmeda

Amasado

El proceso de amasado del mortero es el mismo que marca la norma UNE-EN 196-1 para la fabricación de las probetas prismáticas seguido en el apartado anterior.

Fabricación

El procedimiento a seguir para la elaboración de las probetas consiste en una vez engrasado con desengrasante el molde, verter en dos capas el mortero. Entre capa y capa se compacta dando pequeños golpes con el martillo en los laterales del molde ayudando a que las burbujas de aire salgan al exterior. Se enrasa la superficie intentando que quede lisa y sin huecos (Fig. 2.50).

Fig. 2.50 Elaboración de probetas 250x240x30 mm para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente. Engrasado del molde; Extendido de la masa; Compactado de la probeta.

Las probetas se dejan fraguar durante 24 horas a temperatura ambiente en el laboratorio, ya que si se introdujeran en la cámara húmeda, los moldes se hincharían con la humedad provocando la deformación de las probetas y la aparición de posibles fisuras en las mismas (Fig. 2.51).

Fig. 2.51 Fraguado de probetas de 250x240x30 mm a temperatura ambiente en laboratorio

Pasadas las 24 horas se desmoldan quitando los listones con ayuda de un destornillador o palanca. Una vez desmoldadas las probetas se identifican escribiendo el correspondiente código identificativo en la superficie (Fig. 2.52).

Fig. 2.52 Desmoldado de probetas de 250x240x30 mm e identificación de las mismas

Curado

El curado de las probetas se realizará en la cámara húmeda durante 28 días (Fig. 2.53).

Fig. 2.53 Curado de probetas de 250x240x30 mm en cámara húmeda

2.2.3 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO FRESCO

2.2.3.1 Consistencia normal del cemento

UNE-EN 196-3:2005+A1:2009

*Métodos de ensayo de cementos.
Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*

Objeto

Método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento mediante el aparato de Vicat.

Fundamento

La pasta de cemento de consistencia normal tiene una resistencia especificada a la penetración de una sonda normalizada. El agua requerida para conseguir dicha consistencia se determina mediante sucesivos ensayos de penetración de pasta variando las cantidades de agua.

EQUIPO DE LABORATORIO

Aparato de Vicat: molde y base de vidrio y sonda de $\varnothing 10$ mm

Balanza, con precisión de ± 1 g

Amasadora

Espátula

Regla

Cronometro

Desenconfante

Bureta o probeta graduada.

Procedimiento de ensayo

Primero se prepara la pasta mezclando en la amasadora 500 g de cemento con la cantidad de agua a ensayar, se empieza vertiendo 125 ml. El amasado se efectuará conforme a la norma UNE-EN 196:1. En el inicio de amasado se activa el cronómetro tomándolo como tiempo 0. Se prepara el molde apoyándolo sobre la placa de vidrio y se engrasa con desenconfante (Fig. 2.54).

Fig. 2.54 Molde y placa engrasados para ensayo de consistencia normal

Se transfiere la pasta inmediatamente al molde ligeramente engrasado, colocado previamente sobre una placa base ligeramente engrasada, y se llena hasta rebosar sin compactación ni vibración excesivas. Se eliminan los huecos de la pasta mediante una serie de ligeros golpecitos con la palma de la mano sobre el molde. Se quita el exceso de pasta con un movimiento de serrado suave con un utensilio de borde recto, de

manera que la pasta llene completamente el molde y tenga una superficie superior lisa.

Se ajusta el aparato de Vicat manual provisto de la sonda, montada antes del ensayo, bajando la sonda hasta que esté en contacto con la placa base que vaya a utilizarse y ajustando la puesta a cero en la escala. Se levanta la sonda hasta la posición de espera inmediatamente después de enrasar la pasta, se coloca el molde y la placa base en el aparato de Vicat, situándolos centrados debajo de la sonda. Se baja la sonda suavemente hasta que entre en contacto con la pasta.

Se espera entre 1 s y 2 s en esa posición., con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la sonda debe penetrar, entonces, verticalmente en el centro de la pasta. La liberación de la sonda se debe realizar $4 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ después del tiempo de referencia cero. Se lee la escala al menos 5 s tras el fin de la penetración o 30 s después de la liberación de la sonda, lo que ocurra primero.

Se anota la lectura de la escala, que indica la distancia entre la cara inferior de la sonda y la placa base, junto con el contenido de agua de la pasta expresada en tanto por ciento de la masa de cemento. Se limpia la sonda inmediatamente después de cada penetración. Se repite el ensayo con pastas con diferentes contenidos de agua, hasta encontrar una que produzca una distancia de $(6 \pm 2) \text{ mm}$ entre la sonda y la placa base. Se anota el contenido de agua de esta pasta, con una aproximación del 0,5%, como el agua para la obtención de la consistencia normal (Fig. 2.55).

Fig. 2.55 Ensayo de consistencia con el aparato de Vicat

Cálculo

Se calcula la cantidad de agua en porcentaje de peso de cemento, requerida para obtener la penetración de consistencia normal.

$$\% W = \frac{m_w}{m_c} \times 100$$

donde:

$\% W$ porcentaje de agua en función del cemento

m_w masa de agua en ml

m_c masa de cemento en g

2.2.4 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS FÍSICOS

2.2.4.1 Densidad aparente en seco

UNE-EN 1015-10:2000

*Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.
Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido*

Objeto

Esta norma europea tiene por objeto describir un método de ensayo para determinar la densidad aparente en seco de los morteros endurecidos; se aplica a los morteros ligeros, así como a los morteros para uso corriente y a los morteros para juntas finas, utilizando probetas de forma regular.

Fundamento

La densidad aparente en seco de una probeta dada de mortero endurecido se determina dividiendo su masa en estado seco en estufa por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua, en estado saturado.

EQUIPO DE LABORATORIO

Una balanza, con una exactitud igual al 0,1 % con relación a la masa total de la probeta, provista de un estribo porta-probetas para pesar la probeta sumergida en agua.

Una estufa ventilada capaz de mantener una temperatura de $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ o de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Moldes como los descritos en la Norma Europea EN 1015-11.

Preparación de la muestra

Las probetas a ensayar son probetas prismáticas de 40×40×160 mm fabricadas y curadas según se especifica en el punto 2.2.2 *METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE MORTERO* y con una edad de 28 días.

Procedimiento de ensayo

El procedimiento operatorio consiste en sacar las probetas de la cubeta de curado y secarlas con un paño para introducirlas en la estufa. La probeta se seca en la estufa, a

una temperatura de $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta que se alcance masa constante. Para las muestras que contengan componentes orgánicos, por ejemplo en el caso estudiado, cáscara de almendra, se utiliza una temperatura de secado de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se considera que la probeta ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas a intervalos de 2 horas de secado, no difieren en más de 0,2% de la masa de la probeta seca. Se anota la masa de la probeta, $m_{s,sec}$, en kg con una exactitud aproximada del 0,1% (Fig. 2.56).

Fig. 2.56 Realización de pesadas sucesivas de probetas sacadas de estufa

Cálculo y expresión de los resultados

La densidad aparente en seco de cada probeta de mortero se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa, $m_{s,sec}$, en kilogramos, por el volumen de la probeta del mortero endurecido, V_s en metros cúbicos, El valor medio se calcula a partir de los valores individuales obtenidos para cada probeta de mortero, todos los valores se redondean, aproximadamente, a 10 kg/m^3 .

$$\rho = \frac{m_{s,sec}}{V_s}$$

Donde

$m_{s,sec}$ masa de la probeta secada en estufa en kg

V_s volumen de la probeta del mortero endurecido en m^3

ρ Densidad aparente en seco

2.2.4.2 Absorción

UNE-EN 1015-18:2003

Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

Objeto

Esta norma europea tiene por objeto especificar un método de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos que contienen conglomerantes minerales y áridos normales y ligeros.

Fundamento

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se determina en probetas de mortero prismáticas, en las condiciones prescritas, a la presión atmosférica. Después del secado hasta masa constante, una cara de la probeta se sumerge en 5 mm a 10 mm de agua durante un periodo de tiempo especificado. A continuación, se determina el aumento de masa.

EQUIPO DE LABORATORIO

Bandeja, con una profundidad mínima de 20 mm y una superficie plana suficientemente grande para contener las probetas que se han de sumergir; además, debe estar equipada con un dispositivo que permita mantener un nivel constante de agua para que la probeta repose a una distancia conveniente del fondo del recipiente en función de la profundidad de inmersión especificada

Cronómetro, graduado en segundos

Balanza, con una exactitud de 0,1 % de la masa total seca de la probeta

Estufa ventilada, capaz de mantener una temperatura de $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$

Paleta o cuchillo

Papel de filtro absorbente, con una masa específica de $(200 \pm 20) \text{ g/m}^2$ y una capacidad de absorción de agua de $(160 \pm 20) \text{ g/m}^2$; cada resma debe tener doce hojas, cuyo tamaño sea de, aproximadamente, 150 mm x 175 mm

Recinto o cámara de acondicionamiento, capaz de mantener una humedad relativa del $95\% \pm 5\%$ y del $65\% \pm 5\%$.

Molde metálico y cualquier otro equipo auxiliar, (para fabricar probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm), como se describe en la Norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007: *“Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido”*

Agua desmineralizada o destilada

Material de sellado, por ejemplo: cera de parafina o resina sintética reactiva con un punto de fusión superior a 60°C .

Secado

Las probetas se secan en una estufa con ventilación a la temperatura de $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta conseguir masa constante. La constancia de masa se consigue cuando en dos pesadas consecutivas efectuadas en un intervalo de 24 h, durante el proceso de secado, la pérdida de masa es igual o menor del 0,2% de la masa total (Fig. 2.58).

Fig. 2.58 Secado de probetas en una estufa con ventilación a la temperatura de $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$

Procedimiento operatorio

Las probetas se colocan en la bandeja, con las caras rotas (superficie de rotura) de los prismas vueltas hacia abajo, sobre los cuatro soportes de manera que no toquen el fondo de la bandeja y se sumergen en agua hasta una altura de 5 mm a 10 mm durante la duración del ensayo. Las probetas se colocan en el agua inclinándolas con el fin de asegurar la inmersión completa de las probetas con superficies rugosas y evitar la formación de burbujas de aire (Fig. 2.59).

Fig. 2.59 Comprobación del nivel de agua. Disposición de las probetas

Se pone en marcha el cronómetro. Se mantiene el nivel del agua constante durante el ensayo. Se cubre la bandeja para evitar la evaporación en la superficie de las probetas sumergidas (Fig. 2.60).

Fig. 2.60 Bandeja cubierta para evitar la evaporación en la superficie de las probetas sumergidas mientras es cronometrado el tiempo

Si una traza visible de humedad aparece sobre la superficie libre de las probetas, se suspende el ensayo. Se rompen las probetas para confirmar que están completamente saturadas. Si están saturadas, se pesan los dos trozos ensamblados. Si no están completamente saturadas, se repite el ensayo con nuevas probetas.

Para otros morteros distintos a los de renovación:

Se retiran las probetas del recipiente después de 10 min, se elimina rápidamente el agua superficial con un paño humedecido, se pesan las probetas (M1) y se retiran, inmediatamente, del recipiente. Se repite el mismo procedimiento después de 90 min y se pesan (M2).

Para los morteros para renovación, solamente:

Se retiran las probetas del recipiente después de 24 h y se pesan (M3). Inmediatamente después, se divide cada probeta a lo largo de su longitud para obtener trozos cuyas dimensiones sean, aproximadamente, de 80 mm x 40 mm x 20

mm. Se mide la altura de la penetración del agua en el centro de la probeta en una dirección paralela a la dimensión de 80 mm, con una aproximación de 1 mm (Fig. 2.61).

Fig. 2.61 Probetas después del ensayo de absorción de agua

Cálculo y expresión de los resultados

Para los morteros distintos a los de renovación, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es, por definición, igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas tomadas después de 10 min y después de 90 min.

El coeficiente de absorción de agua se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,1(M2 - M1)kg/(m^2 \cdot min^{0,5})$$

Para los morteros para renovación, solamente, se calcula la absorción de agua, expresada en kg/m^2 , después de 24 h, por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,625(M3 - M0)kg/m^2$$

y la altura de penetración del agua que se expresa en mm.

donde:

M_0 masa de la probeta seca con las caras selladas

M_1 masa de la probeta después de una inmersión durante 10 min.

M_2 masa de la probeta después de una inmersión durante 90 min.

M_3 masa de la probeta después de una inmersión durante 24 h.

C coeficiente de absorción de agua

Los valores individuales del coeficiente de absorción de agua (C) se calculan con una aproximación de $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ o con una aproximación de $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$, según el caso.

El valor medio del coeficiente de absorción de agua (C_m) se calcula a partir de los valores individuales con una aproximación $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ o con una aproximación de $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$, según el caso.

2.2.4.3 Porosimetría por intrusión de mercurio

ASTM D4404-84 (2004)

*Standard Test Method for Determination of Pore Volume
and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry*

Objeto y campo de aplicación

El objetivo del ensayo de la porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés) es caracterizar la estructura porosa del material mediante la porosidad total y la distribución e interconexión de los poros.

La porosimetría por intrusión de mercurio es una técnica que permite caracterizar materiales porosos aplicando presiones crecientes a una muestra inmersa en mercurio. Se fundamenta en que la presión necesaria para introducir mercurio en los poros de una muestra es inversamente proporcional al tamaño de los poros.

La porosimetría con mercurio no es únicamente aplicable para ofrecer una amplia gama de tamaños de poros, sino que también los datos fundamentales que produce (el volumen de intrusión de mercurio en la muestra como una función de la presión) son indicativos de las distintas características de los poros y son utilizados para revelar una variedad de propiedades físicas de los materiales sólidos en sí mismos.

El intervalo de diámetros de poros aparentes para los que este método de ensayo es aplicable se fija por el rango de presión operante del instrumento de prueba. Este rango está típicamente entre diámetros de entrada de poro aparente de aproximadamente 100 μm y 2,5 nm (0,0025 μm). Poros más grandes deben ser medidos por otro método.

Equipo utilizado

Para la realización del ensayo se empleó un porosímetro de Micromeritics modelo Autopore IV 9500, que alcanza hasta una presión de 33.000 psi (228 MPa), existente en el LACAE. Con este equipo se cubre un rango de determinación de diámetro de poros comprendido entre 0,006 a 175 μm . Para la realización de los ensayos se siguió la norma ASTM D4404-84 (2004), que aunque sea específica para el análisis de rocas y suelos, la metodología que emplea es válida para el estudio de los morteros.

Preparación de la muestra

Para realizar el ensayo se tomó parte de la muestra sobrante de cada tipo de las probetas ensayadas a compresión a 28 días eliminándose el agua que pudiera haber quedado en los poros mediante el secado de las muestras en estufa de desecación a una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas antes de la medición. El tamaño de las muestras no excedió de 1cm^3 . Se evaluó una muestra para cada tipo de mortero estudiado (Fig. 2.62).

Fig. 2.62 Restos de probetas ensayadas previamente a compresión; Secado de muestras en estufa de desecación; Muestras listas para ensayar en porosímetro de mercurio

Procedimiento de ensayo

El ensayo que se desarrolla en este apartado consiste en medir la cantidad de huecos, y la distribución de los tamaños de los mismos presentes en dicho volumen determinado de muestra. De forma paralela, se miden las variaciones inducidas por los distintos ciclos aplicados (tanto el volumen total de huecos, como los posibles cambios en la distribución de tamaños de poros). El volumen del material se determina mediante inmersión de mercurio. Después de hacerse el vacío sobre la muestra, se aplica una presión hidrostática con mercurio a la cámara que contiene la muestra. La presión con la que se introduce el mercurio es inversamente proporcional al tamaño del poro. Con los valores de presión aplicada y volumen acumulado de mercurio incrustado es posible estimar la porosidad porcentual aplicando la ecuación de Washburn (Washburn 1921) que relaciona el tamaño del poro y la presión aplicada en el mercurio:

$$p = \frac{-4\gamma \cos \theta}{d}$$

donde:

p presión (N/nm²)

γ tensión superficial (N/nm)

θ ángulo de contacto

d diámetro de poro (nm)

Los parámetros fundamentales que se obtienen de la MIP son tres: la porosidad total, el diámetro promedio de poro y la distribución de la estructura porosa. La porosidad total es el volumen total de poros respecto al volumen total del material, donde sólo se tienen en cuenta los poros que están conectados:

$$P_1 = \frac{V_p}{V_m} \times 100$$

donde:

P_1 porosidad total (%)

V_p volumen de poros (nm³)

V_m volumen de material (nm³)

El diámetro promedio de poro es el diámetro correspondiente asumiendo una distribución cilíndrica equivalente. Está relacionado con la conectividad de los poros.

$$\emptyset = \frac{4 \cdot V}{A}$$

donde:

$\emptyset$ diámetro de poro promedio (mm)

V volumen de poros (nm³)

A superficie de material (mm²)

Y, por último, la distribución porosa se determina mediante el volumen de macroporos y mesoporos, que según la clasificación que estableció la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) se fijaron las siguientes categorías: microporos ($\emptyset < 2$ nm), mesoporos ($2 \text{ nm} < \emptyset < 50$ nm) y macroporos ($\emptyset > 50$ nm).

Existen otros valores de caracterización microestructural como el diámetro medio de poro, el diámetro medio de la distribución de poros, el diámetro crítico o el diámetro umbral. Pero se ha seleccionado el diámetro de poro promedio porque es el más usado en las referencias.

2.2.5 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS MECÁNICOS

2.2.5.1 Resistencia mecánica a flexión

UNE-EN 196-1:2005

*Métodos de ensayo de cementos.
Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*

Objeto y campo de aplicación

Esta norma europea describe el método para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y, opcionalmente, a flexión del mortero de cemento. Este método se aplica a los cementos comunes y a los otros tipos de cementos y materiales cuyas normas hagan referencia a este método. Puede no ser aplicable a otros tipos de cementos que tengan, por ejemplo, unos tiempos iniciales de fraguado muy cortos.

El método se emplea para comprobar que la resistencia a compresión del cemento es conforme con su especificación y para el ensayo de validación de la arena de referencia CEN, EN 196-1, o para el equipo alternativo de compactación.

Esta norma describe el equipo y procedimiento de referencia y permite la utilización de procedimientos y equipos alternativos de compactación, siempre y cuando hayan sido validados de acuerdo a lo indicado en esta norma. En caso de litigio, solo se aplicará el procedimiento y equipo de referencia.

Fundamento

El método comprende la determinación de las resistencias a compresión, y opcionalmente a flexión, de probetas prismáticas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm. Como quedó explicado en el epígrafe 2.2.2.2 las probetas se fabrican con un

mortero plástico, compuesto de una parte en masa de cemento, tres partes en masa de arena normalizada CEN, y media parte de agua (relación agua/cemento de 0,50). Se pueden utilizar arenas normalizadas CEN de diferentes orígenes y países, con la condición de que, al ser utilizadas, los resultados de las resistencias mecánicas no difieran de forma significativa de los obtenidos utilizando la arena de referencia CEN.

En el procedimiento de referencia, el mortero se prepara por amasado mecánico y se compacta en un molde utilizando una compactadora. Pueden emplearse otros equipos y procedimientos de compactación alternativos, con la condición de que, al ser utilizados, los resultados de las resistencias mecánicas no difieran de forma significativa de los obtenidos utilizando la compactadora y el procedimiento de referencia.

Las probetas se conservan en el molde en una atmósfera húmeda durante 24 h, y, después del desmoldeado, las probetas se sumergen en agua hasta el momento de los ensayos de resistencia. A la edad requerida, las probetas se retiran de su medio de conservación húmedo, se rompen a flexión, determinando la resistencia a flexión cuando se requiera, o se rompen mediante otros métodos adecuados que no sometan a las mitades del prisma a esfuerzos dañinos, y cada mitad se somete al ensayo de resistencia a compresión.

Edad de las probetas para los ensayos de resistencias mecánicas

Se calcula la edad de las probetas desde el "tiempo cero". Para determinar estos periodos se parte del mismo momento del amasado en el que agua y cemento entran en contacto. Se realizarán ensayos de resistencia a diferentes edades dentro de los siguientes límites:

24 h $\pm$ 15 min; 48 h $\pm$ 30 min; 72 h $\pm$ 45 min; 7 d $\pm$ 2 h; $\geq$ 28 d $\pm$ 8 h

Equipo de Laboratorio. Condiciones

El laboratorio LACAE donde se ha efectuado la preparación de las probetas se ha mantenido a una temperatura de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, y con una humedad relativa no menor del 50%. La cámara húmeda para la conservación de las probetas en el molde, se ha

mantenido a una temperatura de $(20,0 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa no menor del 90%.

Los recipientes de conservación para el curado de las probetas en agua, y las gradillas sobre las que se colocan, han sido de un material que no reacciona con el cemento. La temperatura del agua se ha mantenido a $(20,0 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$.

La temperatura y la humedad relativa del aire en el laboratorio y la temperatura del agua en los recipientes de conservación se han anotado al menos una vez al día durante las horas de trabajo. La temperatura y la humedad relativa de la cámara húmeda, se han registrado al menos cada 4 h.

El cemento, la arena normalizada CEN, el agua y los aparatos empleados en la fabricación de las probetas han estado a la temperatura de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Dispositivo de ensayo para el cálculo de la resistencia a flexión (Fig. 2.63).

La resistencia a flexión se ha medido mediante un dispositivo apropiado en la máquina de ensayo a compresión, cumpliendo los siguientes requisitos:

Ha sido capaz de aplicar cargas de hasta 10 kN, con una precisión de $\pm 1,0\%$ de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, y con una velocidad de carga de (50 ± 10) N/s.

Ha estado provisto de un dispositivo de flexión que incorpora dos rodillos de apoyo de acero de $(10,0 \pm 0,5)$ mm de diámetro, distantes uno del otro $(100,0 \pm 0,5)$ mm, y un tercer rodillo de carga de acero del mismo diámetro que los anteriores y equidistante de los otros dos. La longitud de estos rodillos ha estado comprendida entre 45 mm y 50 mm.

Fig. 2.63 Resistencia a flexión medida mediante un dispositivo apropiado en la máquina de ensayo a compresión

Procedimiento de ensayo

Se coloca el dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión, estando compuesto por dos rodillos de apoyo en la parte inferior separados 100 mm y uno en la parte superior equidistante a estos dos y que es el de carga.

Las probetas que deben ensayarse a una edad determinada (distinta de 24 h, o 48 h en caso de retraso en el desmoldado), deberán sacarse del agua desionizada como máximo 15 min antes de la realización del ensayo. Se quita cualquier sedimento que se haya depositado en las caras del ensayo. Se cubren las probetas con un trapo húmedo hasta el momento del ensayo.

Se coloca la probeta prismática en la máquina de ensayo con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga verticalmente mediante los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta de la probeta y se incrementa uniformemente, a una velocidad de (50 ± 10) N/s hasta rotura. Se mantienen las mitades de la probeta cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

Cálculo y expresión de los resultados

Se calcula la resistencia a flexión, R_f , en megapascuales, mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

donde

R_f es la resistencia a flexión (en megapascuales)

b es el lado de la sección cuadrada del prisma (en milímetros)

F_f es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (en newton)

l es la distancia entre soportes (en milímetros)

2.2.5.2 Resistencia mecánica a compresión

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

La resistencia a compresión se ha medido mediante la máquina de ensayo a compresión (Fig. 2.64), la cual ha cumplido los siguientes requisitos:

Tiene una precisión de $\pm 1,0\%$ de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, verificado de acuerdo con la Norma EN ISO 7500-1.

Proporciona una velocidad de aumento de carga de (2400 ± 200) N/s, estando provista de un dispositivo indicador, construido de forma que el valor indicado en el momento de la rotura de la probeta permanece indicado después que la máquina se descarga.

El eje vertical del pistón coincide con el eje vertical de la máquina y, durante la puesta en carga, la dirección del movimiento del pistón ha sido paralela al eje vertical de la máquina. Además, la resultante de las fuerzas pasa por el centro de la probeta.

La superficie del plato inferior de la máquina es perpendicular al eje de la máquina y permanece perpendicular durante la puesta en carga.

El centro de la rótula esférica del plano superior está en el punto de intersección del eje vertical de la máquina con el plano de la superficie inferior del plato superior, con una tolerancia de ± 1 mm. El plato superior está libre para alinearse en el momento del contacto con la probeta. Durante la puesta en carga, la posición relativa de los platos superior e inferior ha permanecido inalterable.

Los platos de la máquina de ensayo son de acero templado de una dureza Vickers de al menos HV 600. Estos platos guardan las dimensiones mínimas de 10 mm de espesor, de $(40,0 \pm 0,1)$ mm de anchura y $(40,0 \pm 0,1)$ mm de longitud.

La tolerancia de planeidad de la totalidad de la superficie de contacto de los platos con la probeta, no ha sido mayor que 0,01 mm según la Norma ISO 1101.

Fig. 2.64 Resistencia a compresión en la máquina de ensayo a compresión

Procedimiento de ensayo

Se ensaya cada semi probeta rota en el ensayo de resistencia a flexión centrando y cargando su cara lateral con relación a los platos de la máquina a $\pm 0,5$ mm, y longitudinalmente de forma que la base de la probeta no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm. Se aumenta la carga uniformemente a una

velocidad de $(2\,400 \pm 200)$ N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

Cálculo y expresión de los resultados

Se calcula la resistencia a compresión R_c (en megapascuales) mediante la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde

R_c es la resistencia a compresión (en megapascuales)

F_c es la carga máxima de rotura (en newton)

1600 = 40 mm x 40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados).

2.2.6 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS ACÚSTICOS

2.2.6.1 Coeficiente de absorción acústica

UNE-EN ISO 10534-2:2002

Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia

ASTM E1050 - 12

Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System

Durante el transcurso del tiempo se ha producido una evolución para determinar el coeficiente de absorción acústica así como técnicas de tipo tradicional como la del tubo de impedancia de ondas estacionarias. Los avances tecnológicos y el desarrollo de diferentes técnicas digitales para el análisis de señales han hecho factible determinar el coeficiente de absorción acústica de los materiales objeto de ensayo, de manera más rápida y precisa consiguiendo abarcar rangos de frecuencias prácticamente continuos.

De esta forma los tubos de impedancia han pasado a ser una constante en las nuevas técnicas de medición, debido entre otras cuestiones, a su fácil implementación, que junto con los principios de acústica en ductos y el análisis de señales, se constituyen en sistemas de evaluación acústica de bajo costo y gran efectividad.

Las técnicas empleadas para la interpretación de los datos se pueden llevar a cabo por medio de: la función de transferencia; el espectro cruzado e incluso técnicas de intensidad sonora para casos posteriores. Las señales de excitación suelen ser variables; desde una señal senoidal estacionaria, al ruido blanco, como también el barrido senoidal y ruido MLS (Maximum Length Sequence).

Objeto y campo de aplicación

El método de ensayo indicado en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 se aplica en la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Puede aplicarse también para la determinación de la impedancia acústica superficial o de la admitancia acústica superficial de los materiales. Puesto que los cocientes de impedancia de un material absorbente acústico se relacionan con sus propiedades físicas, tales como resistencia al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad, las mediciones descritas en este método de ensayo son útiles en investigación básica y en el desarrollo de productos.

El método de ensayo es similar al especificado en la Norma ISO 10534-1 en cuanto que ambos usan un tubo de impedancia con una fuente sonora conectada en uno de sus extremos y la muestra en ensayo en el otro extremo. No obstante la técnica de medición es diferente. En este método de ensayo se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido, y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones fijas usando micrófonos montados en la pared o mediante un micrófono interior móvil, seguido del cálculo de la función de transferencia acústica compleja, la absorción a incidencia normal y los cocientes de la impedancia del material. Este método de ensayo pretende

proporcionar una alternativa, generalmente mucho más rápida, al método de la Norma ISO 10534-1.

Fundamentos

La muestra de ensayo se monta en uno de los extremos de un tubo de impedancia recto, rígido, liso y estanco. Se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente sonora (aleatoria, de secuencia pseudo-aleatoria, de trinos), y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal, y la impedancia normalizada del material en ensayo.

Las magnitudes se determinan como funciones de la frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones.

El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones microfónicas. Se puede obtener un rango de frecuencia extendido combinando las mediciones con diferentes anchos y espaciados.

Las mediciones pueden realizarse usando una de las dos técnicas:

método de los dos micrófonos (usando dos micrófonos en posiciones fija,
método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos posiciones).

Técnica 1: necesita un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y fase entre los dos micrófonos; no obstante combina rapidez, gran precisión y sencillez de implementación. Se recomienda esta técnica para fines generales.

Técnica 2: requiere generación y procesamiento particulares y puede implicar más tiempo, no obstante elimina las diferencias de fase entre los micrófonos y permite un

posicionado óptimo a cualquier frecuencia. Se recomienda esta técnica 2 para la medición de resonadores sintonizados y mediciones de precisión.

El método elegido para el presente proyecto de investigación, consiste básicamente en la excitación de un tubo de impedancias, por medio de ruido aleatorio de banda ancha, para así generar ondas estacionarias dentro de éste. Las ondas serán descompuestas en componentes de ondas incidentes y reflejadas, y las señales serán captadas por 2 micrófonos espaciados entre sí. Con la función de transferencia obtenida entre ambas posiciones, se calcula el coeficiente de absorción a incidencia normal del material de prueba. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Medidas Acústicas y Radioeléctricas (LAMARE) de la Escuela Politécnica de Cuenca (España).

Instrumentación de ensayo

El equipo utilizado ha sido un tubo de impedancia de la empresa Brüel & Kjaer tipo 4206 (Figs. 2.65 y 2.66). Consiste en un filtro ajustable, altavoz, tubo de propagación, soportes de micrófono, tubo para muestras grandes (80 mm de diámetro), y un tubo para muestras pequeñas (25 mm de diámetro). Cada tubo de muestra contiene un émbolo ajustable para colocar la muestra y crear espacios de aire detrás de la muestra si se desea.

Características del filtro:

El filtro ajustable tiene tres configuraciones: paso bajo, paso alto y lineales. El filtro de paso bajo se utiliza para recoger datos acústicos de alta resolución en el rango de frecuencia de 50-100 Hz. El filtro lineal es utilizado en general para el tubo grande. El filtro de paso alto se utiliza para la recogida de datos en el tubo pequeño.

Características del altavoz:

El diámetro del altavoz es de 80 mm. La señal máxima de entrada nominal del altavoz es de 10 vatios de potencia media máxima. La potencia máxima de impulsos permitida por el altavoz es de 50 vatios durante 2 segundos. Tiene una impedancia de 4 ohmios. Como regla general, la entrada al altavoz debe ser inferior a 6 voltios pico a pico para evitar daños.

Características del tubo de muestra grande:

El tubo de muestra grande tiene un diámetro interior de 80 mm. Está clasificado para un rango de frecuencia de 50 a 1600 Hz.

Características del tubo de muestra pequeña:

El tubo de muestra pequeña tiene un diámetro interior de 25 mm. Está clasificado para un rango de frecuencia de 500 a 6400 Hz.

Fig. 2.65 Tubo de impedancia Brüel & Kjaer tipo 4206. Consiste en un filtro ajustable, altavoz tubo de propagación, soportes de micrófono, tubo para muestras grandes (80 mm de diámetro), y un tubo para muestras pequeñas (25 mm de diámetro)

Fig. 2.66 Instrumentación: amplificador de potencia; generador de ruido; calibrador de micrófono

Montaje de la muestra de ensayo

La muestra debe ajustarse bien al portamuestras. Sin embargo no debe ser comprimida indebidamente ni ajustada tan firmemente que quede abombada. Se recomienda sellar los intersticios mediante vaselina o cera. La muestra de ensayo puede fijarse más firmemente, si fuera necesario, tapando y engrasando la totalidad del borde. Por ejemplo las muestras de materiales tipo moqueta deberán ajustarse fuertemente a la placa de cierre mediante cintas adhesivas de doble cara, para prevenir movimientos de vibración o bolsas de aire indeseadas.

La cara anterior de las muestras de ensayo planas debe montarse en un plano normal al eje del tubo. Su posición debe especificarse con tolerancias mínimas: para muestras con caras planas y lisas la tolerancia debe ser de $\pm 0,5$ mm, En el caso de materiales porosos de densidad baja puede ser útil fijar y definir la superficie por medio de una fina rejilla metálica no vibrante de celdas grandes.

Si la muestra tiene una superficie desigual o irregular, deben elegirse posiciones de los micrófonos suficientemente alejadas de manera que la función de transferencia medida corresponda a la zona de onda plana. Cuando la muestra tenga una trasera irregular que pueda introducir un espacio de aire indeseado, se debería poner una capa suficiente de masilla de relleno tipo vaselina entre la muestra y la placa reflectora de cierre de modo que selle la trasera de la muestra y permita disponer la superficie frontal paralela a la placa de cierre.

Conviene ensayar dos muestras, más de dos si las muestras no son uniformes, en series repetidas usando exactamente las mismas condiciones de montaje. En las siguientes figuras puede observarse el proceso de fabricación de las muestras de ensayo y las muestras de calibración utilizadas (Figs. 2.67; 2.68; 2.69).

Fig. 2.67 Fabricación de las probetas y desmoldado

Fig. 2.68 Fabricación de muestras de calibración para el tubo de impedancia Brüel & Kjaer Tipo 4206; muestras de estudio preparadas para ensayo en el tubo de impedancia acústica

Fig. 2.69 Colocación de muestra de calibración en tubo de impedancia acústica

Cálculo y expresión de los resultados

Para medir impedancias específicas y el coeficiente de absorción de sonido, el método de la función de transferencia de dos micrófonos utilizando un tubo de impedancia se muestra en la Fig. 2.70.

Fig. 2.70 Configuración para el tubo de impedancia en la medición de impedancias específicas y los coeficientes de absorción de sonido

Esta técnica de medición utilizada comúnmente está especificada en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 y ASTM E1050 – 12. En este método es medida la función de respuesta de frecuencia entre la presión sonora en Mic. 2 y la presión de sonido en el Mic. 1 (H_{21}), y el coeficiente de reflexión de sonido (R) es calculado utilizando H_{21} mediante la ecuación:

$$R = \frac{H_{21} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{21}} e^{2jk(l+s)}$$

A partir del cálculo del coeficiente de reflexión se puede ahora calcular propiedades adicionales del material, tales como la relación de impedancia específica (Z/p_c) y el coeficiente de absorción de sonido (α) usando R por:

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{1 + R}{1 - R}$$

$$\alpha = 1 - |R^2|$$

donde

- ρ es la densidad del aire
- c es la velocidad del sonido en el aire
- k es el número de onda del aire
- l es la distancia entre Mic. 2 y la parte frontal de la muestra
- s es el espacio comprendido entre los micrófonos

2.2.6.2 Velocidad de los impulsos ultrasónicos

UNE-EN 12504-4:2006

Ensayos de hormigón en estructuras.

Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos

Objeto y campo de aplicación

Esta norma especifica un método para la determinación de la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos en el hormigón endurecido, lo que se utiliza en diversas aplicaciones. En este caso se ensayaran probetas de mortero endurecido para determinar dicha velocidad de propagación.

Principio

Un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie del material en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales. Después de atravesar en el material una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso.

Aparato

Generalidades

El aparato consiste en un generador de impulsos eléctricos, un par de palpadores, un amplificador y un temporizador electrónico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor. Se proporciona una barra de calibración para facilitar un dato para la medida de la velocidad.

Existen dos tipos de aparatos electrónicos para la medida del tiempo:

el osciloscopio donde se muestra el primer frente del impulso respecto a una escala de tiempos adecuada;

el cronómetro de intervalos de lectura digital directa.

El aparato utilizado en el ensayo ha sido un Controls modelo E46, con transductores de 54 kHz, que mide tiempos de propagación en microsegundos. Es usado para detectar fallas o daños, estimar profundidad de fisuras, localizar inclusiones de materiales extraños, evaluar la resistencia a la compresión del material, determinar módulo de elasticidad y controlar la homogeneidad del material. El modelo E46 ofrece salidas de 2,5, 1,5 y 0,5 KV. Para pequeñas distancias y materiales de buena calidad se sugiere la salida de 0,5 KV a fin de minimizar ruidos de fondo. Presenta conexión para carga de batería de 220V/50Hz y visualización digital en microsegundos. Los transductores tienen 5 centímetros de diámetro y en general será necesario interponer una delgada capa de pasta de contacto (Fig. 2.71).

Fig. 2.71 Equipo para la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos CONTROLS E46

El aparato satisface las especificaciones indicadas en la norma:

Es capaz de medir tiempos de propagación en la barra de calibración con un límite de desviación de $\pm 0,1 \mu s$ y una precisión del 2%.

La excitación electrónica del impulso aplicado al palpador emisor tiene un tiempo de formación no mayor que un cuarto de su periodo natural, a fin de asegurar un frente de onda recto del impulso.

La frecuencia de repetición del impulso es lo suficientemente baja para asegurar que el frente de la señal recibida no presenta interferencias por reverberaciones.

El aparato es capaz de determinar el tiempo de llegada del primer frente del impulso con el umbral más bajo posible, aun cuando sea de amplitud pequeña en comparación con la de la primera mitad de onda del impulso.

Procedimiento de ensayo

Factores que influyen en las medidas de velocidad de impulso:

Contenido de humedad

Temperatura del material

Longitud de la trayectoria

Forma y tamaño de la muestra de ensayo

Grietas y coqueras

Colocación del palpador. Se efectúan las medidas de velocidad de impulso situando los dos palpadores en caras opuestas (transmisión directa) (Fig. 2.72).

Fig. 2.72 Colocación de los palpadores en la probeta a ensayar

Medida de la longitud de la trayectoria. En transmisión directa, la longitud de la trayectoria es la distancia más corta entre los palpadores. La precisión de la medida de la longitud de la trayectoria debe registrarse con exactitud del $\pm 1\%$.

Acoplamiento de los palpadores. Debe haber un adecuado acoplamiento acústico entre el material a ensayar y la cara de cada palpador. Muchos materiales presentan un acabado suficientemente liso para asegurar un buen contacto acústico usando un medio de acoplamiento tal como la vaselina, grasa, jabón líquido y pasta de caolín y glicerina, y presionando el palpador contra la superficie del material.

Medida del tiempo de propagación. Utilizando el dispositivo electrónico se debe determinar el intervalo de tiempo indicado de acuerdo con la instrucción del fabricante.

Cálculo y expresión de los resultados

En transmisiones directas la velocidad del impulso se debe calcular mediante la fórmula:

$$V = \frac{L}{T}$$

donde

V es la velocidad del impulso, en km/s

L es la longitud de la trayectoria, en mm

T es el tiempo que tarda el impulso en su trayectoria, en μ s

2.2.7 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS DE DURABILIDAD

2.2.7.1 Resistencia a la cristalización de las sales

UNE-EN 12370:1999

*Métodos de ensayo para piedra natural.
Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*

Uno de los procesos de alteración más agresivos que sufre un material especialmente poroso es el de la cristalización de las sales. No existen normas que regulen métodos de determinación de la resistencia a la cristalización de las sales en morteros y por tanto estudios de su comportamiento frente estos agentes químicos. La presente investigación considera al mortero como material pétreo artificial y por esta razón fundamenta el ensayo sobre probetas de mortero endurecido siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 12370:1999: *“Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales”*.

Por otro lado la norma aclara que *este ensayo se ha diseñado para evaluar la resistencia a la cristalización de las sales de la piedra natural, donde se considere pertinente. Este ensayo no puede usarse de forma aislada y sus resultados deberán ser considerados con otros ensayos físicos para determinar la durabilidad, entre éstos se incluye la norma prEN 12371 Determinación de la resistencia al hielo.*

El sistema poroso del mortero será quien influya en los procesos físico-químicos de alteración y el posible movimiento de fluido en su interior. La durabilidad se verá condicionada por:

Tamaño de poros y separación de éstos

Forma de los poros (superficie específica)

Velocidad de propagación de ultrasonidos (a mayor velocidad, mayor densidad del material y menor porosidad)

Resistencia a la compresión

Coeficiente de adsorción

Para la realización de los ensayos se han empleado dos tipos de sales que pueden producir efectos diferentes en el mortero. Por una parte se ha trabajado con una disolución saturada de NaCl y por otra con una disolución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 14%.

Objeto y campo de aplicación

Esta norma europea especifica un método de ensayo que evalúa la resistencia relativa de la piedra natural con una porosidad abierta superior al 5%, medida de acuerdo con la norma EN 1936, a las alteraciones causadas por la cristalización de las sales.

Principio

Después de secar hasta masa constante, la probeta se sumerge en una solución de sulfato sódico, después se seca y se deja que se enfríe hasta temperatura ambiente. Este ciclo se repite 15 veces y se determina la variación de la masa en porcentaje.

Equipos y materiales empleados

Horno ventilado capaz de mantener una temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$

Balanza capaz de pesar las probetas con una precisión de $\pm 0,001\text{ g}$

Contenedor de agua capaz de mantener la temperatura de las probetas y de las soluciones a $(20 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$

Disolución saturada de NaCl (35,7g NaCl/100cc H_2O). (Recomendaciones de la RILEM⁸

Disolución de sulfato sódico decahidratado al 14% (es decir, 14 g de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ por cada 86 g de agua desionizada). La densidad de esta solución a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ es de 1055 kg/m^3 .

Bandejas con capacidad de albergar las probetas de manera que se encuentran separadas entre sí 15 mm y de las paredes 20 mm donde quedan sumergidas en su totalidad en la solución cuyo nivel sobrepasa en $(8 \pm 2)\text{ mm}$ la parte superior de las probetas.

Tapa para cubrir el contenedor y reducir la evaporación.

Probetas prismáticas de $40 \times 40 \times 160\text{ mm}$ fabricadas y curadas a la edad de 28 días. El procedimiento de fabricación y curado de las probetas quedó explicado en el epígrafe 2.2.2.

Procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la cristalización en NaCl

Las probetas sacadas de la bañera de curado tienen que secarse en un horno a una temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Se considera que se ha alcanzado la masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de $(24 \pm 2)\text{ h}$ no es superior al 0,1 % de la primera pesada. En ese momento, se las deja enfriar hasta temperatura ambiente y se las pesa con una precisión de $\pm 0,01\text{ g}$ (M_d) (Fig. 2.73).

⁸ RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions), with headquarters in Paris, is the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.

Fig. 2.73 Secado de probetas en un horno ventilado a una temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.
Probetas preparadas para ser sumergidas en la disolución respectiva (NaCl o Na_2SO_4)

Cada una de las probetas secas se coloca en un contenedor de la disolución saturada de NaCl ($35,7\text{g NaCl}/100\text{cc H}_2\text{O}$). Se comprobará la densidad de la solución antes de utilizarla. La solución debe utilizarse únicamente para un solo ciclo de ensayo (Fig. 2.74).

Fig. 2.74 Probetas secas colocadas en los contenedores de la disolución saturada de NaCl ($35,7\text{g NaCl}/100\text{cc H}_2\text{O}$)

Se mantienen las probetas en los contenedores cerrados, con la disolución durante 24 horas. Hay que prestar atención de que todas las caras de las probetas estén cubiertas por el líquido y se encuentren separadas unas de otras. Transcurridas las 24 h. se sacan, se quita el exceso de agua con un paño húmedo y se secan en el horno ventilado a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 h. Se sacan las probetas secas y se pesan.

Se dejan enfriar a temperatura ambiente durante 1h y se vuelven a introducir en la disolución de cloruro de sodio. Se repiten estos ciclos de inmersión/secado 10 veces. A lo largo de los ciclos se realiza una inspección visual del estado de las probetas y en el caso de que alguna haya sufrido deterioros que impida continuar su ensayo, se anula.

Una vez finalizados los ciclos, las probetas son desalinizadas. Este procedimiento consiste en sumergir las probetas en agua desionizada durante 24 h, retirando el agua, repitiéndose el proceso durante 7 días.

Con las probetas desalinizadas se realizan los ensayos de resistencia a flexión y a compresión siguiendo para ello los procedimientos descritos en los epígrafes 2.2.5.1 y 2.2.5.2, respectivamente (Fig. 2.75).

Fig. 2.75 Ensayos de resistencias mecánicas a flexión y a compresión de las probetas

Procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la cristalización en Na_2SO_4

Para la realización de este ensayo son necesarios los mismos equipos y materiales que en el caso de la cristalización en NaCl y se sigue el mismo procedimiento operatorio. La disolución utilizada en este caso es de sulfato sódico decahidratado al 14% (es decir, 14 g de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ por cada 86 g de agua desionizada). La densidad de esta solución a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ es de 1055 kg/m^3 (Fig. 2.76).

Fig. 2.76 Probetas secas colocadas en los contenedores de la disolución saturada de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Expresión de los resultados

Los resultados se expresan como una diferencia de masa relativa ΔM (pérdida o ganancia de masa) en porcentaje con respecto a la masa seca inicial M_d , o bien, como el número de ciclos necesarios para provocar la degradación de la probeta, si ésta está demasiado alterada para pesarla después del secado final.

$$\Delta M = \frac{M_f - M_{dl}}{M_d} \cdot 100$$

donde

M_d es la masa de la probeta seca, en gramos

M_{dl} es la masa de la probeta seca, marcada con una etiqueta, antes del primer ciclo, en gramos

M_f es la masa de la probeta seca, marcada con una etiqueta, después de 15 ciclos, en gramos;

ΔM es la diferencia relativa de masas antes y después de ensayar (pérdida de masa o ganancia de masa), en porcentaje

2.2.7.2 Resistencia a la heladicidad

UNE-EN 539-2:2013

Tejas de arcilla cocida para colocación discontinua. Determinación de las características físicas. Parte 2: Ensayo de resistencia a la helada

UNE-EN 12371:2011

*Métodos de ensayo para piedra natural.
Determinación de la resistencia a la heladicidad*

No se dispone de normativa específica para morteros, que establezca el método de ensayo para determinar el comportamiento de los morteros cuando son sometidos a variaciones de temperatura. Como punto de referencia para el desarrollo de los ensayos se han tomado en cuenta las especificaciones y procedimientos operatorios recogidos en las normas UNE-EN 539-2:2013 “Tejas de arcilla cocida para colocación

discontinua. Determinación de las características físicas. Parte 2: Ensayo de resistencia a la helada” y UNE-EN 12371:2011 *“Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad”*, para valorar el comportamiento frente a la heladicidad. Considerando el material estudiado en este trabajo de investigación se ha realizado el ensayo correspondiente para evaluar los efectos de la heladicidad sometiendo las probetas de mortero endurecido a 25 ciclos hielo/deshielo.

Equipo y materiales utilizados

Arcón congelador de capacidad suficiente para contener el número de probetas requerido manteniendo una temperatura constante de -15°C . El equipo utilizado es de la marca ZANUSSI de 100 l de capacidad y aunque el mismo no dispone de un sistema de control automático para programar los ciclos de hielo/deshielo en la cámara de heladicidad la norma UNE-EN 12371:2011 especifica que *“los ensayos se pueden efectuar de forma manual”* (epígrafe 5.1).

Balanza con una precisión mínima de al menos de 0,01% de la masa a pesar.

Bandeja con capacidad para poder albergar todas las probetas a ensayar separadas entre sí 15 mm y que puedan ser cubiertas de agua.

Sistema para registrar la temperatura, capaz de medir con aproximaciones de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento de ensayo

Las probetas utilizadas para el ensayo son probetas prismáticas de 40×40×160 mm que han sido curadas a la edad de 28 días. Su fabricación y curado quedó explicado en el epígrafe 2.2.2.

Las probetas son sacadas de la cubeta de curado secando previamente el exceso de agua con un paño húmedo para ser posteriormente pesadas. Las probetas recién sacadas de dicha cubeta están saturadas de agua, por lo que se introducen directamente en la cámara frigorífica, colocándolas de manera separada unas de otras y de los laterales de la cámara. La temperatura es de -15°C y se mantienen durante un periodo de 24 horas (Fig. 2.77).

Fig. 2.77 Probetas prismáticas secas colocadas separadamente en el porta rejilla e introducidas en el arcón congelador manteniéndolas un periodo de 24 h, a temperatura constante de -15°C

Transcurrido ese tiempo las probetas son sacadas de la cámara frigorífica y se colocan en una bandeja, separadas entre sí y cubiertas en todas sus caras y aristas con agua desionizada. La bandeja se deja en la cámara húmeda durante 24 h. Estos ciclos (hielo/deshielo) se repiten 25 veces (Fig. 2.78).

Fig. 2.78 Probetas que han sido sacadas de la cámara frigorífica son colocadas en una bandeja, separadas entre sí y cubiertas en todas sus caras y aristas con agua desionizada. La bandeja se deja en la cámara húmeda durante 24 h. Estos ciclos (hielo/deshielo) se repiten 25 veces

Después de los ciclos hielo/deshielo, se examinan todas las caras y aristas de las probetas y su estado se evalúa de acuerdo con la siguiente escala (UNE-EN 12371:2011, epígrafe 7.3.2.2. "Inspección visual"):

- probeta intacta
- daños mínimos (redondeo mínimo de esquinas y aristas) que no comprometen la integridad de la probeta
- una o varias grietas pequeñas ($\leq 0,1$ mm de ancho) o rotura de pequeños fragmentos (≤ 30 mm², por fragmento)
- una o varias grietas, agujeros o rotura de fragmentos de mayor tamaño que el definido en el punto anterior, o una alteración del material en vetas; o la probeta muestra signos importantes de desagregación o disolución
- probeta con grandes grietas o rota en dos o más trozos o desintegrada

Una vez terminados los ciclos se vuelven a pesar las probetas para comprobar su variación de peso. A continuación las probetas son sometidas a ensayos de resistencias a flexión y a compresión siguiendo las metodologías de ensayo expuestas en el epígrafe 2.2.5 (Fig. 2.79).

Fig. 2.79 Terminados los ciclos hielo/deshielo las probetas se vuelven a pesar para comprobar su variación de peso. A continuación son sometidas a ensayos de resistencias a flexión y a compresión

Medida del volumen aparente

Se repiten las mismas medidas al final de los ciclos (N_c) para determinar M_{hn} y M_{sn} , respectivamente.

Se secan las probetas para determinar M_{dn} .

El volumen aparente inicial se calcula como sigue:

$$V_{b0} = [M_{s0} - M_{h0}]$$

Después de N_c ciclos, el volumen aparente se calcula como sigue:

$$V_{bn} = [M_{sn} - M_{hn}]$$

NOTA. Para los propósitos de este ensayo, se asume que la densidad del agua es de 1000 kg/m^3 .

La variación en porcentaje del volumen aparente (ΔV_b) después de n ciclos se calcula como sigue:

$$\Delta V_b = \frac{[(M_{s0} - M_{h0}) - (M_{sn} - M_{hn})] \times 100}{[M_{s0} - M_{h0}]}$$

donde

M_{d0}	es la masa de la probeta seca antes de la inmersión en agua y antes de empezar los ciclos, en gramos
M_{s0}	es la masa de la probeta saturada después de la inmersión en agua y antes de empezar los ciclos, en gramos
M_{h0}	es la masa aparente de la probeta sumergida en agua antes de empezar los ciclos, en gramos
M_{dn}	es la masa de la probeta seca después de N_c ciclos, en gramos
M_{sn}	es la masa de la probeta saturada después de N_c ciclos, en gramos
M_{hn}	es la masa aparente de la probeta sumergida en agua después de n ciclos, en gramos.
V_{b0}	es el volumen aparente de la probeta antes de la congelación, en mililitros.
V_{bn}	es el volumen aparente de la probeta después de N_c ciclos, en mililitros
ΔV_b	es la variación del volumen aparente de la probeta, en porcentaje
N_c	es el número de ciclos realizados antes de la aparición de alteraciones en el ensayo de identificación

2.2.8 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS TÉRMICOS

2.2.8.1 Transmisión térmica en régimen estacionario

UNE-EN ISO 8990:1997

*Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada*

Numerosos materiales y sistemas aislantes térmicos son tales que la transmisión de calor que se efectúa a través de ellos resulta ser una combinación compleja de conducción, convección y radiación. Las propiedades de transmisión térmica dependen a menudo de la misma probeta, del sentido de la transmisión de calor, de las temperaturas, de las diferencias de temperatura, de la velocidad del aire y de la humedad relativa. En consecuencia, las condiciones de ensayo se deben reproducir idénticas a las de la aplicación prevista, o bien deben ser evaluadas para que los resultados sean significativos.

La concepción y el funcionamiento de las cajas calientes guardadas y calibradas es técnicamente compleja. En el mundo existen numerosos diseños de cajas calientes guardadas y calibradas, conforme a normas nacionales. La investigación y el desarrollo prosiguen para mejorar el equipo y las técnicas de medida.

En este proyecto de investigación se ha utilizado una caja caliente del fabricante PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00 que dispone el Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE) en la Escuela Politécnica de Cuenca (España).

Objeto

La norma UNE-EN ISO 8990:1997 establece los principios para el diseño de aparatos y exigencias mínimas para la determinación de las propiedades de transmisión térmica de laboratorio en estado estacionario de los elementos constructivos de la edificación y de los componentes similares para uso industrial. No especifica, sin embargo, detalles particulares ya que las exigencias varían, en particular, las dimensiones y en menor medida, las condiciones de funcionamiento.

Esta norma también describe el equipo, la técnica de medida y los datos necesarios del informe.

Las propiedades que se pueden medir son: el coeficiente de transmisión de calor (transmitancia térmica o conductividad térmica) y la resistencia térmica. Se especifican dos métodos posibles. Éstos son el método de la caja caliente calibrada y el método de la caja caliente guardada. Estos dos métodos son apropiados para probetas verticales (muros) o para probetas horizontales (suelos y techos). El equipo puede ser lo suficientemente grande como para poder estudiar los componentes a escala real.

Los métodos están previstos inicialmente para medidas en el laboratorio de grandes probetas no homogéneas, aunque las probetas homogéneas pueden seguramente ser ensayadas y son necesarias como contraste y calibración. La experiencia demuestra que para ensayos efectuados con probetas homogéneas conforme a esta norma internacional, la exactitud se sitúa generalmente en el $\pm 5\%$.

El coeficiente de conductividad térmica es el parámetro que expresa la propiedad fisicoquímica de toda sustancia, definida como: la cantidad de calor que ocurre en la unidad de tiempo, a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y caras planas-paralelas y espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado. Es medido de diferentes formas:

$\lambda = (W/mk)$ donde, W : vatios; m : metro; k : grados Kelvin,

$\lambda = W/m^{\circ}C$ donde, W : vatios; m : metro; $^{\circ}C$: grados centígrados,

$\lambda = kcal/h \times m \times k$ donde, $kcal$: kilocalorías; h : hora; m : metro; k : grados Kelvin, $\lambda =$

$BTU/h \times ft \times F$ donde, BTU : British Thermal Unit; h : hora; ft : pie; F : $^{\circ}$ Fahrenheit

Una vez conocido este coeficiente y el grosor del elemento, entre ambas caras planas-paralelas y perpendiculares o semi perpendiculares (ángulo de incisión $> 60^{\circ}$) en el flujo de calor, se puede determinar su capacidad aislante.

La importancia de la obtención de este valor, recae en el interés que tiene conocer las propiedades de transmisión de calor de una sustancia, en este caso un material de construcción. De esta manera, se podrá validar la conformidad a las normativas vigentes y determinar el comportamiento térmico que tendrá posteriormente, en el conjunto de una edificación.

Cabe recordar, que la normativa en materia de construcción en España, reglada en el Código Técnico de la Edificación (CTE), concretamente en materia de ahorro energético, determina unas exigencias mínimas a los materiales y elementos constructivos de sus características físicas y entre ellas las de transmisión de calor.

Por este motivo, cualquier nuevo material de construcción debe someterse a una serie de pruebas y análisis, enfocados a determinar sus propiedades físico-químicas. En este caso la conductividad térmica es una de las propiedades necesarias que hay que averiguar.

La metodología utilizada para la determinación del coeficiente de conductividad térmica de las muestras elaboradas, con motivo de este proyecto de investigación, se basa en el análisis de la transmisión de calor en régimen estacionario.

Fundamento

El ensayo para determinar el coeficiente de conductividad térmica de las diferentes probetas, se ha realizado tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 8990: 1997 *“Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada”*. Como ya se ha indicado, el equipo utilizado ha sido una caja caliente del fabricante PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00 diseñada para realizar prácticas de laboratorio en las que puedan determinarse las conductividades térmicas de los materiales. Ha sido necesario adaptar el proceso experimental normalizado, a las limitaciones que se derivan del equipo de medida utilizado y las características de las probetas ensayadas, procurando, en todo momento, obtener resultados significativos.

La norma específica que la superficie mínima para este tipo de ensayo debe ser de 1,5 x 1,5 m. Debido a la imposibilidad de construcción de una caja a escala de las dimensiones mínimas requeridas y una pared con similares dimensiones, se procedió a utilizar el equipo disponible. El tamaño de las muestras a ensayar ha sido de 0,25 x 0,25 m.

Equipo empleado

Caja caliente, equipada con (Fig. 2.80):

Cronómetro digital 1/100 seg

Regulación electrónica para caja caliente

Portalámparas E27

Bombilla, 220 V/60 W con reflector

10 Termopares NiCr-Ni 500°C máx.

Grupo de divisiones de espuma plástica

Varilla de soporte de acero inoxidable, $l = 100$ mm

5 Termómetros manuales de NiCr-Ni

Fig. 2.80 Equipamiento de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00. Fuente: PHYWE

Probetas de ensayo

Para la realización del ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente se han fabricado probetas en forma de placas, de dimensiones 250x240 mm intentando establecer un espesor igual para todas la placas de mortero, de aproximadamente entre 20 y 30 mm. Los moldes utilizados para fabricar estas probetas han sido elaborados en el propio laboratorio, con una base de madera de aglomerado con acabado plástico para evitar absorción del agua de amasado, utilizando una cola para madera para pegar en los bordes un listón del mismo material de 30 mm de altura, consiguiendo un vacío interior de las dimensiones de las probetas que se quieren fabricar (Fig. 2.81).

Fig. 2.81 Molde para fabricación de probetas para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente

Antes de iniciar el ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente, las probetas son sacadas de la cámara húmeda y colocadas en la estufa de desecación a $50\pm 5^{\circ}\text{C}$ de temperatura durante 72 h para su secado. Transcurrido este tiempo, se sacan de la estufa y se dejan enfriar durante 24 h a temperatura ambiente, quedando listas para ser ensayadas (Fig. 2.82).

Fig. 2.82 Tratamiento de las probetas previo el ensayo de transmitancia térmica por el método de la caja caliente

Duración del ensayo

La duración de los ensayos variará según la temperatura inicial que presenten las muestras. Como criterio se considera que el ensayo finalizará cuando las caras externas e internas del material igualen la temperatura.

Procedimiento de ensayo

No existen normas UNE que regulen el comportamiento térmico de los morteros por tanto no se dispone de un procedimiento definido. Se ha optado ante dicha circunstancia a seguir la metodología operatoria indicada en el manual de funcionamiento de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00.

Los ensayos se realizan de forma comparativa utilizando las cuatro aberturas de las que dispone dicha caja térmica. De este modo, se dispone una probeta en cada

abertura conectada a su vez mediante termopares con cuatro termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas. A su vez se utiliza otro termómetro para medir la temperatura exterior e interior de la caja térmica. Después se procede a comparar los resultados de las cuatro mediciones para observar la diferencia de comportamiento térmico de los materiales (Fig. 2.83a; 2.83b).

Fig. 2.83a Aberturas de las que dispone la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00.

Las probetas de ensayo han sido dispuestas en las mismas y cada abertura está conectada a su vez mediante termopares con cuatro termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas. A su vez se utiliza otro termómetro para medir la temperatura exterior e interior de la caja térmica

Fig. 2.83b Las probetas de ensayo están siendo ensayadas. En cada abertura están conectados los termopares con cinco termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas.

Aporte de calor

El aporte de calor se realiza mediante una bombilla de 60 W de forma gradual incrementando la potencia inicial P1 a medida que se va adquiriendo la temperatura de “equilibrio” hasta alcanzar la potencia P5. Se denomina temperatura de “equilibrio” porque el termostato cesa el aporte de calor y comienza a regular la temperatura. La función del sistema termostato-regulador es mantener constante la temperatura de la cámara. Con lo cual al alcanzar la temperatura consignada, el regulador apaga la bombilla, accionando su encendido cuando la temperatura ha descendido. Las lecturas de las temperaturas en °C se toman cada 15 minutos. Distintas potencias del regulador corresponden a las siguientes temperaturas (Tabla 2.9):

Tabla 2.9 Potencias del regulador de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00

POTENCIA (W)	TEMPERATURA (°C)
P1	35
P2	40
P3	45
P4	55
P5	70

El esquema llevado a cabo para la toma de datos es el mostrado en la Fig. 2.84.

Fig. 2.84 Esquema de funcionamiento de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00

Donde en dicho esquema:

TAC	Temperatura ambiente de la cámara
TAE	Temperatura ambiente exterior
CIM 1	Temperatura cara interna del material 1
CEM 1	Temperatura cara externa del material 1
CIM 2	Temperatura cara interna del material 2
CEM 2	Temperatura cara externa del material 2
CIM 3	Temperatura cara interna del material 3
CEM 3	Temperatura cara externa del material 3
CIM 4	Temperatura cara interna del material 4
CEM 4	Temperatura cara externa del material 4

Expresión de los resultados

Con la realización del ensayo de transmisión térmica en régimen estacionario se obtienen los valores de las temperaturas en °C de: temperatura ambiente en la caja térmica (TAC), temperatura en el ambiente exterior (TAE), temperatura en la cara interna del material (CIM) y la temperatura en la cara externa del material (CEM). Previo al ensayo, se han determinado las características físicas de cada probeta, la superficie de las caras (S) y el espesor de la muestra (e).

El Código Técnico de la Edificación indica en su Documento Básico HE Ahorro de energía. Exigencia básica HE 1: Limitación de la demanda energética: *“Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos”*.

En base al Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía del Código Técnico de la Edificación DA DB-HE/1 “Cálculo de parámetros característicos de la envolvente. 2.1 Transmitancia térmica. 2.1.1 Cerramientos en contacto con el aire exterior”, cálculo aplicable a la parte opaca de todos los cerramientos en contacto con el aire exterior tales como muros de fachada, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior (tabla 1 del DB-HE/1) (Fig. 2.85) se determinan las resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior (R_{se}) en m^2K/W , en este caso de las probetas de mortero endurecido ensayadas considerando la posición del cerramiento de tipo interior y sentido horizontal del flujo de calor.

Tabla 1 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m^2K/W		R_{se}	R_{si}
Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor			
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo Horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente (Techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (Suelo)		0,04	0,17

Fig. 2.85 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m^2K/W
Fuente: Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía del Código Técnico de la Edificación DA DB-HE/1 “Cálculo de parámetros característicos de la envolvente. 2.1 Transmitancia térmica. 2.1.1 Cerramientos en contacto con el aire exterior”

Con el uso de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00, se determinan diferentes parámetros mediante las siguientes ecuaciones:

Flujo de calor

$$Q = \frac{S \cdot \lambda \cdot (CIM - CEM)}{e}$$

donde

Q Flujo de calor (en watios)

S Área (en m^2)

(CIM – CEM) Incremento de temperatura entre las caras de la probeta (en °C)

e Espesor de la capa (en metros)

λ Coeficiente de conductividad térmica (W/m °C)

Cantidad de calor que pasa a través del cerramiento por unidad de tiempo

$$Q = S \cdot U \cdot (TAC - TAE)$$

donde

Q Flujo de calor (en watios)

S Área (en m²)

U Transmisión térmica (W/m² °C)

(TAC – TAE) Incremento de las temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la caja

Temperatura de la superficie interior de un cerramiento

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{se} + \frac{e}{\lambda} + R_{si}}$$

donde

U Transmisión térmica (W/m² °C)

e Espesor de la capa (en metros)

λ Coeficiente de conductividad térmica (W/m °C)

R_{se} Resistencia térmica superficial exterior (m² °C/W)

R_{si} Resistencia térmica superficial interior (m² °C/W)

Coefficiente de conductividad térmica

$$\lambda = \frac{e \cdot ((TAC - TAE) - (CIM - CEM))}{((CIM - CEM) - (R_{si} - R_{se}))}$$

λ	Coeficiente de conductividad térmica (W/m °C)
e	Espesor de la capa (en metros)
$(CIM - CEM)$	Incremento de temperatura entre las caras de la probeta (en °C)
$(TAC - TAE)$	Incremento de las temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la caja
R_{se}	Resistencia térmica superficial exterior (m ² °C/W)
R_{si}	Resistencia térmica superficial interior (m ² °C/W)

2.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En la campaña experimental se han determinado a través de una serie amplia de ensayos, las propiedades del mortero fresco y del mortero endurecido, para las distintas sustituciones del 10, 20 y 30% en peso de los ROCA y ROCCA empleados, bien como sustitutos parciales del árido o como adición, en la fabricación de morteros de cemento.

Los resultados obtenidos son comparados con las muestras patrón. Se inicia el análisis con la valoración de los resultados de la caracterización del árido natural y de los ROCA y ROCCA empleados.

2.3.1 ARENA CEN. CARACTERIZACIÓN

Las microfotografías obtenidas en el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) muestran un árido de aspecto subredondeado a redondeado, uniforme, compacto (Fig. 2.86a), de grano muy fino a criptocristalino (Fig. 2.86b), prácticamente de composición monomineral (cuarzo).

Dado el aspecto sumamente trabajado de sus facetas, se trata de un árido natural. Son visibles pequeñas oquedades (Figs. 2.86a y 2.86b), tal vez producidas por la lixiviación de protominerales carbonatados o por extracción mecánica de los feldespatos. En las muescas y anfractuosidades con suficientes espacios libres hay intercrecimiento de microcristales de cuarzo (Fig. 2.86c). Las características morfológicas de esta muestra permiten establecer que los áridos empleados en el presente trabajo de investigación son adecuados para su empleo en los ensayos que se han desarrollado durante la campaña experimental.

Fig. 2.86 (a, b y c). Microfotografías de una muestra del árido natural empleado en la presente investigación, obtenidas a 69x, 300x y 1.000x aumentos

2.3.2 RESIDUOS ROCA Y ROCCA

Caracterización química

Las microfotografías obtenidas en el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) observadas en la Fig. 2.87 (a, b y c) con aumento creciente, muestran las propiedades morfológicas de los ROCA (estado natural), entre las que puede considerarse su irregularidad superficial, tanto en las vistas por la parte convexa (Fig. 2.87a) como por la cóncava (Figs. 2.87b y 2.87c), así como la presencia de abundantes microporos naturales. De acuerdo con el criterio que se persigue en el presente trabajo, tanto la superficie rugosa como la existencia de pequeños poros podría facilitar la absorción de agua y la interactividad superficial con la interfase que corresponde a la pasta durante el proceso de fraguado. Sin embargo, esta reactividad está condicionada por otros factores de tipo geométrico, como el tamaño y la forma global de estos residuos.

Los resultados del ensayo realizado por Espectroscopia de infrarrojo (IR) permiten establecer que la composición orgánica de la muestra de residuo orgánico ROCA, en estado natural, es mayormente epsilon-caprolactona ($C_6H_{10}O_2$), con peso molecular igual a 114,15 y punto de ebullición de $106^{\circ}C$ (Fig. 2.88).

Fig. 2.87 (a, b y c). Microfotografías obtenidas de las facetas exteriores e interiores de una muestra de residuo orgánico (ROCA) a diferentes aumentos (350x, 500x y 1.300x). Son visibles los abundantes microporos naturales (P)

Fig. 2.88 Composición orgánica de una muestra de residuo tipo ROCA en estado natural, obtenida mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)

El análisis de la segunda muestra de residuo orgánico en estado calcinado (ROCCA) indicó una composición orgánica distinta, donde el nuevo compuesto principal consistió en acenaphtileno, cuya fórmula molecular está representada por $C_{12}H_8$, el punto de fusión es $92^{\circ}C$ y el peso molecular 152,2 (Fig.2.89).

Las dos muestras de residuos estudiadas, tanto en estado natural (ROCA) como calcinado (ROCCA), se comportan como sistemas de bajo rango o intensidad de absorción.

Fig. 2.89 Composición orgánica de una muestra de residuo tipo ROCA en estado calcinado (ROCCA), obtenida mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)

UNE-EN 196-5:2011

Métodos de ensayo de cementos.
Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos

Realizados ensayos de puzolanidad a muestras de:

ROCA en estado natural (pulverizados); b) ROCA tamizados y c) ROCCA tamizados, muestran los siguientes resultados:

ROCA en estado natural (pulverizados)

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO

FACTOR	VOLUMEN HCl 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
1,031	48,50	100,0	-----

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO

FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
0,995	-----	-----	-----

RESULTADO

DÍAS	7
PUZOLÁNICO	NO cumple

ROCA tamizados

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO

FACTOR	VOLUMEN HCl 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
1,031	93,00	191,8	-----

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO

FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
0,995	3,72	2,2	-----

RESULTADO

DÍAS	7
PUZOLÁNICO	Cumple

ROCCA tamizados

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO

FACTOR	VOLUMEN HCl 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
1,031	134,00	276,3	-----

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO

FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l	INCERTIDUMBRE
0,995	2,94	1,8	-----

RESULTADO

DÍAS	7
PUZOLÁNICO	Cumple

De los resultados se determina que la cáscara de almendra tamizada y calcinada presenta carácter puzolánico lo cual en principio favorece su uso como adición en morteros como sustitución parcial de cemento.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Los resultados obtenidos del espectrómetro de fluorescencia de Rayos X (FRX) a muestras en pastilla prensada de ROCA y ROCCA son mostrados en las Figs. 2.90 y 2.91. En ellos puede observarse la composición química expresada en óxidos de dichos residuos. Resulta evidente que la cáscara de almendra se comporta como elemento sumidero de CO₂. También el resultado obtenido al material calcinado indica que por los contenidos en aluminio y sílice, que aunque son bajos, evidencian carácter puzolánico del material ensayado.

Servicio de Instrumentación (IRICA) UCLM				
Quantification of sample PCA				
R.M.S.:		0.000		
Sum before normalization:		155.4 %		
Normalised to:		100.0 %		
Sample type:		Pressed powder		
Correction applied for medium:		No		
Correction applied for film:		None		
Used Compound list:		OXIDES		
Results database:		iq+ 27mm		
Results database in:		c:\archivos de programa\philips\superq\userdata		

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
		CO2	99.499	Fixed
Na	Calibrated	Na2O	0.007	Calculate
Mg	Calibrated	MgO	0.040	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	0.009	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	0.031	Calculate
P	Calibrated	P2O5	0.020	Calculate
S	Calibrated	SO3	0.020	Calculate
K	Calibrated	K2O	0.189	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	0.170	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	0.014	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.001	Calculate

Fig. 2.90 Composición química de ROCA obtenida del espectrómetro de fluorescencia de Rayos X (FRX)
Philips, Magix Pro

Servicio de Instrumentación (IRICA) UCLM				
Quantification of sample Z1				
R.M.S.: 0.000				
Sum before normalization: 94.8 %				
Normalised to: 100.0 %				
Sample type: Pressed powder				
Correction applied for medium: No				
Correction applied for film: None				
Used Compound list: OXIDES				
Results database: iq+ 27mm				
Results database in: c:\archivos de programa\philips\superq\userdata				

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration (%)	Calculation method
		CO2	37.092	Fixed
Na	Calibrated	Na2O	0.287	Calculate
Mg	Calibrated	MgO	3.094	Calculate
Al	Calibrated	Al2O3	0.492	Calculate
Si	Calibrated	SiO2	1.421	Calculate
P	Calibrated	P2O5	2.695	Calculate
S	Calibrated	SO3	0.625	Calculate
K	Calibrated	K2O	35.826	Calculate
Ca	Calibrated	CaO	17.611	Calculate
Ti	Calibrated	TiO2	0.035	Calculate
Mn	Calibrated	MnO	0.026	Calculate
Fe	Calibrated	Fe2O3	0.499	Calculate
Cu	Calibrated	CuO	0.031	Calculate
Zn	Calibrated	ZnO	0.024	Calculate
Rb	Calibrated	Rb2O	0.015	Calculate
Sr	Calibrated	SrO	0.127	Calculate
Y	Calibrated	Y2O3	0.001	Calculate
Cl	Calibrated	Cl	0.100	Calculate

Fig. 2.91 Composición química de ROCCA obtenida del espectrómetro de fluorescencia de Rayos X (FRX)
Philips, Magix Pro

Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico

El contenido en carbono, hidrógeno y nitrógeno se llevó a cabo según la normativa UNE-EN 15104:2011 *“Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales”*. El objetivo de dichas determinaciones reside en la importancia de:

- Determinación el contenido en carbono para la determinación de las emisiones de CO₂.
- Determinación de contenido en hidrógeno para el cálculo de poder calorífico neto o inferior.
- Determinación de contenido en nitrógeno para la determinación de las emisiones de NO_x y para la corrección algorítmica del software para la determinación de poder calorífico superior.

La determinación del contenido en azufre se usa analíticamente para llevar a cabo la corrección algorítmica del software para la determinación del poder calorífico superior. Con respecto a la tecnología de la combustión, dicho parámetro se usa para determinar las emisiones de SO_x.

Los resultados de los ensayos encaminados a obtener los valores del poder calorífico superior e inferior son mostrados en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Determinación del poder calorífico de los ROCA

Ensayo	Resultado	Unidad	Norma
Poder calorífico superior	4352,5	kcal/kg	UNE EN 14918
Poder calorífico inferior	4067,5	kcal/kg	UNE EN 14918
Humedad	8,9	% (m/m)	EN 14774
Análisis elemental	Carbono	50,5	% (m/m)
	Hidrógeno	6,0	
	Nitrógeno	0,34	
Análisis elemental (Azufre)	0,01	% (m/m)	Proc. interno

La cáscara de almendra no es el único combustible de biomasa existente, pero si el que más prestaciones da a un precio igual o menor. Las características entre la cáscara de almendra, el hueso de aceituna y el pellet son muy parecidas: humedad relativa, residuos de ceniza, etc. Pero en cuanto al poder calorífico, tanto superior como inferior, la cáscara de almendra, tanto entera como triturada o molida, gana ventaja frente a los demás combustibles de biomasa. Mientras que el hueso de aceituna tiene un Poder Calorífico Superior de 4087 kcal/kg e Inferior de 3741 kcal/kg, y el pellet un Poder Calorífico Superior de 4234 kcal/kg e Inferior de 3865 kcal/kg; la cáscara de almendra ensayada tiene un Poder Calorífico Superior de 4353 kcal/kg e Inferior de 4068 kcal/kg, muy superior al hueso de aceituna y al pellet, lo cual hace ventajoso su aprovechamiento para combustión.

Caracterización física

UNE-EN 1097-6: 2014

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*

De los ensayos para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua realizados a muestras de los ROCA se han obtenido los siguientes resultados, recogidos en los ANEXOS 2.1; 2.2; 2.3:

Densidad aparente de las partículas	1,081 (t/m ³)
Densidad de las partículas tras secado	0,70 (t/m ³)
Densidad de las partículas saturadas con la superficie seca	1,053 (t/m ³)
Absorción de agua	49,77 (%)

Se puede observar que la cáscara de almendra es un material con elevada absorción, lo que deberá ser tenido en cuenta en las futuras dosificaciones para la fabricación de morteros de cemento con este material.

Tiene unas densidades muy bajas lo que los hace ser considerados áridos ligeros y por consiguiente los morteros con ellos fabricados serán de un peso menor que con áridos naturales.

Con el ensayo del picnómetro se obtiene un valor de densidad para la cáscara de almendra calcinada (ceniza) de 1,05 (t/m³).

El peso específico calculado mediante el volumenómetro de Le Chatelier para la cáscara de almendra en estado natural y calcinada (ceniza) es de 1,45 g/cm³ y de 2,43 g/cm³ respectivamente.

2.3.3 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO FRESCO

Mediante la interpretación de los resultados se pretende evaluar el comportamiento del mortero para poder determinar sus usos según las características del mismo.

Se han diferenciado dos líneas en este trabajo de investigación dependiendo del material objeto de sustitución en la dosificación de la mezcla:

Mortero con sustitución parcial de cemento por ceniza de cáscara de almendra (ROCCA) en distintas proporciones en porcentajes en peso. Se mantiene constante la proporción del árido natural en la dosificación.

Mortero con sustitución parcial del árido natural por cáscara de almendra (ROCA) en distintas proporciones en porcentajes en peso. Se mantiene constante la proporción del cemento en la dosificación.

El análisis de los resultados establece siete tipos de morteros, correspondientes a siete dosificaciones a las que a efectos del trabajo de laboratorio se identifican con los siguientes códigos (Tabla 2.11):

Tabla 2.11 Códigos empleados para las distintas dosificaciones para la fabricación de los morteros.
Porcentajes de sustitución en peso

Código	Identificación
PP	Muestra patrón. Compuesta por CEM-I 42,5R y árido normalizado
C10	Muestra con un 10% de ceniza en sustitución de cemento
C20	Muestra con un 20% de ceniza en sustitución de cemento
C30	Muestra con un 30% de ceniza en sustitución de cemento
A10	Muestra con un 10% de cáscara de almendra en sustitución de árido
A20	Muestra con un 20% de cáscara de almendra en sustitución de árido
A30	Muestra con un 30% de cáscara de almendra en sustitución de árido

C = Ceniza / A = Árido

2.3.3.1 Consistencia normal del cemento

UNE-EN 196-3:2005+A1:2009

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

Para determinar la cantidad de agua que requieren las pastas para alcanzar la consistencia normal, (agua necesaria para que la pasta de cemento alcance una fluidez óptima) y una plasticidad ideal, se le ha realizado el ensayo de consistencia con el aparato de Vicat, tanto al cemento como a la mezcla de cemento y ceniza de cáscara de almendra en sus distintas proporciones.

Aunque por la capacidad de absorción propia de la cáscara de almendra en su estado natural ello no ha ofrecido mayor inconveniente para poder determinar finalmente la cantidad de agua que el cemento demanda para conseguir una consistencia normal. Tras varias repeticiones del ensayo de Vicat con la sonda de penetración, variando las cantidades de agua se ha obtenido un valor de 5 mm con una cantidad de agua de 139,30 ml. Obteniendo una relación agua/cemento de 0,28 (Tabla 2.12).

Tabla 2.12 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra en estado natural (ROCA)

Cemento CEM I 42,5 R (g)	Agua (ml)	Penetración de la sonda (mm)	% W	Relación agua/cemento
500	139,30	5	27,8	0,279

Este valor indica la cantidad de agua necesaria para activar químicamente al cemento, pero si se realmente el mismo se aplicara, la mezcla resultaría demasiado seca y por consiguiente con mala manejabilidad en obra.

Para encontrar la demanda de agua que tiene la pasta de cemento con incorporación de ceniza en un 10% se tomó como dato de partida el agua obtenida cuando la pasta es al 100% de cemento es decir 139,30 ml. Las pastas con las primeras cantidades de agua son tan secas que se desechan directamente tras el amasado sin llegar a ser

sometidas a ensayo. Se incrementa la cantidad de agua para ver si se logra que la pasta sea más fluida dando como resultado pastas demasiado blandas, prácticamente líquidas. Con 240 ml parece que aunque es seca se puede trabajar con ella y se empieza a aumentar a partir de ese dato. Pero al llegar a 244,51 ml se obtiene una pasta más seca que utilizando el valor de 240 ml. Este comportamiento extraño de las pastas con 10% de ceniza se debe al grado de porosidad de la ceniza. Esta circunstancia hace que no se pueda determinar con exactitud la cantidad de agua que la mezcla con ceniza en esa proporción, demanda (Fig. 2.92).

Fig. 2.92 Resultados del ensayo de consistencia método sonda de Vicat para mortero C10

Dada la experiencia con la preparación de probetas C10, en el caso de las probetas de mortero con un porcentaje de sustitución de ceniza de cáscara de almendra del 20% (C20), se inició el ensayo utilizando una dosificación de agua para el amasado de 244 ml. Dicha cantidad se tuvo que disminuir gradualmente. Asumiendo el criterio que a mayor cantidad de introducción de ceniza fuera necesaria mayor cantidad de agua,

resultó ser todo lo contrario. El resultado fueron pastas de mortero muy fluidas que tuvieron que ser desechadas sin llegar a realizarse ensayo alguno.

El valor con el que se consiguió una pasta de consistencia normal para probetas de mortero C20 fue de 170 ml de agua, valor significativamente inferior a los 244 ml de agua necesarios en la fabricación de probetas C10. La relación agua/cemento fue de 0,42 (Tabla 2.13).

Tabla 2.13 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra calcinada C20 (ROCCA)

Cemento CEM I 42,5 R (g)	Cáscara de almendra calcinada C20 (g)	Agua (ml)	Penetración de la sonda (mm)	% W	Relación agua/cemento
400	100	170	7	34	0,425

Para determinar en la dosificación la cantidad de agua necesaria para la fabricación de las probetas C30, se tomó como valor inicial el resultado obtenido en las C20, es decir, 170 ml y se fue aumentando ésta cifra hasta conseguir que las sonda de Vicat señalara 8 mm cuando se empleó una cantidad de agua para el amasado de 183 ml. La relación agua/cemento fue de 0,52 (Tabla 2.14).

Tabla 2.14 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra calcinada C30 (ROCCA)

Cemento CEM I 42,5 R (g)	Cáscara de almendra calcinada C30 (g)	Agua (ml)	Penetración de la sonda (mm)	% W	Relación agua/cemento
350	150	181	7	36	0,517

2.3.4 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS FÍSICOS

2.3.4.1 Densidad aparente en seco

UNE-EN 1015-10:2000

Métodos de ensayo de los morteros para albañilería.

Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido

Realizado el ensayo correspondiente al grupo de probetas fabricadas con las distintas dosificaciones en porcentaje en peso de ceniza y de cáscara de almendra se han obtenido los datos reflejados en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15 Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido según dosificaciones

Mortero	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	ρ (g/cm ³)	ρ (kg/m ³)
PP	557,79	544,64	2,1275	2127,50
C10	531,49	515,34	2,01304688	2013,05
C20	548,19	530,45	2,07205729	2072,06
C30	527,56	513,32	2,00515625	2005,16
A10	504,23	461,13	1,80127604	1801,28
A20	466,01	427,22	1,66884115	1668,84
A30	478,86	402,48	1,5721875	1572,19

Se observa un descenso de la densidad aparente en seco del mortero a medida que los ROCA y ROCCA son incorporados a la mezcla en las diferentes proporciones, haciéndose destacable que morteros C30 y A30 resultan ser sensiblemente más ligeros en peso que el mortero de referencia (patrón PP). Ello confirma la consideración de áridos ligeros a los ROCA (Fig. 2.93).

Fig. 2.93 Densidad aparente en seco del mortero endurecido

De la Fig. 2.93, se desprende de los morteros C20 y C30 que a mayor cantidad de ceniza menor densidad. Pero el mortero C10 tiene una densidad inferior que el mortero C20 lo que se podría justificar por su relación agua/cemento, debido a que para los morteros C10 se ha necesitado una relación de 0.6 y ello puede producir un mortero más poroso, en cambio, si se observa la diferencia entre el peso seco y el peso saturado el mortero que tiene una variación mayor dentro de los morteros con sustitución de ceniza, es el C20.

Con los datos obtenidos del ensayo de densidad aparente se puede calcular la porosidad efectiva. La porosidad efectiva es el porcentaje de poros interconectados que permiten la circulación de fluidos, se considera como volumen poroso solamente el conectado entre sí. Según estos resultados se comprueba que el valor más alto de porosidad efectiva lo tiene el mortero C20.

En los tres tipos de morteros con cáscara de almendra en estado natural como sustitución del árido natural, la densidad disminuye alrededor de un 10%. Estos resultados son esperados por la densidad menor de la cáscara de almendra en comparación con la arena normalizada CEN.

2.3.4.2 Absorción

UNE-EN 1015-18:2003

Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

Los resultados obtenidos del ensayo del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido están reflejados en la Tabla 2.16 y Fig. 2.94.

Tabla 2.16 Resultado de los ensayos de absorción por capilaridad de los morteros endurecidos

PROBETA	Peso seca (g)	M1 (g) (10 min.)	M2 (g) (90min.)	M3 (g) (24 h.)	Cm kg/(m ² xmin ^{0,5})
PP	277,93	278,96	280,73	286,61	0,18
C10	265,28	265,15	273,91	289,20	0,88
C20	271,97	275,42	282,63	293,54	0,72
C30	264,82	269,54	280,19	288,27	1,07
A10	233,43	234,70	235,59	238,42	0,09
A20	219,29	221,08	222,15	225,86	0,11
A30	206,98	209,79	211,61	217,35	0,18

Fig. 2.94 Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

En los valores obtenidos en las muestras de morteros con ceniza se observa que a medida que aumenta el porcentaje de esta, aumenta también su absorción. Este resultado confirma la gran capacidad de absorción de la misma.

El mortero que menor absorción presenta es el A10 con un coeficiente medio de absorción de $0,09 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ y próximo a él se encuentra el A20 con $0,11 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$. La probeta patrón tiene un valor de $0,18$ que resulta de valor similar al mortero A30.

Para el caso de las muestras elaboradas con cenizas, el valor resultante de absorción por capilaridad está muy por encima del mortero patrón.

Resulta llamativo que morteros C20 tengan valores inferiores morteros C10, pero hay que tener en consideración que la relación agua/cemento de las probetas de morteros

C10 es del 0,6, en cambio en el resto es del 0,5. La utilización de mayor cantidad de agua en el amasado puede conferir al mortero resultante de una mayor porosidad interna, aumentando por tanto su capacidad de absorción.

Si se analiza la evolución del peso de las probetas en el transcurso del tiempo durante el ensayo de absorción por capilaridad se observa como las probetas de cáscara de almendra van aumentando su masa por la absorción del agua, pero lo hacen de manera más lineal, en cambio las de ceniza a partir de los 10 minutos crecen significativamente a diferencia de la tendencia lineal que llevaban durante los 10 minutos iniciales. Puede expresarse la idea de que el aporte de cáscara de almendra a la mezcla confiere a las probetas de mortero endurecido mayor resistencia a la absorción (Fig. 2.95).

Fig. 2.95 Aumento de peso de las probetas de mortero endurecido por absorción de agua por capilaridad

2.3.4.3 Porosimetría por intrusión de mercurio

ASTM D4404-84 (2004)

*Standard Test Method for Determination of Pore Volume
and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry*

El comportamiento físico de cualquier material de construcción depende en gran medida de sus propiedades hídricas y de las condiciones ambientales. Teniendo en cuenta los ensayos realizados de absorción de agua por capilaridad y absorción de agua a presión atmosférica, así como los desarrollados para determinar la densidad real y aparente y la porosidad abierta y total, se obtienen una serie de resultados.

Los morteros realizados con sustitución de cáscara de almendra y ceniza tienen una densidad media de entre 1,70 g/cm³ en el caso de sustitución del árido natural por cáscara, y de 2,01 g/cm³ para la sustitución de ceniza por cemento. Esto supone un descenso considerable con respecto a la muestra patrón. Archie (1952) y Sander (1967), determinaron que:

Porosidad muy baja < 4%

Porosidad baja: de 4 a 8%

Porosidad media: de 8 a 16%

Porosidad alta: de 16 a 32%

Porosidad muy alta > 32%

Atendiendo a esta clasificación se observa que las probetas de mortero con cáscara de almendra tienen porosidades altas y las de morteros con ceniza, media-alta.

La relación entre el volumen aparente de poros y la porosidad efectiva de los diferentes morteros se muestra en la Fig. 2.96. Todas las muestras corresponden a materiales macroporosos. El tamaño promedio de diámetro de poro de las probetas realizadas con ceniza (radio = 10µm) el cual es muy diferente al realizado con sustitución de cáscara y a la patrón (radio = 100µm). Estos datos han sido obtenidos por medio de la porosimetría de mercurio.

Fig. 2.96 Relación entre el volumen aparente y la porosidad efectiva, de los diferentes morteros

La porosidad abierta está directamente relacionada con la capacidad de la roca para dejar pasar a su través un fluido (agua). De hecho, existen unas relaciones empíricas que expresan la permeabilidad en función de la porosidad y el tamaño de poro. A mayor porosidad y mayor tamaño de poro mayor permeabilidad. Los morteros más permeables permiten pasar el agua a través de ellos y por lo tanto son más susceptibles al deterioro. Sin embargo es necesario contrastar esta hipótesis con el conocimiento del espectro de poros de cada mortero. De hecho, morteros con mayor porcentaje de poros pequeños son más susceptibles a la degradación (por ejemplo, efectos de hielo/deshielo) que otros con la misma porosidad, pero mayor tamaño de poro.

2.3.5 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS MECÁNICOS

2.3.5.1 Resistencia mecánica a flexión

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

El comportamiento mecánico cuando los morteros son sometidos a flexión como a compresión ha sido estudiado a las edades de 7, 15, 28, 60 y 90 días.

El ensayo de resistencia mecánica a flexión se ha realizado utilizando probetas de dimensiones 40×40×160 mm de las siete dosificaciones estudiadas conforme se explica en el epígrafe 2.2.5.1 *Resistencia mecánica a flexión*.

En la realización del ensayo se utilizaron 3 probetas de cada dosificación de mortero en las edades de 7 y 15 días, necesitando 21 probetas para el ensayo en cada edad. En el caso del ensayo a los 28 días se utilizaron 2 probetas de cada dosificación lo que hace un total de 14 probetas, en el ensayo a los 60 días fueron ensayadas 7 probetas, 1 de cada dosificación y en el caso de ensayo a 90 días fueron ensayadas 3 probetas de cada dosificación más la patrón, lo que hizo un total de 21 probetas. Se requirió para la totalidad del ensayo un conjunto de 84 probetas.

En la Tabla 2.17 se pueden observar los valores de resistencia que las probetas van adquiriendo a los 7 días. En esta primera edad la muestra patrón ya ha adquirido una resistencia notablemente superior al resto de las muestras, un 50% superior aproximadamente en relación a las muestras con valores más elevados como lo son C20, A10 y C10 que se encuentran entre 3,5 y 3,2 N/mm². La muestra que tiene menor resistencia es la A30 siendo un 75% inferior a la muestra patrón.

Llama la atención que las probetas de C10 sean de menor resistencia que las C20 a pesar de tener contenido en cenizas menor. Esta disminución es debida a que la relación de agua/cemento utilizada en la dosificación del mortero C10 es de 0,6 mientras que en el C20 es del 0,5. Al tener más agua de amasado, su curado es más lento y en esta primera edad afecta a la resistencia.

En las muestras que contienen cáscara de almendra su resistencia va disminuyendo conforme va aumentando el contenido de este material.

Tabla 2.17 Resistencias mecánicas a flexión a 7 días

Probeta	Carga (N)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
PP	2980	6,98
C10	1377	3,23
C20	1500	3,51
C30	1112	2,60
A10	1407	3,30
A20	930	2,18
A30	733	1,72

La Tabla 2.18 muestra los resultados del ensayo de resistencia a flexión a los 15 días de edad. En general cuando son comparados estos resultados con los obtenidos a los 7 días, todas las muestras van aumentando su resistencia. Al igual que pasara en las probetas ensayadas a los 7 días la muestra de referencia muestra una resistencia superior al resto. Si se compara con la que le precede que en este caso es la C10 la diferencia es de un 43%.

La muestra que más ha aumentado su resistencia ha sido C10 pasando de 4,48 a 5,39 N/mm², quedándose por encima de la resistencia de C20. De este modo, conforme va aumentado la cantidad de ceniza en las dosificaciones la resistencia se ve mermada.

En el caso de las muestras de cáscara de almendra la A10 prácticamente ha dado un mismo resultado y el resto si ha ido aumentando aunque la relación de a mayor porcentaje de cáscara menor resistencia se sigue cumpliendo. Si se comparan las resistencias obtenidas de las muestras con ceniza de las de cáscara, las de ceniza son mayores, asemejándose la C30 con un valor de 3,30 a la A10 con un valor de 3,10 N/mm².

Tabla 2.18 Resistencias mecánicas a flexión a 15 días

Probeta	Carga (N)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
PP	3367	7,89
C10	1912	4,48
C20	1837	4,31
C30	1408	3,30
A10	1420	3,33
A20	1580	3,70
A30	1077	2,52

La resistencia que un mortero adquiere a los 28 días es en el 99% de los casos su resistencia final, por lo tanto estos datos son tomados como base para su evaluación que demuestra la resistencia a flexión final de los morteros estudiados.

La resistencia a flexión a los 28 días de la muestra patrón, al igual que en las edades analizadas anteriormente, sigue siendo el doble o superior que el resto de las muestras. La Tabla 2.19 muestra los resultados obtenidos.

Si se comparan las muestras de cáscara de almendra con las de ceniza se observa que las probetas de ceniza tienen unos valores superiores a los de la cáscara de almendra a pesar de que las cantidades de cemento son superiores en el caso de los morteros con sustitución de cáscara. Esto se debe a dos factores muy importantes en los morteros, el agua de amasado y a la homogeneidad de la masa. Por una parte, los morteros con cáscara de almendra tienen la cáscara saturada por lo que a la hora del curado la pérdida de agua es menor. Y por otra que la mezcla con cáscara no proporciona una mezcla homogénea y se diferencian sus componentes, mientras que la ceniza gracias a su finura se mezcla con el cemento y da lugar a un mortero cuya apariencia no se diferencia del patrón.

Como se puede ver en los resultados, a medida que aumenta la ceniza o la cáscara de almendra la resistencia va disminuyendo

De las tres muestras de morteros con cenizas el mejor comportamiento en resistencia a flexión lo tiene C10 con 5,39 N/mm².

En las muestras de mortero con cáscara de almendra el mejor resultado es el de A10 con una resistencia de 4,10 N/mm² diferenciándose cerca de 0,8 N/mm² de A20 y A30 que tienen valores muy parecidos 3,34 y 3,10 N/mm² respectivamente.

Tabla 2.19 Resistencias mecánicas a flexión a 28 días

Probeta	Carga (N)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
PP	3658	8,57
C10	2301	5,39
C20	2023	4,74
C30	1622	3,80
A10	1715	4,02
A20	1424	3,34
A30	1323	3,10

De las 3 probetas que se han obtenido de cada molde fabricado con cada dosificación y que iban destinadas al ensayo de resistencia a 28 días se reservó 1 para ensayarla posteriormente a los 60 días de edad.

Estas 7 probetas fueron sacadas del tanque de curado a los 28 días y se mantuvieron en el laboratorio a temperatura ambiente de 20±2°C y con una humedad relativa no inferior al 50%. Con los resultados de resistencia a flexión a los 60 días se intenta observar la evolución de las muestras cuando pierden parte de la cantidad de agua que las probetas fabricadas con ceniza tienen en su interior, por ser este un material muy absorbente y que tienen las muestras de cáscara de almendra por haberlas utilizado saturadas. En la Tabla 2.20 se recogen los valores obtenidos del ensayo a resistencia a flexión a 60 días.

Tabla 2.20 Resistencias mecánicas a flexión a 60 días

Probeta	Carga (N)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
PP	3371	7,90
C10	2872	6,73
C20	1540	3,61
C30	1190	2,79
A10	2298	5,39
A20	1464	3,43
A30	1685	3,95

Llama la atención el incremento de resistencia que se ha producido en la muestra de C10 alcanzando 6,73 N/mm² y quedando más próximo al valor de la muestra patrón que es de 7,90 N/mm², mientras que las muestras de C20 y C30 sufren un notable descenso con valores de 3,61 y 2,79 N/mm². En las tres muestras de cáscara de almendra se produce un incremento de la resistencia destacando que A10 es la de mayor resistencia con 5,39 N/mm² pero ahora A30 tiene un valor de 3,95 N/mm² superando a A20 que es de 3,43 N/mm².

En la Tabla 2.21 se recogen los valores obtenidos del ensayo a resistencia a flexión a 90 días.

Tabla 2.21 Resistencias mecánicas a flexión a 90 días

Probeta	Carga (N)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
PP	2850	6,68
C10	3029	7,10
C20	1857	4,35
C30	973	2,28
A10	1980	4,64
A20	1460	3,42
A30	1143	2,68

Se observa un incremento de resistencia que se ha producido en la muestra de C20 alcanzando 4,35 N/mm² y una reducción en el valor de la muestra patrón que es de 6,68 N/mm², mientras que la muestras C30 sufre un descenso con valores de 2,28

N/mm². En las muestras A10 y A30 se produce una disminución de la resistencia destacando que A20 mantiene similar valor de resistencia respecto al curado a 60 días, con 3,42 N/mm².

En las Figs. 2.97a, b se pueden distinguir de forma más clara las diferencias de resistencias según cada tipo de mortero ensayado y la evolución de los mismos conforme va aumentando su edad.

Fig. 2.97a Resistencias mecánicas a flexión del mortero endurecido según la edad

Fig. 2.97b Resistencias mecánicas a flexión del mortero endurecido según la edad

2.3.5.2 Resistencia mecánica a compresión

UNE-EN 196-1:2005

Métodos de ensayo de cementos.

Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

Finalizado el ensayo a flexión, con cada una de las partes de las probetas prismáticas de 40×40×160 mm resultantes al romperlas, se realizaron los ensayos de resistencias mecánicas a compresión a los 7, 15, 28, 60 y 90 días, siguiendo el procedimiento descrito en el punto 2.2.5.2.

Para la realización de este ensayo se han utilizado 105 probetas repartidas de la siguiente manera: en los ensayos a los 7 y 15 se han utilizado 42 para cada edad donde 6 probetas son de cada muestra de mortero. En el ensayo a 28 días se han utilizado 4 probetas de cada tipo de mortero haciendo un total de 28. Como último ensayo a compresión se ha ensayado a 60 días usando 14 probetas, 2 de cada muestra estudiada y a 90 días se han utilizado 21 probetas. A continuación se analizan los resultados con las medias de los valores obtenidos.

En la Tabla 2.22 se presentan los valores resumidos de la resistencia a compresión de las muestras a los 7 días.

Tabla 2.22 Resistencias mecánicas a compresión a 7 días

Probeta	Carga (N)	Valor medio (N/mm ²)
PP	56975	35,61
C10	18598	11,62
C20	24035	15,02
C30	16547	10,34
A10	20212	12,63
A20	24035	6,88
A30	10235	6,40

La muestra patrón en esta primera edad ofrece una resistencia a compresión de 35,61 N/mm² muy superior al resto, un 58% más que C20 que es la que le sigue con una resistencia de 15,02 N/mm².

La muestra C10 a pesar de ser la que tiene menor porcentaje de ceniza presenta menor resistencia que C20. El motivo que puede incidir en este resultado es que la relación agua/cemento en C10 es de 0,6 en cambio en C20 es de 0,5.

Las muestras con sustitución de cáscara de almendra a medida que aumenta la cantidad de este material, se produce una merma en la resistencia. A10 tiene un valor de 12,63 N/mm² que llega a ser el doble que A20 y A30 que tienen valores muy cercanos, 6,88 y 6,40 N/mm² respectivamente.

Los resultados de las resistencias a compresión de las muestras ensayadas a los 15 días se pueden ver en la Tabla 2.23 de forma resumida.

Tabla 2.23 Resistencias mecánicas a compresión a 15 días

Probeta	Carga (N)	Valor medio (N/mm ²)
PP	63501	39,69
C10	27741	17,34
C20	27209	17,01
C30	19670	12,29
A10	17217	10,76
A20	24445	15,28
A30	19798	12,37

Todas las muestras presentan valores superiores que en el ensayo a los 7 días menos A10 que ha tenido un valor menor. La muestra patrón sigue teniendo una resistencia mucho más elevada que el resto.

En las muestras con ceniza se obtienen resistencias que van de mayor a menor conforme aumenta el porcentaje de este material. La muestra C10 tiene la mayor resistencia, 17,34 N/mm² pero prácticamente es igual que C20 con 17,01 N/mm².

La muestra A20 ha tenido un incremento muy notable, alcanzado más del doble de resistencia que a los 7 días y posicionándose como la que presenta mayor resistencia a compresión dentro de las muestras de cáscara de almendra, por encima de A10, que en este caso ha disminuido.

Los resultados de resistencia a compresión que ofrece un mortero a los 28 días de edad aparecen resumidos en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24 Resistencias mecánicas a compresión a 28 días

Probeta	Carga (N)	Valor medio (N/mm ²)
PP	71319	44,57
C10	30105	18,82
C20	29687	18,55
C30	23308	14,57
A10	32976	20,61
A20	18767	11,73
A30	19452	12,16

A esta edad el mortero ya adquirido el 99% de su dureza por lo que los valores son muy representativos para determinarlos como resistencia final. Los valores obtenidos en la resistencia de la muestra patrón se alejan bastante del resto de muestras con una resistencia de 44,57 N/mm² y está dentro de los valores que se estiman en un mortero al utilizar un cemento CEM I 42,5 R y ensayarlo a los 28 días de edad, que son de 42,5-62,5 N/mm². Después de las probetas patrón PP que tienen los valores más elevados son A10 con una resistencia a compresión de 20,61 N/mm² y C10 con 18,82 N/mm², que al compararlas con los 44,57 N/mm² se observa que son bastante más bajas, alrededor de un 54 a un 58% inferiores. Las probetas C10 y C20 presentan unas resistencias a compresión que se acercan considerablemente entre sí. Al comparar las

probetas con cáscara de almendra A20 y A30 tienen valores muy semejantes. Se observa que entre A10 y A20 o A30 existe un descenso de la resistencia de casi un 50%. Las probetas ensayadas a los 60 días se sacaron del tanque de curado a los 28 días y se conservaron en el laboratorio a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa no menor del 50% (Tabla 2.25).

Tabla 2.25 Resistencias mecánicas a compresión a 60 días

Probeta	Carga (N)	Valor medio (N/mm ²)
PP	86820	54,26
C10	36632	22,90
C20	33756	21,10
C30	22364	13,98
A10	34742	21,71
A20	21676	13,55
A30	18191	11,37

Analizando los resultados la probeta patrón es la que tiene un mayor aumento de resistencia 54,26 N/mm² un poco más de 10 N/mm² con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días. El resto de probetas tienen un ligero incremento de poco más de 1 N/mm² en comparación a los resultados de los 28 días, menos las probetas C30 y A30 cuyos resultados aunque disminuyen muy ligeramente este descenso es tan pequeño que se puede despreciar, considerando que estas dos probetas mantienen su resistencia estable. Los valores obtenidos a 90 días quedan expuestos en la Tabla 2.26.

Tabla 2.26 Resistencias mecánicas a compresión a 90 días

Probeta	Carga (N)	Valor medio (N/mm ²)
PP	93935	58,71
C10	41150	25,72
C20	36845	23,03
C30	28092	17,56
A10	38435	24,02
A20	23072	14,42
A30	17982	11,24

Analizando los resultados se produce un aumento de la resistencia con respecto a la resistencia obtenida a los 60 días, siendo significativo este incremento en las probetas de mortero C10 y C20 y en A10 y A20, siendo muy similar en A30. El tiempo de curado ha favorecido un aumento de la resistencia mecánica a compresión.

En las Figs. 2.98a,b, se pueden distinguir de forma más clara las diferencias de resistencias a compresión según cada tipo de mortero ensayado y la evolución de los mismos conforme va aumentando su edad.

Fig. 2.98a Resistencias mecánicas a compresión del mortero endurecido según la edad

Fig. 2.98b Resistencias mecánicas a compresión del mortero endurecido según la edad

2.3.6 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS ACÚSTICOS

2.3.6.1 Coeficiente de absorción acústica

UNE-EN ISO 10534-2:2002

Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia

Se exponen a continuación los resultados sobre las propiedades acústicas (absorción) de los morteros en dos rangos de frecuencia (50 Hz a 1600 Hz y de 500 Hz a 6400 Hz). Los aspectos a tener en cuenta en el comportamiento de las diferentes muestras serán por un lado la presencia de diferentes fases (pasta cemento, árido silíceo, cáscara de almendra y ceniza de cáscara de almendra) y por otro la estructura porosa generada al realizar los diferentes morteros en función de su dosificación. En cuanto a la absorción de sonido a baja frecuencia se observan diferencias significativas entre la muestra patrón (mortero de cemento normal) y las diferentes dosificaciones de sustitución de árido y por la adición de ceniza (Fig. 2.99).

Fig. 2.99 Espectro de absorción acústica para rangos de frecuencias de entre 50 Hz a 1600 Hz.
Las líneas muestran los valores medios de cada tipo de muestra (en cada caso n=10)

Mientras que las muestras patrón se caracteriza por un aumento de la absorción del 20% entorno a los 500 Hz, para las distintas dosificaciones (sustitución de árido y ceniza) la absorción asciende a un 45-60% (Fig. 2.100).

Fig. 2.100 Espectro de absorción acústica para rangos de frecuencias de entre 500 Hz a 6400 Hz. Las líneas muestran los valores medios de cada tipo de muestra (en cada caso n=10)

En un rango de frecuencias mayor (500 Hz a 6400 Hz) las diferencias de absorción entre las muestras patrones y las distintas dosificaciones son notables. Mientras que las muestras patrón se caracteriza por una absorción insignificante en todo el espectro existe un aumento considerable de la absorción acústica tanto para la sustitución de árido como para la ceniza. En el caso concreto del árido en aproximadamente los 1000 Hz existe una absorción del 35% para sustitución de árido de cáscara de almendra al 10% y más de un 70% cuando la sustitución de cáscara de almendra alcanza el 30%. Para el caso de la sustitución de ceniza de cáscara de almendra por cemento existe un aumento notable de la absorción a los 2000 Hz. Por encima del 60% y el 80% para el caso de la sustitución del 10% y 30% de ceniza de ceniza correspondientemente. Estos

máximos de absorción se pueden describir como selectivos para una banda de frecuencia particular, ya que está limitado a este máximo dentro de un intervalo frecuencial estrecho. La absorción reducida a rangos de baja frecuencia en morteros y hormigones se suele dar en compuestos muy ligeros (Pastor et al., 2014). Este es el caso de los morteros obtenidos en esta investigación, donde la incorporación de la ceniza y la cáscara de almendra aumentan el espectro del sistema poroso de los morteros.

En el caso particular de los materiales estudiados en este proyecto de investigación muestran una absorción selectiva entre 1000 y 2500 Hz, (una zona que se considera de frecuencia máxima para la sensibilidad del oído humano). Este hecho puede ser de una gran aplicabilidad ya que no altera el resto del espectro audible. El diseño de los elementos de control de ruido tales como las barreras acústicas construidas con estos tipos de materiales permitiría absorber una gran parte del ruido generado y, en consecuencia, reducir la perturbación de los diferentes receptores.

2.3.6.2 Velocidad de los impulsos ultrasónicos

UNE-EN 12504-4:2006

Ensayos de hormigón en estructuras.

Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos

Esta norma especifica un método para la determinación de la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos en el mortero endurecido, lo que se utiliza en diversas aplicaciones. En este caso se han ensayado probetas de este material para determinar dicha velocidad de propagación.

Un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie del material en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales. Después de atravesar en el material una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte

en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso.

Se han ensayado las probetas prismáticas de 160x40x40 mm a 28 días de edad, saturadas de agua y en probetas secas utilizadas previamente en los ensayos de densidad aparente. Como era de esperar, la velocidad de los impulsos ultrasónicos es mayor en las probetas saturadas que en las secas. Se observa en éstas últimas que cuanto mayor es el contenido de cáscara de almendra más impermeabilidad al sonido tiene (Fig. 2.101). Ello indica la factibilidad de que morteros fabricados con estos ROCA tuvieran propiedades de aislamiento acústico que debieran ser consideradas desde el punto de vista de su uso en edificación y construcción.

Fig. 2.101 Velocidad media de los impulsos ultrasónicos en probetas secas/saturadas

2.3.7 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS DE DURABILIDAD

2.3.7.1 Resistencia a la cristalización de las sales

UNE-EN 12370:1999

*Métodos de ensayo para piedra natural.
Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*

Resistencia a la cristalización en NaCl

Para conocer el comportamiento de las muestras frente a la resistencia a la cristalización en NaCl, se lleva a cabo la metodología descrita en el epígrafe 2.2.7.1.

El número de probetas utilizadas para este ensayo ha sido de 7, todas ellas prismáticas de 40x40x160 mm y a partir de los 28 días de edad de curado, las cuales han sido fabricadas y curadas según el procedimiento indicado en el epígrafe 2.2.2.

Para evaluar la degradación de las probetas se han considerado tres factores: la diferencia de peso después del ensayo, la resistencia mecánica al ensayo de flexión y la resistencia mecánica al ensayo de compresión. Los resultados del ensayo de resistencia a la cristalización en NaCl y de las variaciones de peso de cada probeta a través de los ciclos a las que han estado sometidas están reflejados en la Tabla 2.27.

Tabla 2.27 Variaciones de peso entre el inicio y fin del ensayo a resistencia a la cristalización en NaCl

PROBETAS (resistencia a NaCl)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIACIÓN	
			en peso (g)	en %
PP	582,99	580,85	- 2,14	- 0,3671
C10	548,03	544,82	- 3,21	- 0,5857
C20	573,85	556,39	- 17,46	- 3,0426
C30	560,79	559,5	- 1,29	
A10	505,64	509,88	+ 4,24	+ 0,8385
A20	465,68	445,93	- 19,75	- 4,2411
A30				

En la Fig. 2.102 se puede observar de forma gráfica esa evolución del peso después de cada ciclo.

Fig. 2.102 Variaciones de peso de cada probeta a través de los ciclos a las que han estado sometidas

Analizando los resultados obtenidos se puede observar como en todas las probetas existe una variación en peso, de constante disminución, a excepción de la A10.

La disminución de peso en las probetas PP, C10 y C30 no es muy elevada, mientras que en las probetas C20 y A20 disminuye sensiblemente, con valores de 17,46 g y 19,75 g respectivamente. La probeta A30 en el ciclo número 7 está tan deteriorada que es retirada del ensayo.

Estas pérdidas de peso se han podido producir en el proceso de lavado de las probetas para eliminar el exceso de sal existente sobre las mismas.

Los resultados obtenidos en el ensayo a resistencia a flexión de las probetas sometidas a la resistencia a la cristalización por cloruros quedan reflejados en la Fig. 2.103, donde se observa que todas las probetas han sufrido una caída de sus resistencias. La probeta

patrón y la probeta A10 son las que menos variación tienen con una disminución inferior a 1 N/mm². La probeta C10 es la que sufre una mayor disminución de su resistencia de casi la mitad pasando de 5,39 a 2,59 N/mm². La resistencia más baja obtenida es la de la probeta A20.

Fig. 2.103 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en NaCl

Por otra parte, los resultados obtenidos en el ensayo a resistencia a compresión de las probetas sometidas a la resistencia a la cristalización por cloruros se muestran en la Fig. 2.104.

Puede observarse que el ataque de estos cloruros hace disminuir las resistencias a compresión en todas las probetas ensayadas, siendo en la C30 muy pequeña la diferencia. Las probetas con más caída de su resistencia son la C10 y A20 con una disminución de cerca del 40%. El resto de probetas tienen reducciones de resistencias muy parecidas de cerca de 3 N/mm².

Fig. 2.104 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en NaCl

Resistencia a la cristalización en Na_2SO_4

Para evaluar la resistencia a la cristalización en Na_2SO_4 de los distintos morteros, se han ensayado 7 probetas prismáticas de 40x40x160 mm, una de cada dosificación. fabricadas y curadas como se explica en el epígrafe 2.2.2.

Siguiendo la metodología de ensayo (epígrafe 2.2.7.1) se determinan tres parámetros que son: la variación de peso, la resistencia a flexión y la resistencia a compresión una vez sometidas las probetas a la acción de estas sales.

En la Tabla 2.28 se reflejan los resultados de los pesos, antes y después del ensayo y donde se observa que la probeta patrón no sufre modificación de su peso tras el ensayo.

La probeta C10 sufre una ligera disminución de 1,37 g y le sigue la C30 con una caída más notable de 6,37 g.

La probeta A10 al contrario que el resto de probetas ensayadas sufre un aumento de su peso de 19,73 g.

Tabla 2.28 Variaciones de peso entre el inicio y fin del ensayo a resistencia a la cristalización en Na₂SO₄

PROBETAS (resistencia a Na ₂ SO ₄)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIACIÓN	
			en peso (g)	en %
PP	583,7	583,58	- 0,12	- 0,0206
C10				
C20	570,62	569,25	- 1,37	- 0,2401
C30	564,61	558,26	- 6,35	- 1,1247
A10	503,18	522,91	+ 19,73	+ 3,9211
A20				
A30				

En la Fig. 2.105 se observa de manera gráfica esta evolución a lo largo de los distintos ciclos y también especifica en que ciclo se dejan de ensayar las probetas que se han deteriorado y no han podido finalizar el ensayo.

La primera en deteriorarse es la probeta C10 en el ciclo 2 y las probetas A20 y A30 lo hacen tras el ciclo 3.

Los resultados del ensayo a flexión de las probetas atacadas por sulfatos se exponen en la Fig. 2.106, comparándolos con los obtenidos en el ensayo a flexión de las probetas de 28 días edad.

Todas disminuyen sus resistencias pero la que lo hace con un valor mayor es la probeta patrón bajando cerca de 2 N/mm², en cambio la caída que sufre la probeta C20 es prácticamente insignificante.

Fig. 2.105 Variaciones de peso de cada probeta a través de los ciclos a las que han estado sometidas

Fig. 2.106 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en Na_2SO_4

Los resultados del ensayo a compresión se reflejan en la Fig. 2.107. Aquí las caídas comparándolas con las obtenidas en las probetas a los 28 días de edad no tienen grandes diferencias. La probeta C30 se mantiene igual y la caída que sufre la probeta C20 es insignificante siendo la patrón la que sufre una mayor variación.

Fig. 2.107 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en Na_2SO_4

2.3.7.2 Resistencia a la heladicidad

UNE-EN 539-2:2013

Tejas de arcilla cocida para colocación discontinua. Determinación de las características físicas. Parte 2: Ensayo de resistencia a la helada

UNE-EN 12371:2011

*Métodos de ensayo para piedra natural.
Determinación de la resistencia a la heladicidad*

Tras someter las probetas a los ciclos de hielo/deshielo siguiendo el procedimiento de ensayo descrito en el epígrafe 2.2.7.2, posteriormente se ensayan a flexión y compresión, siguiendo igualmente la metodología de ensayo descrita en los epígrafes 2.2.5.1 y 2.2.5.2 respectivamente y poder determinar cómo es afectada la resistencia de los morteros fabricados con los ROCA y ROCCA ante los cambios bruscos de temperatura.

A lo largo de los ciclos de hielo/deshielo en la inspección visual que se realiza a las probetas no se observa ningún tipo de deterioro o rotura en sus caras.

En la Fig. 2.108 se muestra de forma gráfica el resultado obtenido en los ensayos de resistencia a flexión una vez finalizados los ciclos de hielo/deshielo a las que han estado sometidas las diferentes probetas y en los que se desprende de los valores de las probetas PP que éstas presentan relativamente una resistencia mucho mayor que el resto. Para analizar los resultados, se han comparado con los obtenidos tanto en el ensayo de resistencia a flexión como en el de resistencia a compresión a los 28 días.

Realizada la comparación previa al sometimiento de las probetas a ciclos de hielo/deshielo, la disminución de resistencias en la probeta PP llega a ser de casi un 50%. Esta caída tan elevada de resistencia también afecta a las probetas C10 y A30.

Llama la atención que la probeta A10 ha incrementado su resistencia tras el ensayo de hielo/deshielo siendo a los 28 días de 4,02 N/mm² y pasando a 4,99 N/mm² después del ensayo.

Las probetas que presentan un comportamiento más estable son la A20 que disminuye apenas 0,25 N/mm² y C20 que disminuye 1 N/mm².

Fig. 2.108 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de heladicidad

Los resultados obtenidos en el ensayo a compresión tras los ciclos de hielo/deshielo se muestran gráficamente en la Fig. 2.109, donde la probeta PP presenta una insignificante variación a la baja de su resistencia.

La disminución que se producen en las probetas C10, C20 y A30 es muy parecida con una disminución próxima a 1 N/mm².

La probeta C30 tiene una caída superior de su resistencia a compresión pasando de 14,57 a 9,65 N/mm².

Llama la atención como para el caso de A10 y A20 ocurre todo lo contrario, se produce un incremento de la resistencia a compresión.

Fig. 2.109 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de heladicidad

2.3.8 ENSAYOS DE MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO. ENSAYOS TÉRMICOS

2.3.8.1 Transmisión térmica en régimen estacionario

UNE-EN ISO 8990:1997

*Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada*

Las propiedades que se pueden medir son: el coeficiente de transmisión de calor (transmitancia térmica o conductividad térmica) y la resistencia térmica. El método de la caja caliente calibrada es apropiado para ensayar probetas verticales (muros).

El coeficiente de conductividad térmica λ es el parámetro que expresa la propiedad fisicoquímica de toda sustancia, definida como: la cantidad de calor que ocurre en la unidad de tiempo, a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y caras planas-paralelas y espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado.

Mediante este ensayo de transmisión térmica en régimen estacionario se han obtenido las temperaturas máximas que son capaces de alcanzar tanto la cara externa como la interna del material ensayado. Tanto en el primer ensayo como en el siguiente las probetas ensayadas alcanzaron similares valores transcurridas casi 5 horas desde que se iniciaron los respectivos ensayos.

Los probetas fabricadas de los morteros ensayados han sido los de cáscara de almendra, en sus 3 dosificaciones en porcentaje en peso (10, 20, 30%) y la probeta patrón PP. ANEXO 2.11.

En la Tabla 2.29 se exponen los resultados de los ensayos para la determinación de la conductividad térmica del material ensayado. De forma gráfica los mismos están representados en la Fig. 2.110.

Tabla 2.29 Resultados de los ensayos para la determinación de la conductividad térmica probetas PP, A10, A20, A30

Ensayo	Probeta	TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 1 (°C)	CEM 1 (°C)	e (m)	R _{si}	R _{se}	λ (W/m ⁰ C)
1	PP	59,4	23,2	45,3	37,9	0,024	0,13	0,13	0,092886
2		59,5	24,0	45,9	39,0				0,099478
					Media				0,096182
		TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 2 (°C)	CEM 2 (°C)	e (m)	R _{si}	R _{se}	λ (W/m ⁰ C)
1	A-10	59,4	23,2	45,3	37,1	0,025	0,13	0,13	0,085366
2		59,5	24,0	45,2	37,3				0,087342
					Media				0,086354
		TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 3 (°C)	CEM 3 (°C)	e (m)	R _{si}	R _{se}	λ (W/m ⁰ C)
1	A-20	59,4	23,2	44,0	36,7	0,025	0,13	0,13	0,098973
2		59,5	24,0	44,4	38,5				0,125424
					Media				0,112198
		TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 4 (°C)	CEM 4 (°C)	e (m)	R _{si}	R _{se}	λ (W/m ⁰ C)
1	A-30	59,4	23,2	45,0	38,4	0,026	0,13	0,13	0,116606
2		59,5	24,0	45,6	39,2				0,118219
					Media				0,117412

Coefficiente de conductividad térmica λ:

$$\lambda = \frac{e \cdot ((TAC - TAE) - (CIM - CEM))}{((CIM - CEM) - (R_{si} - R_{se}))}$$

λ	Coefficiente de conductividad térmica (W/m °C)
e	Espesor de la capa (en metros)
(CIM – CEM)	Incremento de temperatura entre las caras de la probeta (en °C)
(TAC – TAE)	Incremento de temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la caja
R _{se}	Resistencia térmica superficial exterior (m ² °C/W)
R _{si}	Resistencia térmica superficial interior (m ² °C/W)

Fig. 2.110 Resultados de los ensayos para la determinación de la conductividad térmica probetas PP, A10, A20, A30

Analizando los valores obtenidos se deduce que a mayor cantidad de cáscara de almendra, las conductividades térmicas son menores, dando lugar a mejores aislantes térmicos.

La Tabla 2.30 recoge los valores de densidades y conductividades térmicas λ de las probetas ensayadas y que confirman lo arriba expresado. De forma gráfica está representado en la Fig. 2.111.

Tabla 2.30 Valores de densidades y conductividades térmicas λ de las probetas ensayadas PP, A10, A20, A30

Mortero	Densidad (kg/m ³)	λ (W/m ⁰ C)
PP	2127,50	0,096182
A10	1801,28	0,086354
A20	1668,84	0,112198
A30	1572,19	0,117412

Fig. 2.111 Densidades medias de las probetas PP, A10, A20, A30

Comparando las densidades de los morteros ensayados y su conductividad térmica con los requisitos recogidos en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE para morteros de cemento para albañilería y para revoco o enlucido se observa que los morteros en los que parte del árido natural ha sido sustituido por cáscara de almendra (ROCA) tienen estos menor conductividad térmica que los valores indicados en el Catálogo, lo que significa que su aplicación se traduce en una mejora del aislamiento térmico (Tabla 2.31).

Tabla 2.31 Requisitos recogidos en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE para morteros de cemento para albañilería y para revoco o enlucido

3.5 Morteros				
Material	Morteros			
	HE			
	ρ kg / m ³	λ W / m·K	c_p J / kg·K	μ
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido ^{(1) (2)}	$\rho > 2000$	1,80	1000	10
	$1800 < \rho \leq 2000$	1,30	1000	10
	$1600 < \rho \leq 1800$	1,00	1000	10
	$1450 < \rho \leq 1600$	0,80	1000	10
	$1250 < \rho \leq 1450$	0,70	1000	10
	$1000 < \rho \leq 1250$	0,55	1000	10
	$750 < \rho \leq 1000$	0,40	1000	10
	$500 < \rho \leq 750$	0,30	1000	10
Mortero de áridos ligeros (vermiculita, perlita) ⁽²⁾	$\rho \leq 1000$	0,41	1000	10
Mortero de yeso	$\rho \leq 1600$	0,80	1000	6

⁽¹⁾ Para el mortero colocado "in situ" se considera una densidad de 1900 kg/m³

⁽²⁾ Los valores de diseño anotados corresponden a un percentil del 90% y provienen de los valores declarados obtenidos según la norma UNE EN 1745:2002 y corregidos según los criterios de la norma UNE EN 12524:2000, con factor de corrección de humedad, Fm, igual a 1,17.

2.3.9

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Lugar de ensayo

Laboratorio Centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Equipo utilizado

Para la preparación y análisis de las muestras se emplearon los siguientes equipos: el microscopio electrónico Hitachi S-570 "Scanning Electron Microscope con analizador Kevex 1728", el "BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply" y el "Polaron SEM Coating System" (Figs. 2.25 y 2.26).

Fundamento del método

El mismo queda explicado en el documento, concretamente en el epígrafe 2.2.1 Caracterización química. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Preparación de las muestras

Se analizaron un total de 6 muestras de morteros fabricados con diferentes porcentajes en peso de cáscara de almendra en estado natural y calcinada (ceniza) (Tabla 2.32).

Tabla 2.32 Relación de muestras analizadas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Muestra	% de sustitución
Mortero	10 (ceniza)
Mortero	20 (ceniza)
Mortero	30 (ceniza)
Mortero	10 (cáscara de almendra)
Mortero	20 (cáscara de almendra)
Mortero	30 (cáscara de almendra)

Análisis y discusión de resultados

La Fig. 2.112 (a, b y c) muestra la evolución de la reacción de un fragmento de residuo (R) con la pasta (P) a diferentes aumentos (66x, 170x y 400x, respectivamente). Se puede establecer una comparación en cuanto a la evolución del proceso de reacción de las interfases árido-pasta y residuos-pasta, como resultado de lo cual se puede apreciar que los áridos naturales empleados en el mortero han completado, a excepción de algunos casos, su reacción a 28 días, evidenciado por el tono pálido de sus formas y contornos. Visto a mayor aumento (Fig. 2.112c), se aprecia el desarrollo de la reacción a nivel fisural.

Fig. 2.112 (a, b y c): secuencias de microfotografías en las que se observa un fragmento de ROCA a diferentes aumentos reaccionando con la pasta

Figura 2.113 (a, b y c): microfotografías tomadas a diferentes aumentos para mostrar el proceso de reacción de los residuos con la pasta, así como el desarrollo de productos de reacción neoformados

En la microfotografía Fig. 2.113a se aprecian fragmentos de residuos (R) que en plena reacción con la pasta, dando lugar a la formación de portlandita (Pt) como producto secundario. El proceso de reacción de hidratación se evidencia por la aureola clara que rodea a los residuos (R) (Fig. 2.113 b y c). El fragmento de residuo (R) alargado que se ubica en la parte izquierda de las microfotografías muestra zonas de reacción (ZR) en sus extremos (Fig. 2.113 b y c). La existencia anómala de geles (G) en este período indica una lentitud inusual del proceso de fraguado, provocado por la presencia de

residuos; sin embargo, la presencia de belita (*B*), el cual es un silicato bicálcico de reacción lenta, coexistiendo con dichos geles indica que el fraguado ralentizado ha permitido su cristalización, factor decisivo en el incremento de las resistencias mecánicas del mortero.

Las microfotografías de la Fig. 2.114 (*a* y *b*) muestran el desarrollo de portlandita (*Pt*) a expensas de la reacción del árido (*A*) con la pasta (*P*). Son cristales hexagonales e idiomórficos de color gris claro, y con hábitos variables tabulares, prismáticos y aciculares. Se aprecia también la presencia de belita (*B*) en el centro del campo visual de la microfotografía Fig. 2.114*b*. Se aprecia también la presencia de geles y las zonas de reacción (*ZR*) de las interfases.

Fig. 2.114 (*a* y *b*): microfotografías que muestran el desarrollo de fases minerales secundarias como productos de reacción hidráulica en la interfase árido-pasta

La Fig. 2.115 (*a*, *b* y *c*) representa una muestra de mortero patrón, sin presencia de residuos. Como puede apreciarse, se ha producido una reacción hidráulica normal con un fraguado rápido de la pasta, como consecuencia de lo cual se produce una abundante formación de fases cristalinas de neoformación, fundamentalmente portlandita (*Pt*) y etringita (*Et*). En la microfotografía Fig. 2.115*a* se observa la relación de la interfase árido-pasta a 68x aumentos, así como la formación de microfisuras. En la parte central del campo visual se aprecia una cavidad (*Cv*) que representa la

impronta de un grano de árido extraído durante los ensayos mecánicos a compresión, en cuyo interior, y a mayores aumentos (130x y 300x, respectivamente), se desarrollan abundantes individuos cristalinos de portlandita y etringita (Fig. 2.115 *b* y *c*).

Fig. 2.115 (*a*, *b* y *c*): microfotografías con diferentes aumentos mostrando el desarrollo de especies mineralógicas cristalinas de portlandita y etringita en un mortero sin residuos orgánicos

En la secuencia de microfotografías representadas en la Fig. 2.116 (*a*, *b* y *c*) a diferentes aumentos se observa claramente la relación entre la interfase *residuo-árido-pasta* en una muestra donde el árido natural (*A*) ha sido sustituido parcialmente (10%) por residuo (*R*). En la Fig. 2.116*a* se aprecia en primer plano un fragmento de residuo (*R*) reaccionando con la pasta (*P*) a lo largo de un plano bien definido o zona de reacción (*ZR*). En la Fig. 2.116 *b* y *c* se observa el mismo proceso de reacción, pero destaca la madurez de la pasta, la formación de portlandita (*Pt*) y la reacción avanzada de los áridos y residuos, respectivamente. Este análisis morfológico demuestra que el sistema ha alcanzado resistencias mecánicas apreciables en este período de tiempo.

Fig. 2.116 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 10%

En la Fig. 2.117 (a, b y c) se ofrece distintas vistas microscópicas del comportamiento de una pasta en la cual la sustitución del árido natural (A) por residuo orgánico (R) es del 20%. En la Fig. 2.117a ya es visible la cohesión avanzada de la pasta, con aspecto prácticamente criptocristalino. Son visibles los fragmentos de residuos aún hidratados, así como el desarrollo de cristales idiomórficos de portlandita. En la Fig. 2.117 b y c se observan fragmentos de residuos orgánicos (R) en plena reacción (ZR) con la pasta, como resultado de lo cual se ha formado abundante gel (G) de tobermorita de lento desarrollo. Hay presencia de belita (B), lo cual es el resultado de un lento proceso de fraguado, en el cual cobra importancia la formación de tobermorita (Tb), mientras que la cristalización de portlandita (Pt) está más controlada a causa de la presencia de residuo (R). Es común la aparición de microfracturas en los fragmentos de residuos, debido a la tensión diferencial que experimenta la interfase árido-residuo-pasta durante el proceso de fraguado. La conformación morfológica que exhibe el sistema puede ser indicativo de resistencias mecánicas moderadamente altas.

Fig. 2.117 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural (A) ha sido sustituido por residuo orgánico (R) en un 20%

El aspecto de la pasta (P) en la cual la sustitución del árido natural (A) por residuo (R) es del 30% es poroso y no uniforme, desde el punto de vista morfológico. Según se ha deducido en párrafos anteriores la presencia de material orgánico impide la cristalización normal de los geles, al tiempo que interfiere en los incrementos de resistencias mecánicas. No obstante, según las microfotografías mostradas en la Fig. 2.118 (a, b y c) el proceso de fraguado sigue desarrollándose, como lo atestigua la presencia de zonas de reacción (ZR), la formación de belita, portlandita y etringita.

Fig. 2.118 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural (A) ha sido sustituido por residuo orgánico (R) en un 30%

Otro objetivo de este trabajo de investigación fue el estudio del comportamiento de un mortero cuando el proyecto de mezcla comprende la sustitución del 10, del 20 y del 30% de árido por ceniza procedente de la calcinación del residuo tipo ROCCA. Cuando las sustituciones se verifican a un 10% (Fig. 2.119 *a*, *b* y *c*) la pasta pierde plasticidad, adopta una morfología terrosa, poco cristalina y con desarrollo incipiente de geles. Las partículas de cenizas muestran una lenta reactividad con la pasta, aunque el proceso es normal. En la Fig. 2.119*a* puede apreciarse la reacción de las pequeñas partículas de ceniza (*R*) con la pasta, integrándose lentamente en la interfase.

Fig. 2.119 (*a*, *b* y *c*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfaces árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (*R*) en un 10%

En la Fig. 2.119*b*, con mayores aumentos, se aprecia incluso la formación de microgrietas (*F*) en todo el campo visual, en cuyos bordes ha empezado el desarrollo de nuevas especies mineralógicas incipientes. En *c* son visibles los productos de reacción como belita (*B*) y etringita (*Et*), esta última desarrollada en el espacio libre formado por la fisura (*F*) que atraviesa toda la cavidad (*Cv*). Algunos fragmentos de áridos (*A*) no han completado aún su reacción con la pasta (*P*).

Un caso muy parecido ocurre cuando la sustitución se incrementa en un 20%, como puede comprobarse en la Fig. 2.120 (*a y b*), donde es evidente que se ha iniciado una reacción entre las distintas interfases, aunque la morfología adquiere una cierta apariencia porosa que puede tratarse de espacios vacíos que terminarán rellenándose por los nuevos productos de reacción a edades superiores de fraguado.

Sin embargo, con mayores aumentos (Fig. 2.120 *c y d*) se puede apreciar la formación abundante de tobermorita (*Tb*) a partir de la cristalización incipiente de los geles (*G*) precursores de este mineral (*TbG*). A pesar de la cristalización masiva de los silicatos cálcicos (*Tb*), se conservan aún los intersticios o espacios (*EiG*) que se propagan por toda la matriz.

Fig. 2.120 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (*R*) en un 20%

Algunos cristales de tobermorita se han desarrollado de forma anómala, destacando entre las especies cristalinas de menor tamaño (Fig. 2.120*d*). Son individuos de hábito idiomórfico bien definido.

La presencia de tobermorita es un indicativo de resistencias mecánicas apreciables. La Fig. 2.121 (*a, b y c*) muestra una partícula de ceniza (*R*), con aumento creciente, que ha reaccionado con la matriz.

Es posible observar que como consecuencia de esta reacción han cristalizado individuos cristalinos de tobermorita (*Tb*) en los espacios libres de las fisuras (*F*) haciendo más compacta la matriz.

En la superficie del fragmento de residuo (Fig. 2.121 *b* y *c*), y prácticamente en todo el campo visual, se desarrolla gel (*G*) de tobermorita, que coincide con aquellos puntos donde aún persiste el proceso de hidratación. En la Fig. 2.121c son visibles los abundantes entrecrecimientos de tobermorita en las fisuras de la partícula de ceniza (*R*).

Fig. 2.121 (*a*, *b* y *c*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (*R*) en un 20%

A primera vista, no parece haber una diferencia notable en el fraguado de la pasta de mortero en la cual se ha incrementado la sustitución de árido natural (*A*) por ceniza (*R*) desde el 20 al 30%, de acuerdo con lo observado en la Fig. 2.122 (*a* y *b*).

Fig. 2.122 (a y b): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en un 30%

Parece evidente que las interfases árido-pasta (IA-P) han reaccionado normalmente, aunque no completamente, ya que los límites de las mismas no muestran la fusión típica, lo cual puede haber sido causado por las tensiones de los ensayos a compresión que han provocado la remoción de algunos áridos, dejando cavidades vacías (Cv), así como el desmembramiento periférico de la pasta alrededor de dichos granos, como se muestra en la Fig. 2.122 (a y b). Puede deberse también a que el exceso de ceniza en la mezcla haya ralentizado notablemente el proceso de fraguado y la respectiva cristalización de los minerales de neoformación, responsables de la compactación y coherencia final de la pasta. La presencia de belita (B), así como la pobre proliferación de etringita (Et) y portlandita (Pt) son testimonios que consignan lo expresado.

2.3.10

Microscopía Óptica de Polarización (MOP)

Lugar de ensayo

- Escuela Politécnica de Cuenca (UCLM).
- Laboratorio Centralizado (Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca-España).

Fundamentos del método

La Microscopía Óptica de Polarización (MOP) es un método de análisis que permite conocer que ocurre cuando la luz interacciona con la materia cristalina. Parte de la luz que incide sobre un material se refleja y otra parte se refracta, produciéndose los fenómenos de reflexión y refracción respectivamente. Mediante el microscopio petrográfico de polarización de luz transmitida, la fuente de luz incide sobre los materiales y los atraviesa. Para ello es fundamental que los minerales sean transparentes. Por esta razón se utilizan secciones o láminas delgadas de las muestras (0,03 mm). El estudio de las láminas delgadas permite determinar aspectos composicionales, texturales así como las posibles alteraciones físico-químicas (Pérez-Montserrat, 2012).

El fundamento del método consiste en la polarización de la luz, es decir que la luz vibre en una única dirección. Por esta razón en los microscopios petrográficos se utilizan filtros (polarizador y analizador, también conocidos como nícoles) que sólo dejan pasar la luz en una única dirección (Fig. 2.123). Sin el analizador la muestra se examina con luz polarizada plana (nícoles paralelos) y con el analizador se observa con polarizadores cruzados (nícoles cruzados) (Perkins et al., 2002).

Fig. 2.123 Polarización de la luz con polarizador y analizador (nícoles)

Por un lado, los minerales isótropos no desdoblan la luz en su interior y por tanto al cruzar nicoles la dirección de vibración es anulada por el analizador (visión oscura). Por otro lado, los minerales opacos se observan de igual modo con nicoles paralelos y cruzados, siendo necesarias técnicas de luz reflejada para su análisis. El vidrio o material amorfo se comporta como un mineral isótropo, con nicoles paralelos según su morfología (poros, fisuras) y con nicoles cruzados la morfología se encuentra completamente oscura. Un aspecto interesante es la porosidad del material que se corresponderá con zonas huecas, observándose directamente sobre el porta vidrio.

Preparación de las muestras

Se analizaron un total de 7 láminas delgadas, cuyos datos figuran en la Tabla 2.33.

Tabla 2.33. Relación de muestras analizadas mediante microscopía óptica de polarización (MOP)

Muestra	% de sustitución
Mortero	Mortero de referencia
Mortero	10 (ceniza)
Mortero	20 (ceniza)
Mortero	30 (ceniza)
Mortero	10 (cáscara de almendra)
Mortero	20 (cáscara de almendra)
Mortero	30 (cáscara de almendra)

La preparación de las láminas delgadas fue llevada a cabo por el Laboratorio Centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid. Se obtuvieron tacos de (4x2x2 cm) de cada uno de morteros realizados a >28 días. Se realizó un desbastado de una de las caras para su colocación con resina epoxi en un porta vidrio. El taco se fue cortando a distintos tamaños y se realizaron pulimientos hasta un grosor de 0,03 mm. Cada una de las láminas fue teñida por su parte media con tinción de alizarina que tiñe de un rojo intenso el carbonato cálcico. Para el análisis de las muestras se empleó el microscopio de luz polarizada KYOWA modelo KLP-2N (Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha) (Cuenca) (Fig. 2.124).

Fig. 2.124 Microscopio petrográfico de luz polarizada Kyowa modelo KLP-2N

El microscopio petrográfico se utiliza para examinar e identificar los minerales transparentes y translúcidos en sección delgada, basándose en sus propiedades ópticas, y texturales. El microscopio petrográfico tiene los dispositivos ópticos de cualquier otro microscopio (fuente de iluminación, objetivos y oculares) que sirven para aumentar el tamaño de la imagen. Su particularidad es que utiliza luz polarizada, que es aquella que vibra en un solo plano, a diferencia de la luz ordinaria o blanca que vibra en todas las direcciones alrededor de la línea de propagación (Fig. 2.125).

Fig. 2.125 Sección de un microscopio polarizante de investigación y esquema de la trayectoria de la luz
Fuente: Franco, M. P., & Gonzalo, J. C. (2000)

Las imágenes más representativas de las láminas delgadas de los morteros para las diferentes dosificaciones se obtuvieron mediante los softwares de tratamiento digital de imágenes Optical View y ArcGIS del grupo ESRI.

Resultados

En este apartado sólo se recogen los resultados obtenidos de la caracterización de los morteros a través de las microfotografías realizadas con el microscopio de luz polarizada a 10 y 25 aumentos. No se pudieron analizar por separado ni los residuos orgánicos tipo ROCA en estado natural, ni el árido ni el hormigón, ya que por su propia naturaleza era imposible obtener secciones delgadas representativas.

En primer lugar se analizan las microfotografías del mortero patrón a > 28 días formado por CEM I 42.5 R, árido normalizado CEN y agua (Fig. 2.126).

Fig. 2.126 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero normalizado formado por cemento CEM I 42,5 R y árido normalizado CEN. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nicols paralelos y a-d con nicols cruzados. A: Árido natural, Ps: Pasta, Pt: portlandita

En estas fotografías destaca el árido, compuesto por granos de cuarzo. Es fácilmente reconocible por diversos factores como: a) su relieve, b) porque no presenta pleocroísmo y c) por sus colores de interferencia grises y blancos altos llegando a la extinción al girar la pletina. Texturalmente aparece redondeado a subredondeado, uniforme y compacto, en ocasiones fracturado con pequeñas oquedades.

Entre los granos de cuarzo aparece una pasta isotrópica de silicatos cálcicos que incluyen en colores amarillentos, cristales dispersos de portlandita (hidróxido de calcio). No aparecen granos de cemento no hidratados. Respecto a la porosidad ésta no puede ser fácilmente detectada y puede ser confundida con elementos de la pasta (Fig. 2.126). No obstante mediante la caracterización mediante la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) donde la resolución llega a 1 μ , es más fácilmente detectable (véase el análisis y discusión de resultados expuestos en anterior ensayo).

Las microfotografías de las Figs. 2.127; 2.128 y 2.129) permiten observar los diferentes morteros realizados con sustitución del árido normalizado CEN por fragmentos de residuos (*R*). Estas fotografías se presentan a distintos aumentos (10x y 25x) y bajo nícoles paralelos y cruzados.

En la secuencia de fotografías se puede observar un aumento de los fragmentos de (*R*) reaccionando con la pasta (*Ps*). También se aprecian cristales de portlandita (*Pt*) dispersos dentro de la pasta, estos cristales presentan pleocroísmo dando colores anaranjados bajo nícoles cruzados.

Al igual que en el mortero de referencia (patrón) no se observa fácilmente la porosidad. Sin embargo, sí se observan los fragmentos de (*R*), donde se aprecia entre la secuencias de fibras del residuo orgánico pequeñas oquedades o poros (*P*) que producen un aumento considerable de la porosidad en cada uno de los morteros analizados. Gran parte de esta porosidad se considera porosidad cerrada que como más adelante se analiza aligera en gran medida los morteros estudiados.

Fig. 2.127 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 10%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nículos paralelos y a-d con nículos cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos

En la Fig. 2.128 se puede apreciar un fragmento de (*R*) aislado de forma redondeada rodeado completamente por la pasta cementicia (*Ps*) donde no se puede distinguir más que pequeños cristales de (*Pt*). Aproximadamente un 30% de los fragmentos de residuo están formados por vacíos o poros (*P*) con un tamaño que oscila entre 1 y 10^{-3} mm.

Fig. 2.128 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 20%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos

La Fig. 2.129 muestra un aumento considerable de los fragmentos de *R* que en ocasiones pueden llegar a ponerse en contacto. Al igual que en las microfotografías anteriores se puede distinguir: a) el árido natural redondeado o subredondeado, b) la pasta cementicia donde es difícil diferenciar la secuencia de mineralización que se produce durante el fraguado, c) pequeños cristales idiomorfos de portlandita con hábitos variables tabulares, prismáticos y aciculares, y d) fragmentos de residuos orgánicos rodeados con una aureola por la pasta donde lo más destacado es la presencia de porosidad cerrada entre las fibras de dicho fragmento.

Fig. 2.129 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 30%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos

Las microfotografías de las Figs. 2.130; 2.131; 2.132 permiten observar los diferentes morteros realizados con sustitución de cemento CEM I 42.5 R por ceniza de cáscara de almendra (C). Estas fotografías se presentan a distintos aumentos (10x y 25x) y bajo nícoles paralelos y cruzados. En la secuencia de fotografías se puede observar que la pasta (*Ps*) parece menos compacta, mostrando una textura algo terrosa, poco cristalina y con desarrollo incipiente de geles. Las partículas de cenizas muestran una lenta reactividad con la pasta, aunque el proceso es normal. También se observa claramente el aumento de las pequeñas partículas de ceniza (*R*) con la pasta, integrándose lentamente en la interfase. Continúan apreciándose cristales de portlandita (*Pt*) dispersos dentro de la pasta, estos cristales presentan pleocroísmo dando colores anaranjados bajo nícoles cruzados. Al igual que en el mortero de referencia (patrón) no se observa fácilmente la porosidad.

Fig. 2.130 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en proporción del 10%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita

En las Figs. 2.131 y 2.132 se observan los aspectos comentados en la Fig. 2.130, pero con un aumento considerable del número de partículas de ceniza de residuos orgánicos. Este exceso de ceniza en la mezcla puede ralentizar el proceso de fraguado y la respectiva cristalización de los minerales de neoformación, responsables de la compactación y coherencia final de la pasta. Tal y como se observa en los trabajos de Hill y Sharp (2002) y Binici et al., (2008) entre otros, sería conveniente determinar la fase amorfa del cemento portland en contacto con los dos tipos de residuos (R) y (C) y sobretodo la variación en el tiempo a largo plazo. En este sentido se recomienda realizar nuevas láminas de los diferentes morteros a 1 y 2 años para la determinación de las fases que se encuentran los geles C-S-H, ya que estos son los principales agentes que intervienen en las resistencias mecánicas.

Fig. 2.131 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (*R*) en proporción del 20%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nicoles paralelos y a-d con nicoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita

Fig. 2.132 (*a, b, c y d*): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (*R*) en proporción del 30%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita

Capítulo 3

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES

Capítulo 3. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES

El presente capítulo consiste en la evaluación experimental de distintas propiedades que caracterizan el comportamiento de hormigones con la adición de ROCA tanto a lo que se refiere a su estado fresco como su estado endurecido.

En este contexto, se ha planteado la influencia en la incorporación de los ROCA en sustitución parcial del árido patrón. En este sentido se analizan las propiedades de hormigones con distintos porcentajes de estos residuos orgánicos. Una vez analizados los resultados se pretende acotar el porcentaje óptimo de estas adiciones.

Para la valoración de los ROCA como agregados en la elaboración de hormigones se establece en este capítulo del trabajo realizar una previa caracterización de los componentes básicos de los morteros: cemento, áridos y agua y los de objeto de estudio: ROCA. Una vez completada esa primera etapa de caracterización se desarrolla la correspondiente campaña experimental tomando como referencia trabajos previos realizados con residuos de naturaleza agroindustrial para su posterior aplicación en la fabricación de materiales de construcción.

Con dicha campaña se establecen las características físicas, químicas y mecánicas de los ROCA empleados, así como de los materiales donde los mismos son incorporados formando parte integrante de la mezcla, para la fabricación de hormigones. Para ello se realizan dosificaciones preliminares con la preparación de diversas probetas, evaluando diferentes parámetros físicos y mecánicos. La normativa específica utilizada para la realización de los ensayos fue la UNE actualmente vigente.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES BÁSICOS UTILIZADOS

3.1.1 CEMENTO

El cemento utilizado en el presente trabajo de investigación es el mismo que en el caso de los morteros, del tipo CEM I 42,5 R (corresponde a un cemento de clase resistente 42,5 y alta resistencia inicial¹), el cual ha sido proporcionado por la empresa Grupo Cementos Portland Valderrivas (GCPV) procedente de la fábrica El Alto, localizada en el término municipal de Morata de Tajuña (Madrid). El cemento fue suministrado a granel a través de recipientes de material inerte, cerrados herméticamente y llenos por completo. Cada envase tenía cantidad suficiente para realizar una serie completa de ensayos. Durante la etapa experimental el cemento se almacenó aislado de cualquier fuente de humedad lo que hizo que se mantuvieran las condiciones óptimas para su uso.

El criterio de selección de dicha categoría de cemento se ha fundamentado en su composición, la cual se caracteriza por presentar un contenido en clinker igual o superior al 95%, pudiendo incorporar hasta un 5% de otros componentes adicionales. Esto significa que al estar libre de cualquier tipo de adiciones (puzolanas, cenizas volantes o escorias) se evitan posibles reacciones con la incorporación de los ROCA.

Su caracterización ha quedado descrita en el capítulo anterior (Cap. 2, epígrafe 2.1.1)

3.1.2 AGUA PARA HORMIGONES

Dada la valoración que se quiere hacer sobre la incorporación de los ROCA en la mezcla es por lo que en este trabajo se ha procedido de forma similar que en el caso de los morteros, utilizando para la preparación de las diferentes probetas de hormigones, agua desionizada, empleando para ello como equipo, el depósito de almacenamiento

¹ INSTRUCCIÓN PARA LA RECEPCIÓN DE CEMENTOS (RC-08). Real Decreto 956/2008 de 06 de Junio. Consolidada incluso rectificaciones de BOE11/09/2008.

de agua purificada de polietileno de 100 litros, marca Merck MILLIPORE modelo TANKPE100 existente en el Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE) de la Escuela Politécnica de Cuenca. El agua de alimentación de tal depósito proviene de la red pública de abastecimiento de la ciudad de Cuenca (España).

3.1.3 ÁRIDOS PARA HORMIGONES

A efectos de este trabajo, los áridos naturales utilizados fueron suministrados por la empresa Materiales de Construcción PEPE, S.L., situada en la ciudad de Cuenca (Travesía Avda. Cruz Roja Española, s/n) cuyo centro de producción se encuentra localizado en el paraje conocido como “Cerro La Viña”, parcela 1006 del Polígono 504-CN 420 P.F. 409.16122 de la población de Valdeganga (Cuenca-España). El árido suministrado cumple las disposiciones de la norma UNE-EN 12620:2002+A1:2008 *Áridos para hormigón*. En el ANEXO 3 de este documento se recogen las certificaciones expedidas por AENOR² para los diferentes tamaños de áridos (AF-R-0/4-S-L; AG-M-4/12-C-L; AG-M-10/22-C-L).

El suministro del árido corresponde a una mezcla de las diferentes granulometrías, contenidas en un saco Big Bag de $\pm 1 \text{ m}^3$ para ser posteriormente trasvasadas cantidades a sacos de polipropileno que han permitido mantener en óptimas condiciones el producto y además constituyeron suficiente protección para el contenido, evitando contaminaciones por polvo en las normales condiciones de manipulación, transporte y distribución del producto dentro del laboratorio (Fig. 3.1).

² AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación.

Fig. 3.1 Almacenamiento de la mezcla de áridos en sacos de polipropileno

La naturaleza de dichos áridos naturales es la siguiente (Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Naturaleza de los áridos suministrados para ensayos

Fracción granulométrica (mm)	Tipología
0/4	árido silíceo, rodado y lavado
4/12	árido mezcla de silíceo y calizo, machacado y lavado
12/16	árido mezcla de silíceo y calizo, machacado y lavado

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En línea de lo expresado al inicio del capítulo, la valoración de los ROCA como agregados en la fabricación de hormigones precisa de su caracterización físico-química. Ello permite interpretar los resultados obtenidos de los ensayos realizados cuando dichos residuos orgánicos son incorporados como sustitución parcial del árido natural en diferentes porcentajes en peso en la dosificación (10, 20 y 30%). En la campaña experimental se establecen las características físicas, químicas y mecánicas de los ROCA empleados, así como de los materiales donde los mismos son incorporados formando parte integrante de la mezcla, para la fabricación de hormigones.

3.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS ROCA

Los residuos ROCA son proporcionados por la empresa Almendras de la Mancha, S.A. ubicada en el polígono industrial San Rafael de la población de Hellín (Albacete). En la planta de tratamiento se producen diariamente entre 300 a 350 t de cáscara de almendra como resultado del proceso de descascarado, el cual ha sido explicado en el Capítulo 2, epígrafe 2.2.1. Dicha empresa posee la certificación ISO 22000³.

Dichos residuos con los tamaños resultantes del proceso de descascarado son los que se han empleado en diferentes porcentajes de sustitución, 10, 20 y 30% en peso del árido natural en el proceso de dosificación para fabricación de las diferentes probetas de hormigón que han sido sometidas a ensayos.

³ UNE-EN ISO 22000:2005 Sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos.

MAPA CONCEPTUAL 1. HORMIGONES. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

MAPA CONCEPTUAL 2. HORMIGONES. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.2.1.1 Caracterización física

En este apartado se describen los ensayos realizados en el Laboratorio de Calidad de la Edificación (LACAE) de la Escuela Politécnica de Cuenca (UCLM). En cada ensayo se describe:

Objeto y campo de aplicación
Principio del método
Equipo utilizado
Preparación de las porciones de ensayo
Procedimiento operatorio
Cálculo y expresión de los resultados

LISTADO DE ENSAYOS

UNE-EN 933-1:2012

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

UNE-EN 933-3:2012

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

UNE-EN 933-4:2008

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.

UNE-EN 1097-2:2010

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

UNE-EN 1097-3:1999

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

UNE-EN 1097-5:2009

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa.

UNE-EN 1097-6:2014

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

UNE-EN 1936:2007

Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea describe el método de lavado y tamizado en vía seca, utilizado en los ensayos tipo y en caso de litigio, para la determinación de la granulometría de los áridos. Se aplica a todos los áridos, incluidos los áridos ligeros, con una dimensión nominal de hasta 90 mm, excluyendo los fillers.

Principio del método:

El ensayo consiste en dividir y separar un material, mediante una serie de tamices, en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Los tamaños de abertura y el número de tamices se seleccionan según la naturaleza de la muestra y según la exactitud requerida.

El método adoptado consiste en el lavado del árido y su posterior tamizado en vía seca. Cuando el lavado pueda alterar algunas propiedades físicas de los áridos ligeros, se debe utilizar el tamizado en vía seca.

La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresa respecto a la masa inicial del material. Los porcentajes acumulados que pasan por cada tamiz se registran en forma numérica y, si fuese necesario, en forma gráfica.

Equipo utilizado:

Tamices de ensayo:

con abertura como se especifica en la Norma UNE EN 933-2⁴. Los tamices de ensayo con aberturas de tamaño superior o igual a 4mm deben ser de chapa perforada con agujeros cuadrados de acuerdo con la ISO 3310-2, mientras que los tamices de ensayo con aberturas de tamaño inferior a 4 mm deben ser de tela metálica trenzada de acuerdo con la ISO 3310-1.

Tapa y fondo herméticos, para los tamices.

Armario de desecación:

⁴ UNE-EN 933-2:1996 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Equipo de lavado.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Cepillos.

Preparación de las porciones de ensayo:

El tamaño de cada porción de ensayo debe ser como se especifica en la Tabla 3.2 (Tabla 1 de la Norma UNE-EN 933-1:2012).

Tabla 3.2 Tamaño mínimo de las muestras de ensayo

Tamaño del árido D (máximo) mm	Masa del árido (kg)	Volumen de áridos ligeros (litros)
90	80	--
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Se seca la porción de ensayo a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Después, se deja enfriar, se pesa y se registra su masa como M_1 (Fig. 3.2).

Fig. 3.2 Preparación de las porciones de ensayo

Procedimiento operatorio:

Lavado

Se coloca la porción de ensayo en un recipiente y se añade agua suficiente hasta cubrirla. A continuación se agita la muestra con fuerza suficiente para obtener la completa separación y suspensión de los finos. Se mojan ambos lados de un tamiz de 0,063 mm, reservado utilizarse exclusivamente en este ensayo, y se coloca encima de él un tamiz de guarda (por ejemplo, de 1 mm o 2 mm). Se instalan los tamices de forma que la suspensión tamizada pueda desecharse o, cuando se requiera, recogerse en un recipiente adecuado. Se vierte el contenido del recipiente en el tamiz superior. Se continúa el lavado hasta que el agua que fluya por el tamiz de ensayo de 0,063 mm sea clara. Se seca el residuo retenido por el tamiz de 0,063 mm a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Se deja enfriar, se pesa y se registra su masa como M_2 (Fig. 3.3).

Fig. 3.3 Lavado de las porciones de ensayo

Tamizado

Se vierte el material lavado y seco en la columna de tamizado. La columna está formada por cierta cantidad de tamices ensamblados y dispuestos, de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, con el fondo y la tapa. La experiencia ha demostrado que el lavado no elimina necesariamente todos los finos. Por lo tanto, es necesario incorporar un tamiz de ensayo de 0,063 mm en la serie.

Se agita la columna, manual o mecánicamente. A continuación se retiran los tamices uno a uno, comenzando con el de mayor tamaño de abertura. Se agita cada tamiz

manualmente asegurando que no se pierde ningún material utilizando, por ejemplo, un fondo y una tapa. Todo el material que pasa por cada tamiz se transfiere al siguiente tamiz de la columna antes de continuar la operación con ese tamiz. Debe evitarse la sobrecarga del tamiz (Fig. 3.4).

Fig. 3.4 Tamizado de las porciones de ensayo

Pesada

Se pesa el material retenido por el tamiz de mayor tamaño de abertura y se registra su masa como R_1 . Se realiza la misma operación para el tamiz que se encuentre inmediatamente debajo y se registra la masa retenida como R_2 . Se continúa con la misma operación para todos los tamices de la columna, con objeto de obtener las masas de las diferentes fracciones de material retenido y se registran dichas masas como R_3 , R_4 , R_i , R_n . Se pesa el material tamizado, si lo hubiere, que quede en la bandeja del fondo y se registra su masa como P (Fig. 3.5).

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.4.1 *Condiciones granulométricas del árido fino total*: la cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 mm, expresada en porcentaje del peso de la muestra de árido grueso total, no excederá del 1,5%.

Fig. 3.5 Pesado de las porciones de ensayo tamizadas

Cálculo y expresión de los resultados:

Cálculo

Se registran las diferentes masas. Se calcula la masa retenida en cada tamiz como porcentaje de la masa seca original M_1 . Se calcula el porcentaje acumulado de la masa seca original que pasa por cada tamiz, hasta el tamiz de 0,063 mm, excluido.

Se calcula el porcentajes de finos f que pasan por el tamiz de 0,063 mm de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

donde

M_1 es la masa seca de la porción de ensayo en kg

M_2 es la masa seca del residuo retenido en el tamiz de 0,063 mm, en kg

P es la masa de material tamizado que queda en la bandeja, en kg

Para el tamizado en vía seca,

$$f = \frac{100 P}{M_1}$$

Validación de los resultados

El ensayo debe repetirse si la suma de las masas R_1 y P difiere en más del 1% de la masa M_2 .

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica el método de referencia, usado en ensayos de tipo y en caso de conflicto, para la determinación del índice de lajas. Esta norma se aplica a áridos naturales, artificiales o reciclados. Especifica un procedimiento de ensayo que no es aplicable a los tamaños de partícula menores de 4 mm o mayores de 100 mm.

Principio del método:

El ensayo consiste en dos operaciones de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices se divide la muestra en distintas fracciones granulométricas d_i/D_i :

Fracción granulométrica d_i/D_i (mm)						
80/100	63/80	50/63	40/50	31,5/40	25/31,5	20/25
Anchura de la ranura del tamiz de barras (mm)						
$50 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$	$31,5 \pm 0,5$	$25 \pm 0,4$	$20 \pm 0,4$	$16 \pm 0,4$	$12,5 \pm 0,4$
Fracción granulométrica d_i/D_i (mm)						
16/20	12,5/16	10/12,5	8/10	6,3/8	5/6,3	4/5
Anchura de la ranura del tamiz de barras (mm)						
$10 \pm 0,2$	$8 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$	$4 \pm 0,15$	$3,15 \pm 0,15$	$2,5 \pm 0,15$

Cada una de las fracciones granulométricas d_i/D_i se criba a continuación empleando para ello tamices de barras paralelas y separadas $D_i/2$.

El índice de lajas global se calcula a partir de la masa total de las partículas que pasan por los tamices de barras expresado como porcentaje del total de la masa seca de las partículas sometidas a ensayo. Si es necesario, se calcula el índice de lajas para cada fracción granulométrica d_i/D_i como la masa de las partículas que pasan por su correspondiente tamiz de barras, expresado como porcentaje de la masa de esa fracción granulométrica.

Equipo utilizado:

Tamices de ensayo:

de aberturas cuadradas, conforme con la Norma EN 933-2 y con los siguientes tamaños de abertura (mm):

100	80	63	50	40	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4
-----	----	----	----	----	------	----	----	----	------	----	---	-----	---	---

Tamices de barras:

Formados por barras cilíndricas paralelas de acuerdo con los requisitos de anchuras de las ranuras indicadas anteriormente. Las tolerancias para las mismas deben aplicarse a toda la longitud de las mismas.

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Preparación de las porciones de ensayo:

Las muestras se deben reducir de acuerdo con la Norma EN 932-2⁵. La masa de la porción de ensayo debe ser como se especifica en la Norma EN 933-1. Se seca la porción de ensayo a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Después, se deja enfriar, se pesa y su masa se registra como M_0 .

Procedimiento operatorio (Fig. 3.6):

Tamizado con los tamices de ensayo

La porción de ensayo se tamiza de acuerdo con la Norma 933-1 utilizando el rango de tamices apropiado. Se pesan y descartan todas las partículas que pasen por el tamiz de 4 mm y las que sean retenidas por el tamiz de 100 mm. Se pesan y conservan por separado todas las partículas de cada fracción granulométrica d_i/D_i .

Cribado con tamices de barras

Se criba cada fracción granulométrica d_i/D_i obtenida en la operación anterior con los correspondientes tamices de barras ya indicados. Este cribado se puede realizar de forma manual o mecánica, y debe garantizar una total separación. Se pesa el material de cada fracción granulométrica que pasa por el tamiz de barras correspondiente.

⁵ UNE-EN 932-2:1999 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio.

Fig. 3.6 Tamizado con tamices de ensayo. Cribado con tamices de barras.
Pesado de las fracciones granulométricas

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i y se registra como M_1 . Se calcula la suma de las masas de las partículas de las fracciones granulométricas d_i/D_i que pasan por los tamices de barras correspondientes con una anchura de las ranuras $D_i/2$ y se registra como M_2 .

El índice de lajas global IL se calcula con la siguiente ecuación:

$$IL = \left(M_2 / M_1 \right) \times 100$$

donde

M_1 es la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i en gramos;

M_2 es la suma de las masas de las partículas que pasan por los tamices de barras de anchura $D_i/2$ correspondientes a cada fracción granulométrica, en gramos.

El índice de lajas global (IL) se debe registrar redondeando al número entero más próximo. El índice de lajas para cada fracción granulométrica IL_i se debe calcular, cuando sea necesario, con la siguiente ecuación:

$$IL_i = \left(m_i / R_i \right) \times 100$$

donde

R_i es la masa de cada fracción granulométrica d_i/D_i , en gramos;

M_i es la masa del material de cada fracción granulométrica d_i/D_i que pasa a través del tamiz de barras correspondiente de anchura $D_i/2$ en gramos.

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia utilizado para el ensayo tipo y, en caso de litigio, para la determinación del coeficiente de forma de los áridos gruesos. El método de ensayo especificado en esta norma europea es aplicable a las fracciones granulométricas d_i/D_i , donde $D_i \leq 63$ mm y $d_i \geq 4$ mm.

Principio del método:

Las partículas individuales de una muestra de árido grueso se clasifican según la relación entre su longitud L y su espesor E , utilizando un pie de rey si es necesario. Se calcula el coeficiente de forma como la masa de las partículas con una relación dimensional L/E superior a tres, expresada como porcentaje de la masa seca total de las partículas ensayadas.

Equipo utilizado:

Pie de rey

Tamices de ensayo:

con un tamaño nominal de las aberturas como se especifica en la Norma UNE EN 933-2.

Tapa y fondo herméticos, para los tamices.

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Preparación de la muestra de ensayo:

Debe reducirse la muestra de acuerdo con los requisitos de la Norma EN 932-2. La muestra se seca a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta alcanzar la masa constante. Se tamiza empleando los tamices de ensayo adecuados, agitando con la energía suficiente como para asegurar la separación completa de las partículas mayores de 4 mm.

Se rechazan las partículas retenidas por el tamiz de ensayo de 63 mm y las que hayan pasado por el tamiz de ensayo de 4 mm. Si es necesario, se procede a una reducción posterior de la muestra de acuerdo con la Norma EN 932-2 para producir una muestra de ensayo. Se anota la masa de la muestra de ensayo como M_0 . La masa de la muestra de ensayo debe ser como se especifica:

Tamaño superior del árido D (mm)			
63	32	16	8
Masa de la muestra de ensayo (mínima) (kg)			
45	6	1	0,1

Procedimiento operatorio (Fig. 3.7):

El ensayo debe realizarse para cada fracción granulométrica d_i/D_i con $D_i \leq 2d_i$.

Muestras de ensayo con $D \leq 2d$

Se separa de la muestra de ensayo la fracción granulométrica d_i/D_i con $D_i \leq 2d_i$, mediante tamizado de acuerdo con la Norma EN 933-1. Las partículas menores que d_i o mayores que D_i se rechazan. Se anota la fracción granulométrica d_i/D_i , que se ensaya, y se anota la masa de la fracción granulométrica d_i/D_i , como M_1 . Se evalúa la longitud L y el espesor E de cada partícula utilizando, cuando sea necesario, un pie de rey y se apartan aquellas partículas que tengan una relación dimensional $L/E > 3$. Estas partículas se clasifican como no cúbicas. Se pesan las partículas no cúbicas y se anota su masa como M_2 .

Fig. 3.7 Procedimiento operatorio. Determinación de la forma de las partículas

Cálculo y expresión de los resultados:

Muestras de ensayo con $D \leq 2d$

Se calcula el coeficiente de forma (SI) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$SI = (M_2/M_1) \times 100$$

donde

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

M_2 es la masa de las partículas no cúbicas, en gramos.

Se anota el coeficiente de forma redondeando al número entero más próximo.

UNE-EN 1097-2:2010

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea describe el método de referencia, el ensayo de Los Ángeles, empleado en los ensayos de tipo para la determinación de la resistencia a la fragmentación de los áridos gruesos. Esta norma europea se aplica a los áridos naturales, prefabricados o reciclados utilizados en aplicaciones de edificación y obra civil.

Principio del método:

Se voltea una muestra del árido en el interior de un tambor giratorio junto con las bolas de acero. Tras el volteo, se determina la cantidad de material retenido por el tamiz de 1,6 mm.

Equipo utilizado:

Cuarteador

Tamices de ensayo:

conformes con la Norma UNE EN 933-2, con los siguientes tamaños de abertura:

Ensayo Los Ángeles. Tamaño de abertura (mm) de los tamices de ensayo			
1,6	10	11,2 (o 12,5)	14

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Máquina para el ensayo de Los Ángeles

Preparación de la porción de ensayo (Fig. 3.8):

La masa de la muestra enviada al laboratorio debe ser, al menos, de 15 kg, con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm. El ensayo se debe realizar con el árido que pase por el tamiz de 14 mm y que quede retenido en el tamiz de 10 mm. Además, la curva granulométrica de la porción de ensayo debe cumplir uno de los requisitos siguientes:

- a) entre el 60% y el 70% del árido pasa por el tamiz de 12,5 mm; o,
- b) entre el 30% y el 40% del árido pasa por el tamiz de 11,2 mm.

Se tamiza la muestra de laboratorio empleando los tamices de ensayo de 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm) y 14 mm para obtener fracciones granulométricas separadas en los intervalos de 10 mm a 11,2 mm (o 12,5 mm) y de 11,2 mm (o 12,5 mm) a 14 mm. Se lava cada fracción por separado, tal como establece la Norma EN 933-1, y se secan hasta obtener una masa constante. Se dejan enfriar las fracciones granulométricas a temperatura ambiente. Se mezclan las dos fracciones para obtener una muestra modificada de laboratorio con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm que cumpla con los requisitos granulométricos pertinentes citados anteriormente. Se reduce la muestra modificada de laboratorio obtenida tras la mezcla de fracciones granulométricas hasta conseguir una porción de ensayo según se establece en la Norma EN 932-2. La porción de ensayo debe tener una masa de (5.000 ± 5) g.

Fig. 3.8 Preparación de la porción de ensayo

Procedimiento operatorio:

Se comprueba que el tambor esté limpio antes de introducir la muestra. Se colocan cuidadosamente las bolas en la máquina y, a continuación, se introduce la porción de ensayo. Se vuelve a colocar la cubierta en su posición y se hace girar la máquina durante 500 vueltas a una velocidad constante comprendida entre 31 r/min y 33 r/min. Se vierte el árido sobre una bandeja dispuesta debajo del equipo teniendo la precaución de que la abertura esté justo encima de la bandeja para evitar la pérdida de material. Se limpia el tambor, extrayendo todos los finos, y prestando especial atención a las zonas próximas a la placa saliente. Se retira con cuidado la carga abrasiva de la bandeja, evitando perder partículas de árido (Fig. 3.9).

Se analiza el material de la bandeja según establece la Norma EN 933-1, lavando y tamizando con un tamiz de 1,6 mm. Se seca la parte retenida en el tamiz de 1,6 mm a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, hasta obtener una masa constante (Fig. 3.10).

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos*: Resistencia a la fragmentación del árido grueso determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-2 (ensayo de Los Ángeles) será ≤ 40 .

Fig. 3.9 Máquina de Los Ángeles. Introducción de la muestra y vertido del árido sobre la bandeja

Fig. 3.10 Tamizado del material de la bandeja con un tamiz de 1,6 mm. Pesado de la parte seca retenida

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula el coeficiente de Los Ángeles, LA , a partir de la siguiente expresión:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

donde

m es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos.

Se registra el resultado redondeando al número entero más próximo.

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica el procedimiento operatorio para la determinación de la densidad aparente del árido seco y para el cálculo de los huecos. El ensayo es de aplicación para los áridos naturales y artificiales con un tamaño máximo de 63 mm.

Principio del método:

Pesar la masa en seco del árido con el que se ha llenado un recipiente determinado y calcular la correspondiente densidad aparente. El porcentaje de huecos se calcula a partir de la densidad aparente y de la densidad de partículas.

Equipo utilizado:

Recipiente cilíndrico estanco. El LACAE no dispone de este tipo de equipo. En su lugar se utilizó una probeta cilíndrica de Ø150 mm x 300 mm que cumple con las especificaciones que exige la norma (de metal anticorrosión, estanco y una relación entre el diámetro y la altura comprendida entre 0,5 y 0,8).

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la muestra de ensayo.

Regla de acero, con una longitud mínima superior en 50 mm al diámetro exterior del recipiente, y con la rigidez suficiente para no sufrir deformación al nivelar.

Termómetro (para calibración), apto para medir la temperatura del agua a 20°C con una precisión de 0,5°C.

Palas, del tamaño adecuado.

Preparación de las submuestras:

Obtener tres submuestras, según establece el proyecto de norma prEN 932-2. Secar el árido a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante. Cada submuestra deberá tener una masa comprendida entre 120% y 150% de la necesaria para llenar el recipiente (Fig. 3.11).

En el caso de áridos ligeros, cuando proceda, mantener las submuestras en unas condiciones de equilibrio de humedad a $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ y $(50 \pm 10)\%$ de humedad relativa, después del secado a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

Fig. 3.11 Preparación de las submuestras de ensayo

Procedimiento operatorio:

Pesar en seco el recipiente limpio y vacío (m_1). Colocar el recipiente sobre una superficie horizontal y llenarlo con la pala hasta que rebose. Durante la operación de llenado, reducir al mínimo la segregación de partículas apoyando la paleta sobre el borde superior del recipiente. El borde de la paleta no debe estar separado en ningún caso más de 50 mm por encima del borde del recipiente.

Retirar con cuidado cualquier exceso de árido de la parte superior del recipiente, asegurándose de que la superficie extendida está nivelada, para evitar su separación. Nivelar la superficie del árido con la regla de acero, teniendo cuidado de no producir ningún efecto de compactación sobre la superficie superior del árido. Si ello no fuera posible, nivelar la superficie a mano, procurando aproximar lo más posible el volumen del árido introducido con la capacidad del recipiente. Pesar el recipiente una vez lleno y anotar la masa (m_2) redondeada a la fracción 0,1 % más próxima. Se deberá repetir el ensayo con tres submuestras (Fig. 3.12).

Fig. 3.12 Pesado del recipiente vacío y conteniendo la muestra

Cálculo y expresión de los resultados:

Calcular la densidad aparente de cada submuestra, ρ_b , a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

donde

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

m_2 , es la masa del recipiente y de la submuestra, expresada en kilogramos;

m_1 es la masa del recipiente vacío, expresada en kilogramos;

V es el volumen del recipiente, expresado en litros.

Calcular la densidad aparente ρ_b como la media aritmética de los tres valores obtenidos, redondeados a la segunda cifra decimal para los áridos normales, y a la tercera cifra decimal para los áridos ligeros.

El porcentaje de huecos v es la proporción volumétrica de los huecos del recipiente y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$$

donde

v es el porcentaje de huecos;

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

ρ_p es la densidad de partículas tras secado previo o secado en estufa, expresada en megagramos por metro cúbico y determinada según establece el prEN 1097-6, empleando una muestra de ensayo tomada de la misma muestra de laboratorio.

UNE-EN 1097-5:2009

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia utilizado para el ensayo tipo y en caso de litigio para la determinación del contenido en agua de los áridos por secado en una estufa ventilada.

Principio del método:

El método de secado en estufa proporciona una medida del contenido total de agua libre presente en una muestra de ensayo de árido. El agua puede estar presente en la superficie del árido y en los poros accesibles al agua dentro de las partículas de árido. Se pesa una muestra de ensayo y se la introduce en una estufa ventilada de secado a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Por pesadas sucesivas, se determina la masa constante de la muestra de ensayo seca. En todas las etapas de manipulación y preparación del árido antes del inicio del ensayo, se protege la muestra de laboratorio y la muestra de ensayo obtenida para evitar pérdidas o absorción de agua. El contenido en agua se determina como la diferencia entre la masa húmeda y seca de la muestra de ensayo y se expresa como porcentaje respecto de la masa seca de la muestra de ensayo.

Equipo utilizado:

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Recipiente, con la capacidad suficiente para almacenar la muestra de ensayo antes del ensayo. El recipiente debe ser resistente a la corrosión y debe estar cerrado para evitar la pérdida de agua.

Agitador resistente al calor, como por ejemplo, un cuchillo, una espátula o una pala.

Preparación de la muestra de ensayo:

Debe reducirse la muestra de laboratorio como se especifica en la Norma EN 932-2 para producir una muestra de ensayo. Se calcula la masa mínima de la muestra de ensayo a partir del valor del tamaño del tamiz superior (D), en milímetros del siguiente modo:

si $D \geq 1,0$ mm, la masa mínima (en kilogramos) debe ser $0,2 D$;

si $D < 1,0$ mm, la masa mínima debe ser 0,2 kg.

Inmediatamente después de preparar la muestra de ensayo, se coloca la misma en un recipiente limpio y seco a menos que la determinación se lleve a cabo inmediatamente.

Procedimiento operatorio:

Se limpian y secan un número suficiente de bandejas para contener la muestra de ensayo durante el secado. Se pesa y se anota la masa de la(s) bandeja(s) (M_2). Se extiende la muestra de ensayo sobre la(s) bandeja(s). Se pesa(n) la(s) bandeja(s) que contienen la muestra de ensayo húmeda y se determina la masa de la muestra de ensayo (M_1) restando la masa de la(s) bandeja(s) (M_2). Se coloca(n) la(s) bandeja(s) en la estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante. Para establecer si se ha obtenido la masa constante (M_3), se procede como se indica a continuación con cada bandeja:

Se enfría la bandeja a temperatura ambiente. Se determina la masa de la muestra de ensayo (M_{d1}) restando la masa de la bandeja (M_2). Se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa durante al menos 1 h, se saca la bandeja y se deja enfriar a temperatura ambiente, y se repite la determinación de la masa de la muestra de ensayo (M_{di}). Si M_{di} se diferencia de M_{d1} en menos del 0,1%, se asume que se ha alcanzado la masa constante. Si la diferencia es 0,1% o superior, se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa y se repite este procedimiento hasta que la diferencia entre dos determinaciones sucesivas sea inferior al 0,1%. Si se utiliza más de una bandeja, M_3 es la suma de los valores M_{di} . Se anota el valor final de M_{di} como M_3 una vez que se ha alcanzado la masa constante (Fig. 3.13).

Fig. 3.13 Pesado y secado de la muestra hasta obtener masa constante

Cálculo y expresión de los resultados:

El valor del contenido en agua (w) es la masa de agua de la muestra de ensayo expresada como porcentaje respecto de la masa de la muestra de ensayo seca. Se calcula el contenido en agua, w , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

donde

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

M_3 es la masa constante de la muestra de ensayo secada, en gramos.

Se expresa el resultado redondeando al 0,1 % más próximo.

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica los métodos de referencia utilizados para los ensayos tipo y, en caso de litigio, para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua de áridos de peso normal y ligeros. La cáscara de almendra al tener una densidad aparente inferior a $1,8 \text{ kg/m}^3$ se deberá considerar como árido ligero y deberá tener esta consideración a la hora de realizar este ensayo. Debido a esto se utiliza la metodología expuesta en el Anexo C de la presente norma UNE. Este anexo especifica el método de referencia para la determinación de las densidades aparentes de partículas, secada en estufa, saturada y secada superficialmente y la absorción de agua de áridos ligeros. Las densidades de partículas de áridos ligeros se determinan siempre después del pre-secado.

Este método utiliza un picnómetro para determinar las densidades de partículas y la absorción de agua de áridos ligeros, utilizando un tiempo de inmersión de 24 h. El método de la balanza hidrostática no debería utilizarse, ya que no es capaz de eliminar correctamente las burbujas de aire. El método del picnómetro se aplica a partículas de áridos que pasen por el tamiz de ensayo de 31,5 mm y queden retenidas en el tamiz de ensayo de 4 mm. Este método puede utilizarse también sobre partículas de áridos de tamaños menores de 4 mm si es posible secar superficialmente los áridos sin perder partículas.

Principio del método:

La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina por pesada de la porción de ensayo en la condición saturada y secada superficialmente, y de nuevo en la condición secada en estufa. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, tanto por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática como mediante pesadas en el método del picnómetro.

Equipo utilizado:

Tamices de ensayo:

De 0,063 mm, 4 mm, 31,5 mm y 63 mm, con aberturas como se especifica en la Norma UNE EN 933-2.

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Baño de agua, controlado termostáticamente, capaz de mantenerse a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Termómetro, de 0,1 de exactitud.

Paños absorbentes suaves secos

Equipo de lavado

Cronómetro

Picnómetro

Preparación de la probeta de ensayo:

La toma de muestras del árido debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-1 y la reducción debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-2.

Se preparan dos probetas de ensayo. Cada probeta de ensayo debe tener un volumen a granel entre 0,5 l y 0,6 l. Se secan las probetas de ensayo en la estufa a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Se dejan enfriar a temperatura ambiente. Se tamiza la probeta de ensayo sobre los tamices de 31,5 mm y de 4 mm y se descarta cualquier partícula retenida sobre el tamiz de 31,5 mm o que pase por el tamiz de 4 mm. Se pesa la probeta de ensayo resultante, M_4 .

Procedimiento operatorio:

El ensayo debe realizarse utilizando dos probetas de ensayo. Durante el ensayo el baño de agua debe mantenerse a una temperatura de $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Se coloca la primera probeta de ensayo cuidadosamente dentro del picnómetro. Se inserta la rejilla si es necesario. Se llena el picnómetro con agua a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Se pone en marcha el cronómetro el árido se haya empapado con el agua. Se ajusta el embudo al picnómetro y se llena con agua hasta la marca del embudo.

Se agita el árido girando y golpeando cuidadosamente el picnómetro o mediante aplicación cuidadosa de vibración para eliminar el aire atrapado. Se añade agua cuando se necesite durante el ensayo para mantener el nivel de agua en las proximidades de la marca del embudo. Se pesa el picnómetro después de (300 ± 15) s, $M_2(5 \text{ min})$. A continuación se coloca el montaje en el baño de agua a $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$. Se añade agua cuando se necesite durante el ensayo para mantener el nivel de agua en las proximidades de la marca del embudo (Fig. 3.14).

Fig. 3.14 Colocación de picnómetro y probetas en baño de agua. Pesado del picnómetro

Después de unos 55 min, se saca el picnómetro fuera del baño de agua. Se agita el árido girando y golpeando cuidadosamente el picnómetro o mediante aplicación cuidadosa de vibración para eliminar el aire atrapado. Se añade agua como se necesite durante el ensayo para mantener el nivel de agua cercano a la marca del embudo. Se seca el exterior del picnómetro y se pesa después de (60 ± 2) min, $M_2(1 \text{ h})$. La variación de $M_2(f)$ normalmente no es lineal. Por ello, para determinar la curva $M_2(f)$ como una función del tiempo, al menos deberían considerarse tres tiempos de inmersión diferentes.

Después de $(24 \pm 0,5)$ h, se saca el picnómetro fuera del baño de agua. Se agita el árido girando y golpeando cuidadosamente el picnómetro o mediante aplicación cuidadosa de vibración para eliminar el aire atrapado. Se añade agua cuando se necesite durante el ensayo para mantener el nivel de agua en las proximidades la marca del embudo. Se seca el exterior del picnómetro y se pesa, $M_2(24 \text{ h})$. Se vierte el agua del picnómetro. Se transfiere el árido a un paño seco y se retira el agua

superficial girándole con cuidado en el paño durante no más de 15 s. Se pesa el árido, M_1 (24 h). Se repite el procedimiento para la segunda probeta de ensayo (Fig. 3.15).

Fig. 3.15 Pesado del picnómetro con la muestra de ensayo. Secado de la muestra. Pesado de la muestra

Cálculo y expresión de los resultados:

Para cada probeta de ensayo, se calcula la densidad de partículas (ρ_{La} , ρ_{Lrd} o ρ_{Lssd} , como sea apropiado) del árido ligero en megagramos por metro cúbico de acuerdo con la siguiente fórmula:

Densidad aparente de partículas

$$\rho_{La} = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - \{M_2[24 h] - M_3\}}$$

Densidad de partículas secadas en estufa

$$\rho_{Lrd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - [M_2[24 h] - M_3]}$$

Densidad de las partículas saturadas y secadas artificialmente

$$\rho_{Lssd} = \rho_w \frac{M_1[24 h]}{M_1[24 h] - [M_2[24 h] - M_3]}$$

donde

ρ_{La} es la densidad aparente de partículas, en megagramos por metro cúbico;

ρ_{Lrd} es la densidad de partículas secadas en estufa, en megagramos por metro cúbico;

ρ_{Lssd} es la densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente, en megagramos por metro cúbico;

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en megagramos por metro cúbico;

M_1 (24 h) es la masa de los áridos saturados y secados superficialmente, pesada al aire después de 24 h, en gramos;

M_2 (24 h) es la masa del picnómetro, embudo, rejilla, si se utiliza, agua y áridos saturados después de 24 h, en gramos;

M_3 es la masa del picnómetro, embudo, rejilla, si se utiliza, y agua en el calibrado, en gramos;

M_4 es la masa del árido seco, en gramos.

Se calcula el valor medio de los dos valores de densidad individuales después de 24 h.

El valor medio se expresa redondeando al 0,01 Mg/m³ más cercano. Se calcula la absorción de agua después de 24 h, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{L24} = 100 \frac{M_1[24 h] - M_4}{M_4}$$

Se calcula la absorción de agua para dos tiempos intermedios de inmersión $t = 5$ min y $t = 1$ h (y, si es necesario, para otros tiempos de inmersión apropiados) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{Lt} = WA_{L24} - 100 \frac{[M_2[24 h] - M_2[t]]}{M_4}$$

donde

$M_{2(t)}$ es la masa del picnómetro, embudo, rejilla, si se utiliza, agua y áridos saturados en el tiempo t de inmersión, en gramos;

WA_{Lt} es la absorción de agua en un tiempo intermedio t de inmersión, en %;

WA_{L24} es la absorción de agua después de 24 h, en %.

Se calcula el valor medio de dos valores de absorción de agua individuales para el mismo tiempo de inmersión. Se expresa el valor medio redondeando al 1 % más cercano.

UNE-EN 1936:2007

*Métodos de ensayo para piedra natural.
Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica métodos de determinación de la densidad real, de la densidad aparente y de la porosidad abierta y total de la piedra natural. Se aplica su procedimiento operatorio para la determinación de la densidad real de la cáscara de almendra.

Equipo utilizado:

Tamices de ensayo:

Un tamiz de 0,063 mm de malla

Armario de desecación:

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Picnómetro con una capacidad nominal de 50 ml

Volumenómetro tipo Le Chatelier, consistente en un matraz de fondo plano con un tubo graduado de 0 ml a 24 ml con divisiones de 0,1 ml

Molino planetario de bolas

Procedimiento operatorio:

En esta norma se describen dos métodos para la determinación de la densidad real: el picnómetro (Método A) y el Volumenómetro Le Chatelier (Método B). El primer método es más preciso, pero requiere mucho tiempo. Se sugiere utilizarlo como método de referencia en caso de controversia. El método del volumenómetro Le Chatelier es menos preciso, pero más fácil y rápido de ejecutar y puede utilizarse para el control de la producción.

Método A (picnómetro)

Se muelen las muestras hasta que las partículas pasen a través de un tamiz de 0,063 mm de malla (Fig. 3.16).

Fig. 3.16 Molino planetario de bolas marca RETSCH modelo PM 100
Bolas de acero en recipiente junto con la muestra. Muestra triturada

Se seca el material triturado hasta masa constante y se separa aparte una masa m_e de 10 g aproximadamente, pesados con una precisión de $\pm 0,01$ g (Fig. 3.17).

Fig. 3.17 Tamizado de la muestra por el tamiz de 0,063mm. Secado de la muestra. Pesado de la muestra

Se introduce agua desionizada en el picnómetro y se llena hasta que quede aproximadamente medio lleno. Se añade, a continuación, la masa m_e pesada de la muestra triturada en el picnómetro y se agita el líquido para dispersar la materia sólida. Se somete el picnómetro a un vacío de $(2 \pm 0,7)$ kPa hasta que no suban más burbujas de aire, a continuación, se llena con agua desionizada casi hasta el borde y se

deja que la materia sólida se asiente, hasta que el agua por encima del residuo sea clara. A continuación, se llena con precaución el picnómetro con agua desionizada hasta el enrase, se cierra con su tapón y se limpia suavemente cualquier rebose. Finalmente, se pesa el picnómetro con una precisión de $\pm 0,01$ g (m_1). Se vacía y limpia el picnómetro, se llena únicamente con agua desionizada y se pesa con una precisión de $\pm 0,01$ g (m_2). Antes de cada pesada, se debe comprobar que la temperatura ambiente es de $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ (Fig. 3.18).

Fig. 3.18 Pesado del picnómetro con muestra más agua. Pesado del picnómetro con agua

Método B (Volumenómetro Le Chatelier)

Se muelen las muestras hasta que las partículas pasen a través de un tamiz de 0,063 mm de malla. Se seca el material triturado hasta masa constante y se separa aparte una masa m_e de 50 g aproximadamente, pesados con una precisión de $\pm 0,1$ g. Se introduce agua desionizada en el volumenómetro Le Chatelier hasta que el nivel de agua esté en la graduación de 0 ml. Se añade, a continuación, la masa m_e pesada del material triturado en el volumenómetro, en cinco fracciones de 10 g aproximadamente, asegurándose de que la totalidad de cada una de las fracciones cae dentro del líquido. Después de introducir cada fracción, se agita el líquido para dispersar el material triturado. Se leen la graduaciones para determinar V_s en mililitros, aproximando a 0,1 ml del líquido desplazado por la masa m_e del material triturado. Antes de anotar las lecturas del volumen inicial en el nivel 0 y el volumen

final, hay que asegurarse de que la temperatura ambiente es de $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

Expresión de los resultados:

El volumen de los poros abiertos (en mililitros) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_0 = \frac{m_s - m_d}{\rho_{rh}} \times 1000$$

El volumen aparente (en mililitros) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \times 1000$$

Éste se puede calcular, alternativamente, basándose en las dimensiones del material.

NOTA El valor de la densidad del agua ρ_{rh} a 20°C es 998 kg/m^3 .

Densidad aparente

La densidad aparente (en kilogramos por metro cúbico) se calcula por medio de la relación entre la masa del material seco y su volumen aparente, con la ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_b} \times \rho_{rh}$$

Porosidad abierta

La porosidad abierta se calcula por medio de la relación (en porcentaje) entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente del material, con la ecuación:

$$\rho_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

Densidad real

La densidad real (en kilogramos por metro cúbico) se calcula por medio de la relación entre la masa del material seco y triturado m_e y el volumen de líquido desplazado por la masa m_e , con la ecuación:

Método A (picnómetro)

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \times \rho_{rh}$$

Método B (volumenómetro Le Chatelier)

$$\rho_r = \frac{m_e}{V_s} \times \rho_{rh}$$

Porosidad total

La porosidad total se calcula por medio de la relación (en porcentaje) entre el volumen de los poros (abiertos y cerrados) y el volumen aparente del material, con la ecuación:

$$\rho = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r}}{\frac{1}{\rho_b}} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \times 100$$

3.2.1.2 Caracterización química

En el Capítulo 2, epígrafe 2.2.1 se han descrito los diferentes ensayos realizados para caracterizar los ROCA. Estos han sido:

LISTADO DE ENSAYOS

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Espectroscopia infrarroja (IR)

UNE-EN 196-5:2011

Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.

UNE-EN 14774-1:2010

Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.
Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.

3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO NATURAL

Determinar las propiedades geométricas y las características mecánicas tanto de la grava, de la arena como de la cáscara de almendra permite establecer las interacciones entre las mismas, ya que ello influirá notablemente en la fabricación del hormigón.

En este sentido cabe señalar, que la selección y reducción de muestras para los ensayos del árido se ha realizado de acuerdo a lo indicado en la norma UNE EN 933-2:1999 *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio.*

La finalidad de los procedimientos señalados en esta norma europea es la obtención de muestras de ensayo, con el mínimo número de etapas de división, y, en la medida de lo posible, impedir que el operador introduzca pequeñas modificaciones en la muestra de ensayo o tenga que seleccionar las partículas que formen parte de la misma.

Cuando el método de ensayo sólo especifica una masa mínima (m_t) de la muestra de ensayo, o de cada una de las submuestras de ensayo, se debe emplear alguno de los cuatro métodos que señala la norma para obtener masas comprendidas entre el 100% y el 150% de la masa mínima requerida.

En este caso se ha empleado el procedimiento de reducción de la muestra con un cuarteador, que consiste en poner la muestra en uno de los recipientes del cuarteador, extendiendo uniformemente el material sobre toda la superficie del recipiente. Se colocan los otros dos recipientes en su posición. Se vierte la muestra desde el lateral mayor del cuarteador, hacia la línea central del mismo (Fig. 3.19).

Fig. 3.19 Procedimiento de reducción de la muestra con un cuarteador; a. División a $\frac{1}{2}$ de la muestra
b. División a $\frac{1}{4}$ de la muestra

3.2.2.1 Propiedades GEOMÉTRICAS de la ARENA

Resulta imprescindible determinar las propiedades geométricas de los áridos para la fabricación de un buen hormigón. La granulometría obtenida del árido grueso y fino a partir de su combinación, realizando las correcciones de dosificación oportunas, hace que el árido resultante se aproxime a las curvas teóricas. Esas mismas propiedades geométricas de los áridos determinarán si el hormigón fabricado tiene las condiciones mecánicas necesarias para ser utilizado como hormigón estructural (requisitos de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08).

La determinación de la granulometría de las partículas no se realizó por separado sobre la fracción fina y la gruesa, sino sobre la mezcla homogeneizada. Se hicieron las cuatro curvas granulométricas correspondientes a la muestra patrón y a las probetas con los % de sustitución ya indicados (10, 20 y 30%).

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea describe el método de lavado y tamizado en vía seca, utilizado en los ensayos tipo y en caso de litigio, para la determinación de la granulometría de los áridos. Se aplica a todos los áridos, incluidos los áridos ligeros, con una dimensión nominal de hasta 90 mm, excluyendo los fillers.

Principio del método:

El ensayo consiste en dividir y separar un material, mediante una serie de tamices, en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Los tamaños de abertura y el número de tamices se seleccionan según la naturaleza de la muestra y según la exactitud requerida.

El método adoptado consiste en el lavado del árido y su posterior tamizado en vía seca. Cuando el lavado pueda alterar algunas propiedades físicas de los áridos ligeros, se debe utilizar el tamizado en vía seca.

La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresa respecto a la masa inicial del material. Los porcentajes acumulados que pasan por cada tamiz se registran en forma numérica y, si fuese necesario, en forma gráfica.

Equipo utilizado:

Tamices de ensayo:

con abertura como se especifica en la Norma UNE EN 933-2⁶. Los tamices de ensayo con aberturas de tamaño superior o igual a 4mm deben ser de chapa perforada con agujeros cuadrados de acuerdo con la ISO 3310-2, mientras que los tamices de ensayo con aberturas de tamaño inferior a 4 mm deben ser de tela metálica trenzada de acuerdo con la ISO 3310-1.

Tapa y fondo herméticos, para los tamices.

Armario de desecación:

⁶ UNE-EN 933-2:1996 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

Marca P-SELECTA, modelo 380. Es del tipo DRY BIG, con circulación por aire forzado. Regulador por microprocesador y lectura digital de temperatura. Para temperaturas regulables de 40 °C hasta 200 °C.

Equipo de lavado.

Balanza monoplato marca METTLER modelo HGM-20K, con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.

Bandejas cuadradas de acero inoxidable de dimensiones 37x37x5 cm

Cepillos.

Preparación de las porciones de ensayo:

El tamaño de cada porción de ensayo debe ser como se especifica en la Tabla 3.3 (Tabla 1 de la Norma UNE-EN 933-1:2012).

Tabla 3.3 Tamaño mínimo de las muestras de ensayo

Tamaño del árido D (máximo) mm	Masa del árido (kg)	Volumen de áridos ligeros (litros)
90	80	--
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Se seca la porción de ensayo a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Después, se deja enfriar, se pesa y se registra su masa como M_1 (Fig. 3.20).

Fig. 3.20 Preparación de las porciones de ensayo

Procedimiento operatorio:

Lavado

Se coloca la porción de ensayo en un recipiente y se añade agua suficiente hasta cubrirla. A continuación se agita la muestra con fuerza suficiente para obtener la completa separación y suspensión de los finos. Se mojan ambos lados de un tamiz de 0,063 mm, reservado utilizarse exclusivamente en este ensayo, y se coloca encima de él un tamiz de guarda (por ejemplo, de 1 mm o 2 mm). Se instalan los tamices de forma que la suspensión tamizada pueda desecharse o, cuando se requiera, recogerse en un recipiente adecuado. Se vierte el contenido del recipiente en el tamiz superior. Se continúa el lavado hasta que el agua que fluya por el tamiz de ensayo de 0,063 mm sea clara. Se seca el residuo retenido por el tamiz de 0,063 mm a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Se deja enfriar, se pesa y se registra su masa como M_2 (Fig. 3.21).

Fig. 3.21 Lavado de la muestra. a) Agitado de la muestra en el cubo con agua. b) Lavado de la muestra bajo el grifo. c) Secado de la muestra

Tamizado

Se vierte el material lavado y secado en la columna de tamizado. La columna está formada por cierta cantidad de tamices ensamblados y dispuestos, de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, con el fondo y la tapa. La experiencia ha demostrado que el lavado no elimina necesariamente todos los finos. Por lo tanto, es necesario incorporar un tamiz de ensayo de 0,063 mm en la serie.

Se agita la columna, manual o mecánicamente. A continuación se retiran los tamices uno a uno, comenzando con el de mayor tamaño de abertura. Se agita cada tamiz

manualmente asegurando que no se pierde ningún material utilizando, por ejemplo, un fondo y una tapa. Todo el material que pasa por cada tamiz se transfiere al siguiente tamiz de la columna antes de continuar la operación con ese tamiz. Debe evitarse la sobrecarga del tamiz (Fig. 3.22).

Fig. 3.22 Tamizado. a) Preparación de la muestra y los tamices. b) Tamizado

Pesada

Se pesa el material retenido por el tamiz de mayor tamaño de abertura y se registra su masa como R_1 . Se realiza la misma operación para el tamiz que se encuentre inmediatamente debajo y se registra la masa retenida como R_2 . Se continúa con la misma operación para todos los tamices de la columna, con objeto de obtener las masas de las diferentes fracciones de material retenido y se registran dichas masas como R_3, R_4, R_i, R_n . Se pesa el material tamizado, si lo hubiere, que quede en la bandeja del fondo y se registra su masa como P (Fig. 3.23).

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.4.1 *Condiciones granulométricas del árido fino total*: la cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 mm, expresada en porcentaje del peso de la muestra de árido grueso total, no excederá del 1,5%.

Fig. 3.23 Pesado de las porciones de ensayo tamizadas

Cálculo y expresión de los resultados:

Cálculo

Se registran las diferentes masas. Se calcula la masa retenida en cada tamiz como porcentaje de la masa seca original M_1 . Se calcula el porcentaje acumulado de la masa seca original que pasa por cada tamiz, hasta el tamiz de 0,063 mm, excluido.

Se calcula el porcentaje de finos f que pasan por el tamiz de 0,063 mm de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

donde

M_1 es la masa seca de la porción de ensayo en kg

M_2 es la masa seca del residuo retenido en el tamiz de 0,063 mm, en kg

P es la masa de material tamizado que queda en la bandeja, en kg

Para el tamizado en vía seca,

$$f = \frac{100 P}{M_1}$$

Validación de los resultados

El ensayo debe repetirse si la suma de las masas R_1 y P difiere en más del 1% de la masa M_2 .

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea describe el método de referencia utilizado para los ensayos de tipo, y en caso de litigio, para la determinación del valor del equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos o de los áridos todo uno.

Principio del método:

Una muestra de ensayo de 0/2 mm de árido con un contenido de finos máximo del 10% (bien natural o bien obtenida después del ajuste de la curva granulométrica), y una pequeña cantidad de solución de lavado y floculante, se vierten en una probeta cilíndrica graduada que se agita para soltar los recubrimientos de arcilla procedentes de las partículas gruesas de la porción de ensayo. A continuación, el árido "se riega" utilizando una cantidad adicional de la misma solución de lavado y floculante para favorecer la suspensión de las partículas finas. Después de un tiempo fijado, se calcula el valor del equivalente de arena $SE(10)$ a partir de la altura del sedimento, expresado como porcentaje de la altura total del sedimento y la suspensión en la probeta.

Reactivos:

Solución concentrada, compuesta de:

cloruro de calcio cristalino, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, o cloruro de calcio anhidro, CaCl_2 ;

glicerina, 99% de glicerol, calidad de reactivo de laboratorio;

solución de formaldehído, 40% en volumen, calidad de reactivo de laboratorio;

agua destilada o desmineralizada.

Solución de lavado y floculante, preparada por dilución de (125 ± 1) ml de solución concentrada en agua destilada o desmineralizada, hasta obtener $(5,00 \pm 0,01)$ l.

Equipos:

- Dos probetas cilíndricas graduadas, de vidrio o plástico transparente, provistas de tapones de caucho y con las siguientes dimensiones:
 - a) espesor de pared, unos 3 mm;
 - b) diámetro interior (32,00±0,5) mm;
 - e) altura (430,00±0,25) mm.
- Pistón tarado para el ensayo
- Cronómetro, con una lectura de 1 s
- Regla de 500 mm, graduada en milímetros
- Tamices de ensayo, de 0,063 y 2 mm de acuerdo con la Norma EN 933-2, con tamiz de guarda si es necesario.
- Cepillo para limpieza de tamices
- Tubo lavador
- Matraz de vidrio o de plástico transparente de 5 l de volumen, provisto de un sistema de sifón, cuya base esté colocada aproximadamente 1 m por encima de la mesa de trabajo
- Tubo de plástico o de caucho, con una longitud aproximada de 1,50 m y un diámetro interior aproximado de 5 mm, para unir el tubo lavador al sifón
- Embudo, para transferir la porción de ensayo a la probeta cilíndrica graduada
- Máquina de agitación, capaz de imprimir a la probeta graduada un movimiento horizontal, rectilíneo, periódico y sinusoidal de (200±10) mm de amplitud, con una frecuencia de 1/3 de segundo
- Termómetro, con una precisión de 1°C
- Balanza, con una precisión del ± 0,1% de la masa que se deba pesar
- Papel de filtro, de espesor medio o grueso

Preparación de las muestras de ensayo:

La muestra de laboratorio debe reducirse de acuerdo con la Norma EN 932-2 para obtener dos submuestras. La primera submuestra se utiliza para determinar el contenido de agua y de finos de la muestra de laboratorio, y para preparar un árido fino de corrección. La segunda submuestra se utiliza para determinar el valor del

equivalente de arena. El ensayo debe realizarse con la fracción granulométrica 0/2 mm. La segunda submuestra no debe secarse artificialmente (Fig. 3.24).

Fig. 3.24 Muestra de laboratorio reducida de acuerdo con la Norma EN 932-2 obteniendo dos submuestras

Procedimiento operatorio:

El ensayo debe realizarse sobre dos muestras de ensayo a una temperatura de $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.

Llenado de las probetas cilíndricas graduadas

Se sifona la solución de lavado en cada probeta cilíndrica graduada hasta alcanzar la marca inferior de la misma. Se vierte una muestra de ensayo con la ayuda del embudo en cada una de las probetas cilíndricas graduadas, manteniéndolas en posición vertical.

Se golpea varias veces la base de cada probeta sobre la palma de la mano, para desalojar las burbujas de aire y favorecer el contacto total de la solución con la muestra de ensayo. Se deja reposar cada probeta cilíndrica durante (10 ± 1) min para empapar la muestra de ensayo (Fig. 3.25).

Fig. 3.25 Llenado de probetas. a) Llenado hasta la marca con la disolución.
b) Vertido de la muestra dentro de la probeta

Agitación de las probetas cilíndricas graduadas

Al finalizar el periodo de 10 min, se sella una de las probetas cilíndricas con uno de los tapones de caucho y se fija en la máquina de agitación. Se agita la probeta cilíndrica durante (30 ± 1) s y a continuación se vuelve a colocar en la mesa de ensayos, en posición vertical hacia arriba. Se repite el proceso de agitación con la segunda probeta cilíndrica (Fig. 3.26).

Fig. 3.26 Agitación de la probeta por medio del aparato de agitación CONTROLS

Lavado

Se quita el tapón de caucho de una de las probetas cilíndricas graduadas y se enjuaga sobre la misma con la solución lavadora, asegurándose de que todo el material caiga dentro de la probeta. Se introduce el tubo lavador en la probeta cilíndrica, enjuagando en primer lugar sus paredes con la solución de lavado y, a continuación, se empuja el tubo hacia abajo, a través del sedimento, hasta el fondo de la probeta cilíndrica.

Se mantiene la probeta cilíndrica en posición vertical mientras se deja que la solución de lavado agite el contenido y favorezca el ascenso de los finos y los componentes arcillosos. A continuación, se aplica a la probeta cilíndrica un movimiento lento de rotación a la vez que el tubo lavador se desplaza lenta y regularmente de forma ascendente. Cuando el nivel de líquido se aproxime a la marca superior, se levanta lentamente el tubo lavador y se regula el caudal para que el nivel del líquido se mantenga constante en la marca superior de la probeta, hasta que se haya retirado por completo el tubo y se haya cortado el aporte de líquido.

Se comienza a medir el tiempo de sedimentación en el momento en que se retira el tubo lavador. Se repite el proceso de lavado con la segunda probeta cilíndrica (Fig. 3.27).

Fig. 3.27 Proceso de lavado de las probetas cilíndricas graduadas

Mediciones

Se deja reposar cada probeta cilíndrica durante $(20,00 \pm 0,25)$ min en un lugar sin perturbaciones ni vibraciones. Transcurrido este período, se mide con la ayuda de la regla, la altura h_1 del nivel superior de la suspensión con relación a la base de la probeta cilíndrica. Se baja suavemente el pistón en la probeta cilíndrica, hasta que su pie repose sobre el sedimento. Se coloca el disco en la parte superior de la probeta cilíndrica y después se bloquea a la varilla del pistón. Se determina la altura del sedimento h_2 , midiendo la distancia entre la cara inferior de la cabeza del pistón y la cara superior del disco introduciendo la regla graduada en la ranura del mismo. Se anotan las alturas h_1 y h_2 redondeadas al milímetro más próximo. Se miden y registran las alturas h_1 y h_2 de la segunda probeta cilíndrica de la misma manera (Fig. 3.28).

a

b

Fig. 3.28 Mediciones. a) Medición de la altura h_1 del nivel superior de la suspensión con relación a la base de la probeta cilíndrica. b) Medición de la altura del sedimento h_2

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula la relación $(h_2/h_1) \times 100$ para cada probeta cilíndrica, con una precisión de una cifra decimal. Debe repetirse el procedimiento de ensayo si ambos valores difieren en más de 4. Se calcula el valor del equivalente de arena $SE(10)$ como la media de las relaciones $(h_2/h_1) \times 100$, obtenidas para cada probeta cilíndrica y se registra el resultado, redondeado al número entero más próximo.

3.2.2.2 Propiedades FÍSICAS Y MECÁNICAS de la ARENA

UNE-EN 1097-3:1999

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica el procedimiento operatorio para la determinación de la densidad aparente del árido seco y para el cálculo de los huecos. El ensayo es de aplicación para los áridos naturales y artificiales con un tamaño máximo de 63 mm.

Principio del método:

Pesar la masa en seco del árido con el que se ha llenado un recipiente determinado y calcular la correspondiente densidad aparente. El porcentaje de huecos se calcula a partir de la densidad aparente y de la densidad de partículas.

Equipos:

- Recipiente cilíndrico estanco
- Balanza, de la capacidad adecuada, con una precisión de 0,1% de la masa de la muestra de ensayo.
- Regla de acero, con una longitud mínima superior en 50 mm al diámetro exterior del recipiente, y con la rigidez suficiente para no sufrir deformación al nivelar.
- Termómetro (para calibración), apto para medir la temperatura del agua a 20°C con una precisión de 0,5°C.
- Estufa de secado.

Preparación de las submuestras:

Obtener tres submuestras, según establece el proyecto de norma prEN 932-2. Secar el árido a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante. Cada submuestra deberá tener una masa comprendida entre 120% y 150% de la necesaria para llenar el recipiente. En el caso de áridos ligeros, cuando proceda, mantener las

submuestras en unas condiciones de equilibrio de humedad a $(23\pm5)^{\circ}\text{C}$ y $(50\pm10)\%$ de humedad relativa, después del secado a $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3.29).

Fig. 3.29 Secado de las submuestras a una temperatura de $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante

Procedimiento operatorio:

Pesar en seco el recipiente limpio y vacío (m_1). Colocar el recipiente sobre una superficie horizontal y llenarlo con la pala hasta que rebose. Durante la operación de llenado, reducir al mínimo la segregación de partículas apoyando la paleta sobre el borde superior del recipiente. El borde de la paleta no debe estar separado en ningún caso más de 50 mm por encima del borde del recipiente. Retirar con cuidado cualquier exceso de árido de la parte superior del recipiente, asegurándose de que la superficie extendida está nivelada, para evitar su separación. Nivelar la superficie del árido con la regla de acero, teniendo cuidado de no producir ningún efecto de compactación sobre la superficie superior del árido. Si ello no fuera posible, nivelar la superficie a mano, procurando aproximar lo más posible el volumen del árido introducido con la capacidad del recipiente. Pesar el recipiente una vez lleno y anotar la masa (m_2) redondeada a la fracción 0,1 % más próxima. Se deberá repetir el ensayo con tres submuestras (Fig. 3.30).

a

b

Fig. 3.30 Pesado. a) Pesado del recipiente vacío. b) Pesado del recipiente una vez lleno

Cálculo y expresión de los resultados:

Calcular la densidad aparente de cada submuestra, ρ_b a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

donde

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

m_2 es la masa del recipiente y de la submuestra, expresada en kilogramos;

m_1 es la masa del recipiente vacío, expresada en kilogramos;

V es el volumen del recipiente, expresado en litros.

Calcular la densidad aparente ρ_b como la media aritmética de los tres valores obtenidos, redondeados a la segunda cifra decimal para los áridos normales, y a la tercera cifra decimal para los áridos ligeros.

El porcentaje de huecos v es la proporción volumétrica de los huecos del recipiente y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$$

donde

v es el porcentaje de huecos;

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

ρ_p es la densidad de partículas tras secado previo o secado en estufa, expresada en megagramos por metro cúbico.

UNE-EN 1097-5:2009

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia utilizado para el ensayo tipo y en caso de litigio para la determinación del contenido en agua de los áridos por secado en una estufa ventilada.

Principio del método:

El método de secado en estufa proporciona una medida del contenido total de agua libre presente en una muestra de ensayo de árido. El agua puede estar presente en la superficie del árido y en los poros accesibles al agua dentro de las partículas de árido. Se pesa una muestra de ensayo y se la introduce en una estufa ventilada de secado a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Por pesadas sucesivas, se determina la masa constante de la muestra de ensayo seca. En todas las etapas de manipulación y preparación del árido antes del inicio del ensayo, se protege la muestra de laboratorio y la muestra de ensayo obtenida para evitar pérdidas o absorción de agua. El contenido en agua se

determina como la diferencia entre la masa húmeda y seca de la muestra de ensayo y se expresa como porcentaje respecto de la masa seca de la muestra de ensayo.

Equipos:

- Recipiente, con la capacidad suficiente para almacenar la muestra de ensayo antes del ensayo. El recipiente debe ser resistente a la corrosión y debe estar cerrado para evitar la pérdida de agua.
- Agitador resistente al calor, como por ejemplo, una espátula.
- Balanza, de capacidad adecuada, con una exactitud del 0,1% de la masa de la muestra ensayo.
- Estufa de secado ventilada, controlada por un termostato para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Bandejas, resistentes al calor, y en número y tamaño suficiente para contener las muestras de ensayo.

Preparación de la muestra de ensayo:

Debe reducirse la muestra de laboratorio como se especifica en la Norma EN 932-2 para producir una muestra de ensayo. Se calcula la masa mínima de la muestra de ensayo a partir del valor del tamaño del tamiz superior (D), en milímetros, del siguiente modo:

si $D \geq 1,0$ mm, la masa mínima (en kilogramos) debe ser $0,2 D$;

si $D < 1,0$ mm, la masa mínima debe ser 0,2 kg.

Procedimiento operatorio:

Se limpian y secan un número suficiente de bandejas para contener la muestra de ensayo durante el secado. Se pesa y se anota la masa de las bandejas (M_2). Se extiende la muestra de ensayo sobre las bandejas. Se pesan las bandejas que contienen la muestra de ensayo húmeda y se determina la masa de la muestra de ensayo (M_1) restando la masa de las bandejas (M_2). Se colocan las bandejas en la estufa a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante.

Para establecer si se ha obtenido la masa constante (M_3), se procede como se indica a continuación con cada bandeja:

Se enfría la bandeja a temperatura ambiente. Se determina la masa de la muestra de ensayo (M_{d1}) restando la masa de la bandeja (M_2). Se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa durante al menos 1 h, se saca la bandeja y se deja enfriar a temperatura ambiente, y se repite la determinación de la masa de la muestra de ensayo (M_{di}). Si M_{di} se diferencia de M_{d1} en menos del 0,1%, se asume que se ha alcanzado la masa constante. Si la diferencia es 0,1% o superior, se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa y se repite este procedimiento hasta que la diferencia entre dos determinaciones sucesivas sea inferior al 0,1%. Si se utiliza más de una bandeja, M_3 es la suma de los valores M_{di} . Se anota el valor final de M_{di} como M_3 una vez que se ha alcanzado la masa constante (Fig. 3.31).

Fig. 3.31 Procedimiento de determinación del contenido de agua por secado en estufa de la arena.
a) Pesado de la bandeja limpia y seca. b) Extendido de la muestra de ensayo sobre la bandeja y pesado.
C) Colocación de la bandeja en la estufa a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante

Cálculo y expresión de los resultados:

El valor del contenido en agua (w) es la masa de agua de la muestra de ensayo expresada como porcentaje respecto de la masa de la muestra de ensayo seca. Se calcula el contenido en agua, w , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

donde

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

M_3 es la masa constante de la muestra de ensayo secada, en gramos.

Se expresa el resultado redondeando al 0,1 % más próximo.

UNE-EN 1097-6:2014

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica los métodos de referencia utilizados para los ensayos tipo y, en caso de litigio, para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua de áridos de peso normal y ligeros.

El método de referencia utilizado para los áridos de peso normal especificados es el método del picnómetro para partículas de áridos que pasen el tamiz de ensayo de 4 mm y queden retenidas sobre el tamiz de ensayo de 0,063 mm. El método permite determinar tres parámetros diferentes de densidad de partículas (densidad de partículas de secado en estufa, densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente y densidad aparente de partículas) y la absorción de agua después de un periodo de inmersión de 24 h.

Principio del método:

La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina por pesada de la porción de ensayo en la condición saturada y secada superficialmente, y de nuevo en la condición secada en estufa. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, tanto por la reducción de masa en

el método de la balanza hidrostática como mediante pesadas en el método del picnómetro.

Equipos:

- Estufa ventilada, controlada termostáticamente para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Balanza, con exactitud del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo.
- Baño de agua, controlado termostáticamente, capaz de mantenerse a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.
- Termómetro, de $0,1^{\circ}\text{C}$ de exactitud.
- Tamices de ensayo, de 0,063 mm, 4 mm, 31,5 mm y 63 mm, con aberturas como se especifica en la Norma EN 933-2.
- Bandejas, que pueden calentarse en una estufa ventilada sin cambio en la masa.
- Paños absorbentes suaves secos.
- Equipo de lavado.
- Cronómetro.
- Picnómetro, consistente en un matraz de vidrio u otro recipiente adecuado con un volumen entre 500 ml y 2 000 ml, constante a 0,5 ml durante toda la duración del ensayo.
- Molde metálico, en forma de un tronco de cono de (40 ± 3) mm de diámetro en la parte superior, (90 ± 3) mm de diámetro en la parte inferior y (75 ± 3) mm de altura. El metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm.
- Pisón metálico, de masa (340 ± 15) g.
- Suministro de aire caliente, como un secador de pelo.

Método del picnómetro para las partículas de árido que pasen el tamiz de ensayo de 4 mm y queden retenidas en el tamiz de ensayo de 0,063 mm

Preparación de la porción de ensayo:

La toma de muestras de los áridos debe estar de acuerdo con la Norma EN 932-1 y la reducción debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-2. Se lava la muestra sobre el tamiz de 4 mm y el tamiz de 0,063 mm para eliminar las partículas más finas. Se

retira cualquier partícula retenida sobre el tamiz de 4 mm. La masa de la porción de ensayo de árido de 0,063/4 mm no debe ser menor de 300 g (Fig. 3.32).

Fig. 3.32 Lavado de la muestra sobre el tamiz de 4 mm y el tamiz de 0,063 mm para eliminar las partículas más finas

Procedimiento de ensayo:

Se sumerge la porción de ensayo preparada en agua a $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ en el picnómetro y se elimina el aire atrapado mediante giros y sacudidas cuidadosas del picnómetro en una posición inclinada. Se deja el picnómetro en el baño de agua y se mantiene la porción de ensayo a una temperatura de $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ durante $(24\pm0,5)$ h. Al final del periodo de inmersión, se saca el picnómetro del baño de agua y se elimina cualquier aire atrapado mediante giros y sacudidas cuidadosas. El aire atrapado puede eliminarse también mediante la aplicación de vacío.

Se rellena el picnómetro mediante la adición de agua y se coloca la tapa sobre la parte superior sin atrapar aire en el recipiente. A continuación, se seca el exterior del picnómetro y se pesa, M_2 . Se registra la temperatura del agua (Fig. 3.33).

a
Fig. 3.33 Procedimiento de ensayo método del picnómetro. a) Picnómetros inmersos en baño de agua.
b
b) Secado del exterior del picnómetro y pesado

Se decanta la mayoría del agua que cubre la porción de ensayo y se vacía el picnómetro en una bandeja. Se vuelve a llenar el picnómetro con agua y se vuelve a colocar la tapa como antes.

A continuación, se seca el exterior del picnómetro y se pesa, M_3 . Se registra la temperatura del agua. La diferencia en la temperatura del agua en el picnómetro durante las pesadas M_2 y M_3 no debe exceder de 2°C .

Se esparce la porción de ensayo sumergida en una sola capa uniforme sobre la parte inferior de la bandeja. Se expone el árido a una corriente de aire templada con cuidado para evaporar la humedad superficial.

Se agita a intervalos frecuentes para asegurar el secado uniforme hasta que no pueda verse humedad superficial libre y las partículas de árido no se adhieran unas a otras. Se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente mientras se agita (Fig. 3.34).

a

b

Fig. 3.34 a) Esparcido de la porción de ensayo sumergida en una sola capa uniforme sobre la parte inferior de la bandeja exponiendo al árido a una corriente de aire templada. b) Llenado del picnómetro con agua, secado del exterior del picnómetro y pesado

Para evaluar si se ha alcanzado el estado de secado de la superficie, se sujeta el molde cónico de metal con su cara abertura mayor hacia abajo sobre el fondo de la bandeja. Se llena más o menos el molde cónico con parte de la porción de ensayo seca. A través del agujero en la parte superior del molde se coloca el pisón metálico sobre la superficie del árido. Se compacta la superficie 25 veces dejando caer el pisón por su propio peso. No se vuelve a rellenar el molde después del compactado. Con cuidado se levanta el molde sin el árido. Si el cono del árido no se desmorona, se continúa secando y se repite el ensayo del cono hasta que se produzca el desmoronamiento al retirar el molde (Fig. 3.35).

a

b

c

Fig. 3.35 Evaluación de secado de la superficie de la muestra. a) Compactación de la muestra mediante el pisón. b) Primera comprobación de secado de la superficie. c) Última comprobación de secado de la superficie

Se pesa la porción de ensayo saturada y secada superficialmente, M_1 . Se seca el árido en una estufa ventilada a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta que se alcance una

masa constante. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa, M_4 . Se registran todas las masas con una exactitud del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo M_4 o mejor (Fig. 3.36).

Fig. 3.36 a) Secado del árido en una estufa ventilada a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta que se alcance una masa constante. b) Enfriado a temperatura ambiente y pesado

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calculan las densidades de partículas (ρ_a , ρ_{rd} y ρ_{ssd} como sea apropiado) en megagramos por metro cúbico de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Densidad aparente de partículas

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Densidad de partículas secadas en estufa

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

y la absorción de agua después de la inmersión durante 24 h, WA_{24} de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en megagramos por metro cúbico;

M_1 es la masa del árido saturado y secado superficialmente, pesado al aire, en gramos;

M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra del árido saturado y el agua, en gramos;

M_3 es la masa del picnómetro sólo lleno con agua, en gramos;

M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

Los valores de densidad de partículas se expresan redondeando al 0,01 Mg/m³ más cercano y la absorción de agua redondeando al 0,1 % más cercano.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos*, que se cumplirá la limitación en cuanto a la absorción de agua por el árido fino, (determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6), de un valor $\leq 5\%$.

Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas

Objeto y campo de aplicación:

La presente norma tiene por objeto definir el método de ensayo para la determinación de la resistencia a la fragmentación de las arenas contenidas en los áridos de origen natural o artificial utilizadas en la fabricación de hormigones para edificación y obras públicas.

Fundamento del método:

El ensayo consiste en medir la evolución granulométrica de las arenas, producida en un cilindro en rotación y en condiciones bien definidas, por fragmentación con la ayuda de una carga de bolas en presencia de agua. La arena debe ser tamizada a 2 mm de tamaño máximo. Las partículas finas de la arena, inferiores a 0,1 mm no son estudiadas. La evolución granulométrica se caracteriza por la cantidad de partículas inferiores a 0,05 mm producidas durante el ensayo.

El coeficiente de friabilidad (F.A.) de una arena se calcula mediante la expresión:

$$F.A. = 100 \frac{m}{M}$$

donde

M es la masa del material sometido a ensayo, en gramos;

m es la masa de las partículas inferiores a 0,05 mm producidas durante el ensayo.

Equipos:

- Estufa ventilada, controlada termostáticamente para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Balanza, con exactitud del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo.
- Tamices de ensayo, de 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 1 mm, 2 mm y 8 mm.
- Carga de bolas, que estará constituida por bolas esféricas en acero inoxidable.

- Aparato Micro-Deval.

Preparación de la muestra:

La muestra será representativa de la arena y tendrá un peso no inferior a 2 kg y se preparará mediante las siguientes operaciones:

- Tamizar por vía húmeda 2 kg de la muestra a través de los tamices 0,1 y 2 mm.
- Secar la muestra tamizada y retenida entre los tamices 0,1 y 2 mm en estufa a 105°C hasta peso constante (Fig. 3.37).

a

b

Fig. 3.37 a) Preparación de la muestra. a) Pesado inicial de la muestra
b) Tamizado de la muestra por los tamices 0,1 y 2 mm

Preparar la carga de bolas de acero de la forma siguiente:

tomar 9 bolas de 30 mm de diámetro cuyo peso debe ser de 975 g;

añadir 21 bolas de 18 mm de diámetro cuyo peso debe ser de 490 g;

completar con bolas de 10 mm de diámetro de forma que el peso total de la carga sea de 2500 ± 4 g (Fig. 3.38).

a

b

c

Fig. 3.38 Pesado de la carga de bolas de acero. a) Bolas de 30 mm de diámetro. b) Bolas de 18 mm de diámetro. c) Bolas de 10 mm de diámetro

Procedimiento operatorio:

Introducir la carga en el cilindro de ensayo, dispuesta su abertura hacia arriba, poner luego los 500 g del material. Añadir 2,5 litros de agua y colocar la tapadera. Poner en movimiento el cilindro con una velocidad de 100 ± 5 r.p.m. durante 1500 vueltas o 15 min. (Fig. 3.39).

a

b

c

Fig. 3.39 a) Pesado de la muestra. b) Introducción de la muestra, el agua y las bolas en el cilindro. c) Puesta en marcha del aparato de Micro-Deval

Descargar, a continuación, el material y la carga abrasiva sobre un recipiente, adecuado, evitando cualquier pérdida. Lavar cuidadosamente el interior del cilindro y recoger agua y las partes minerales arrastradas. Descargar lentamente la totalidad del contenido del recipiente sobre tres tamices superpuestos de 8 mm (para recoger la

carga abrasiva), de 0,2 mm (para proteger el tamiz de 0,05 mm y de 0,05 mm. Lavar el conjunto bajo un chorro de agua hasta que el agua salga clara, luego quitar el tamiz de 8 mm. Secar los tamices de 0,2 mm y 0,05 mm en la estufa a 105°C hasta peso constante. Tamizar en seco conjuntamente los rechazos sobre 0,2 mm y 0,05 mm. Pesar, con precisión de un gramo, el conjunto de los rechazos sobre los dos tamices, recogidos con cuidado. Sea m' este peso (Fig. 3.40).

a

b

Fig. 3.40 a) Lavado de la muestra resultante sobre los tamices de 8, 0,2 y 0,05 mm de diámetro.
b) Pesado de la muestra final una vez seca

Cálculo y expresión de los resultados:

El peso de las partículas inferiores a 0,05 mm producidas durante el ensayo, a partir de los 500 g iniciales es igual a $m = 500 - m'$.

Por tanto, el coeficiente de friabilidad es (redondeando a la unidad):

$$F.A. = 100 \frac{500 - m'}{500}$$

3.2.2.3 Propiedades GEOMÉTRICAS de la GRAVA

UNE-EN 933-1:2012

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*

Este ensayo fue explicado en el epígrafe 3.2.2.1 del presente documento. La metodología operativa, equipos y el procedimiento de cálculo y expresión de resultados son similares.

UNE-EN 933-3:2012

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica el método de referencia, usado en ensayos de tipo y en caso de conflicto, para la determinación del índice de lajas. Esta norma europea se aplica a áridos naturales, artificiales o reciclados. Esta norma europea especifica un procedimiento de ensayo que no es aplicable a los tamaños de partícula menores de 4 mm o mayores de 100 mm.

Fundamento del método:

El ensayo consiste en dos operaciones de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices se divide la muestra en distintas fracciones granulométricas d_i/D_i como se indica en la Tabla 3.4. Cada una de las fracciones granulométricas d_i/D_i se criba a continuación empleando para ello tamices de barras paralelas y separadas $D_i/2$.

El índice de lajas global se calcula a partir de la masa total de las partículas que pasan por los tamices de barras expresado como porcentaje del total de la masa seca de las partículas sometidas a ensayo. Si es necesario, se calcula el índice de lajas para cada fracción granulométrica d_i/D_i como la masa de las partículas que pasan por su correspondiente tamiz de barras, expresado como porcentaje de la masa de esa fracción granulométrica.

Tabla 3.4 Tamices de barras

Fracción granulométrica d_i/D_i	Anchura de la ranura del tamiz de barras (mm)
80/100	$50 \pm 0,5$
63/80	$40 \pm 0,5$
50/63	$31,5 \pm 0,5$
40/50	$25 \pm 0,4$
31,5/40	$20 \pm 0,4$
25/31,5	$16 \pm 0,4$
20/25	$12,5 \pm 0,4$
16/20	$10 \pm 0,2$
12,5/16	$8 \pm 0,2$
10/12,5	$6,3 \pm 0,2$
8/10	$5 \pm 0,2$
6,3/8	$4 \pm 0,15$
5/6,3	$3,15 \pm 0,15$
4/5	$2,5 \pm 0,15$

Equipo de ensayo:

- Tamices de ensayo de aberturas cuadradas, conformes con la Norma EN 933-2 y con los siguientes tamaños de abertura: 100 mm; 80 mm; 63 mm; 50 mm; 40 mm; 31,5 mm; 25 mm; 20 mm; 16 mm; 12,5 mm; 10 mm; 8 mm; 6,3 mm; 5 mm y 4 mm.
- Tamices de barras, formados por barras cilíndricas paralelas de acuerdo con los requisitos de la Tabla 3.4. Las tolerancias para la anchura de las ranuras deben aplicarse a toda la longitud de las mismas (Fig. 3.41).
- Balanza con una precisión de $\pm 0,1\%$ de la masa de la porción de ensayo.
- Estufa ventilada regulada por un termostato que mantenga la temperatura a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ u otro equipo adecuado que permita el secado de los áridos sin provocar la rotura de las partículas.

Fig. 3.41 Equipo de tamices de aberturas cuadradas y de barras cilíndricas paralelas

Preparación de las porciones de ensayo:

La masa de la porción de ensayo debe ser como se especifica en la Norma EN 933-1. Se seca la porción de ensayo a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Después, se deja enfriar, se pesa y su masa se registra como M_0 (Fig. 3.42).

Fig. 3.42 Secado de la porción de ensayo a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante

Procedimiento operatorio:

Tamizado con los tamices de ensayo

La porción de ensayo se tamiza de acuerdo con la Norma EN 933-1 utilizando el rango de tamices apropiado. Se pesan y se descartan todas las partículas que pasen por el tamiz de 4 mm y las que sean retenidas por el tamiz de 100 mm. Se pesan y se conservan por separado todas las partículas de cada fracción granulométrica d_i/D_i .

Cribado con tamices de barras

Se criba cada fracción granulométrica d_i/D_i obtenida con los correspondientes tamices de barras indicados en la Tabla 3.4. Este cribado se puede realizar de forma manual o mecánica, y debe garantizar una completa separación. Se pesa el material de cada fracción granulométrica que pasa por el tamiz de barras correspondiente (Fig. 3.43).

Fig. 3.43 a) Tamizado con los tamices de ensayo. b) Cribado con tamices de barras. C) Pesado de la muestra

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i y se registra como M_1 . Se calcula la suma de las masas de las partículas de las fracciones granulométricas d_i/D_i que pasan por los tamices de barras correspondientes con una anchura de las ranuras $D_i/2$ y se registra como M_2 .

El índice de lajas global IL se calcula con la siguiente ecuación:

$$IL = (M_2/M_1) \times 100$$

donde

M_1 es la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i , en gramos;

M_2 es la suma de las masas de las partículas que pasan por los tamices de barras de anchura $D_i/2$ correspondientes a cada fracción granulométrica, en gramos.

El índice de lajas global (IL) se debe registrar redondeando al número entero más próximo. El índice de lajas para cada fracción granulométrica IL_i se debe calcular, cuando sea necesario, con la siguiente ecuación:

$$IL_i = (M_i/R_i) \times 100$$

donde

R_i es la masa de cada fracción granulométrica d_i/D_i en gramos;

m_i es la masa del material de cada fracción granulométrica d_i/D_i que pasa a través del tamiz de barras correspondiente de anchura $D_i/2$, en gramos.

Si la suma de las masas R_i junto con las masas de cualquier fracción descartada y cualquier fracción no ensayada difiere en más del 1 % de la masa M_0 , el ensayo se debe repetir utilizando otra porción de ensayo.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.5 *Forma del árido grueso*, que se expresará mediante su índice de lajas, entendido como el porcentaje en peso de áridos considerados como lajas según UNE EN 933-3, y su valor debe ser inferior a 35.

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia utilizado para el ensayo tipo y, en caso de litigio, para la determinación del coeficiente de forma de los áridos gruesos. El método de ensayo especificado en esta norma europea es aplicable a las fracciones granulométricas d_i/D_i , donde $D_i \leq 63$ mm y $d_i \geq 4$ mm.

Principio del método:

Las partículas individuales de una muestra de árido grueso se clasifican según la relación entre su longitud L y su espesor E , utilizando un pie de rey si es necesario. Se calcula el coeficiente de forma como la masa de las partículas con una relación dimensional L/E superior a tres, expresada como porcentaje de la masa seca total de las partículas ensayadas.

Equipo de ensayo:

- Pie de rey.
- Tamices de ensayo, con un tamaño nominal de las aberturas como se especifica en la Norma EN 933-2.
- Estufa ventilada, controlada por un termostato para mantener la temperatura a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, u otro aparato adecuado para secar los áridos, si éste no causa deterioro en la granulometría.
- Balanzas o básculas, de capacidad adecuada, con una precisión del 0,1 % de la masa a pesar.
- Bandejas.

Preparación de la muestra de ensayo:

Debe reducirse la muestra de acuerdo con los requisitos de la Norma EN 932-2. La muestra se seca a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta alcanzar la masa constante. Se tamiza empleando los tamices de ensayo adecuados, agitando con la energía suficiente como para

asegurar la separación completa de las partículas mayores de 4 mm. Se rechazan las partículas retenidas por el tamiz de ensayo de 63 mm y las que hayan pasado por el tamiz de ensayo de 4 mm. Si es necesario, se procede a una reducción posterior de la muestra de acuerdo con la Norma EN 932-2 para producir una muestra de ensayo. Se anota la masa de la muestra de ensayo como M_0 (Fig. 3.44).

Fig. 3.44 Preparación de la muestra de ensayo

La masa de la muestra de ensayo debe ser como se especifica en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Masa de las muestras de ensayo

Tamaño superior del árido D (mm)	Masa de la muestra de ensayo (mínima) (kg)
63	45
32	6
16	1
8	0,1

La reducción de la muestra debe producir una muestra de ensayo con una masa mayor que la mínima, pero no de un valor exacto preestablecido.

Procedimiento operatorio:

Muestras de ensayo con $D \leq 2d$

Se separa de la muestra de ensayo la fracción granulométrica d_i/D_i con $D_i \leq 2d$, mediante tamizado de acuerdo con la Norma EN 933-1. Las partículas menores que d_i o mayores que D_i se rechazan. Se anota la fracción granulométrica d_i/D_i que se ensaya, y se anota la masa de la fracción granulométrica d_i/D_i , como M_1 .

Se evalúa la longitud L y el espesor E de cada partícula utilizando, cuando sea necesario, un pie de rey y se apartan aquellas partículas que tengan una relación dimensional $L/E > 3$. Estas partículas se clasifican como no cúbicas. Se pesan las partículas no cúbicas y se anota su masa como M_2 (Fig. 3.45).

Fig. 3.45 a) Tamizado de la muestra con los tamices de ensayo. b) Evaluación de la longitud L y el espesor E de cada partícula utilizando un pie de rey. c) Pesado de las partículas no cúbicas

Cálculo y expresión de los resultados:

Muestras de ensayo con $D \leq 2d$

Se calcula el coeficiente de forma (SI) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$SI = (M_2/M_1) \times 100$$

donde

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

M_2 es la masa de las partículas no cúbicas, en gramos.

Se anota el coeficiente de forma redondeando al número entero más próximo.

UNE-EN 1097-1:2011

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia empleado en los ensayos de tipo y en caso de litigio para la determinación de la resistencia a la abrasión de los áridos gruesos. La muestra se ensaya normalmente en estado húmedo, pero el ensayo también puede llevarse a cabo en estado seco. Esta norma se aplica a los áridos naturales, artificiales o reciclados para su uso en edificación y obra civil.

Principio del método:

El ensayo determina el coeficiente Micro-Deval, que es el porcentaje de la muestra original que se reduce a un tamaño menor de 1,6 mm por rotación. El ensayo consiste en medir el desgaste producido por el rozamiento entre los áridos y una carga abrasiva en un cilindro rotatorio bajo condiciones especificadas. Cuando finaliza la rotación, se utiliza el porcentaje retenido en un tamiz de 1,6 mm para calcular el coeficiente Micro-Deval. El método de ensayo descrito en esta norma es el método de referencia y se realiza con un árido seco al que se le añade agua para obtener un valor de M_{DE} .

NOTA: Un valor menor del coeficiente Micro-Deval indica una mejor resistencia al desgaste.

Equipo de ensayo:

- Balanza, capaz de pesar tanto la muestra como la carga con una precisión del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo.
- Tamices de ensayo, de 1,6 mm, 8 mm, 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm) y 14 mm.
- Estufa ventilada, capaz de mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Medios para lavar la muestra tamizada.
- Equipo para reducir las muestras de laboratorio a una porción de ensayo (submuestra), tal y como se describe en la Norma EN 932-2.
- Probetas (o probetas) graduadas de vidrio, de acuerdo con la Norma EN ISO 4788, o cualquier otro medio para medir $(2,5 \pm 0,05)$ l de agua.
- Aparato típico Micro-Deval.

Preparación de la muestra de ensayo:

La masa de la muestra debe contener al menos 2 kg de partículas con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm. El ensayo se debe realizar con el árido que pase por el tamiz de 14 mm y que quede retenido en el tamiz de 10 mm. Además, la curva granulométrica de la porción de ensayo debe cumplir al menos uno de los requisitos siguientes:

- a) entre el 30% y el 40% del árido pasa por el tamiz de 11,2 mm; o
- b) entre el 60% y el 70% del árido pasa por el tamiz de 12,5 mm.

Se tamiza la muestra de laboratorio empleando los tamices de ensayo de 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm) y 14 mm para obtener fracciones granulométricas separadas en los intervalos de 10 mm a 11,2 mm (o 12,5 mm) y de 11,2 mm (o 12,5 mm) a 14 mm. Se lava cada fracción por separado, y se secan en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Se dejan enfriar las fracciones granulométricas a temperatura ambiente. Se mezclan las dos fracciones para obtener una muestra modificada de laboratorio con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm. Se reduce la muestra modificada de laboratorio obtenida tras la mezcla de las fracciones granulométricas hasta conseguir una porción de ensayo conforme

con los requisitos de la Norma EN 932-2. La porción de ensayo debe consistir en dos muestras con una masa de (500 ± 2) g cada una (Fig. 3.46).

a

b

Fig. 3.46 a) Lavado de cada fracción por separado, y se secan en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. b) Pesado de las fracciones una vez secas

Procedimiento operatorio:

Se introduce cada muestra en un cilindro distinto. Se añaden (5000 ± 5) g de bolas de acero a cada cilindro. Se añaden $(2,5 \pm 0,05)$ l de agua a cada cilindro. Se fija una tapa a cada cilindro, y se coloca cada cilindro sobre los dos árboles. Se hacen girar los cilindros a una velocidad de (100 ± 5) r/min durante (12000 ± 10) revoluciones (Fig. 3.47).

a

b

Fig. 3.47 a) Introducción de cada muestra en un cilindro distinto. Se añaden (5000 ± 5) g de bolas de acero a cada cilindro y $(2,5 \pm 0,05)$ l de agua. b) Giro de los cilindros a una velocidad de (100 ± 5) r/min durante (12000 ± 10) revoluciones

Después del ensayo, se recogen cuidadosamente el árido y las bolas de acero en una bandeja teniendo cuidado para evitar la pérdida de partículas de árido. Utilizando una botella, se limpian cuidadosamente el interior del cilindro y la tapa y se conserva el agua de lavado. Se vierten los materiales y el agua de lavado sobre un tamiz de 1,6 mm protegido por un tamiz de protección de 8 mm. Se lavan los materiales bajo una corriente de agua limpia. Se separan cuidadosamente las partículas de árido retenidas sobre el tamiz de protección de 8 mm de las bolas de acero, evitando en la medida de lo posible la pérdida de partículas de árido. Las partículas de árido pueden separarse manualmente, o bien las bolas pueden extraerse del tamiz utilizando un imán.

Se colocan las partículas de árido retenidas por el tamiz de protección de 8 mm sobre una bandeja. Se añade sobre la misma bandeja el material retenido sobre el tamiz de 1,6 mm. Se secan la bandeja y su contenido en una estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Se completa la determinación de la masa retenida sobre el tamiz de 1,6 mm según establece la Norma EN 933-1. Se registra la masa (m) retenida sobre el tamiz de 1,6 mm, redondeando a la unidad de gramo más próxima (Fig. 3.48).

a

b

Fig. 3.48 a) Lavado de la muestra resultante sobre el tamiz de 8 y 1,6 mm. b) Pesado de la muestra secada

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula para cada probeta el coeficiente Micro-Deval, M_{DE} , redondeado al 0,1 de la unidad más próximo, a partir de la siguiente ecuación:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

donde

M_{DE} es el coeficiente Micro-Deval (en estado húmedo);

m es la masa de la fracción retenida por el tamiz de 1,6 mm, en gramos.

Se calcula el valor medio del coeficiente Micro-Deval utilizando los valores obtenidos para las dos probetas. Se registra el valor medio como coeficiente Micro-Deval de la muestra enviada a laboratorio. Se expresa dicho valor medio redondeado al número entero más próximo.

UNE-EN 1097-2:2010

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea describe el método de referencia, el ensayo de Los Ángeles, empleado en los ensayos de tipo y en caso de litigio para la determinación de la resistencia a la fragmentación de los áridos gruesos. Esta norma europea se aplica a los áridos naturales, prefabricados o reciclados utilizados en aplicaciones de edificación y obra civil.

Equipo de ensayo:

- Tamices de ensayo, conformes con la Norma EN 933-2, con los tamaños de abertura especificados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Tamices de ensayo

Ensayo	Tamaño de abertura (mm)
Los Ángeles	1,6; 10; 11,2; (o 12,5); 14

- Balanza, capaz de pesar la porción de ensayo con una precisión del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo.
- Estufa ventilada, capaz de mantener una temperatura controlada de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Equipo para reducir la muestra de laboratorio a una porción de ensayo, según se describe en el Norma EN 932-2.
- Máquina para el ensayo de Los Ángeles.

Fundamento del método:

Se voltea una muestra del árido en el interior de un tambor giratorio junto con las bolas de acero. Tras el volteo, se determina la cantidad de material retenido por el tamiz de 1,6 mm.

Preparación de la porción de ensayo:

La masa de la muestra debe ser, al menos, de 15 kg, con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm. El ensayo se debe realizar con el árido que pase por el tamiz de 14 mm y que quede retenido en el tamiz de 10 mm. Además, la curva granulométrica de la porción de ensayo debe cumplir uno de los requisitos siguientes:

- a) entre el 60% y el 70% del árido pasa por el tamiz de 12,5 mm; o,
- b) entre el 30% y el 40% del árido pasa por el tamiz de 11,2 mm.

Se tamiza la muestra de laboratorio empleando los tamices de ensayo de 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm) y 14 mm para obtener fracciones granulométricas separadas en los

intervalos de 10 mm a 11,2 mm (o 12,5 mm) y de 11,2 mm (o 12,5 mm) a 14 mm. Se lava cada fracción por separado, tal como establece la Norma EN 933-1, y se secan hasta obtener una masa constante. Se dejan enfriar las fracciones granulométricas a temperatura ambiente. Se mezclan las dos fracciones para obtener una muestra modificada de laboratorio con una granulometría comprendida entre 10 mm y 14 mm que cumpla con los requisitos granulométricos pertinentes citados anteriormente. Se reduce la muestra modificada de laboratorio obtenida tras la mezcla de fracciones granulométricas hasta conseguir una porción de ensayo según se establece en la Norma EN 932-2. La porción de ensayo debe tener una masa de (5000 ± 5) g (Fig. 3.49).

a

b

Fig. 3.49 a) Muestra inicial antes de ser sometida a cuarteo. b) Pesado de la muestra

Procedimiento de ensayo:

Se comprueba que el tambor esté limpio antes de introducir la muestra. Se colocan cuidadosamente las bolas en la máquina y, a continuación, se introduce la porción de ensayo. Se vuelve a colocar la cubierta en su posición y se hace girar la máquina durante 500 vueltas a una velocidad constante comprendida entre 31 r/min y 33 r/min. Se vierte el árido sobre una bandeja dispuesta debajo del equipo teniendo la precaución de que la abertura esté justo encima de la bandeja para evitar la pérdida de material (Fig. 3.50).

Fig. 3.50 a) Introducción de la muestra en la máquina para el ensayo de Los Ángeles.
b) Aspecto de la muestra finalizado el ensayo

Se limpia el tambor, extrayendo todos los finos, y prestando especial atención a las zonas próximas a la placa saliente. Se retira con cuidado la carga abrasiva de la bandeja, evitando perder partículas de árido. Se analiza el material de la bandeja según establece la Norma EN 933-1, lavando y tamizando con un tamiz de 1,6 mm. Se seca la parte retenida en el tamiz de 1,6 mm a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante (Fig. 3.51).

Fig. 3.51 a) Tamizado de la muestra con un tamiz de 1,6 mm. b) Pesado de la parte retenida en el tamiz de 1,6 mm que ha sido secada a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calcula el coeficiente de Los Ángeles, LA , a partir de la siguiente expresión:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

donde

m es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos.

Se registra el resultado redondeando al número entero más próximo.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos*, que se cumplirá la limitación en cuanto a la Resistencia a la fragmentación del árido grueso determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-2 (ensayo de Los Ángeles) ≤ 40 . También indica que para la fabricación de hormigón en masa o armado, de resistencia característica especificada no superior a 30 N/mm², podrán utilizarse áridos gruesos con una resistencia a la fragmentación entre 40 y 50 en el ensayo de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2) si existe experiencia previa en su empleo y hay estudios experimentales específicos que avalen su utilización sin perjuicio de las prestaciones del hormigón.

UNE-EN 1097-3:1999

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica el procedimiento operatorio para la determinación de la densidad aparente del árido seco y para el cálculo de los huecos. El ensayo es de aplicación para los áridos naturales y artificiales con un tamaño máximo de 63 mm.

Fundamento del método:

Pesar la masa en seco del árido con el que se ha llenado un recipiente determinado y calcular la correspondiente densidad aparente. El porcentaje de huecos se calcula a partir de la densidad aparente y de la densidad de partículas.

Equipo de ensayo:

- Recipiente cilíndrico estanco.
- Balanza, de la capacidad adecuada, con una precisión de 0,1% de la masa de la muestra de ensayo.
- Regla de acero, con una longitud mínima superior en 50 mm al diámetro exterior del recipiente, y con la rigidez suficiente para no sufrir deformación al nivelar.
- Termómetro (para calibración), apto para medir la temperatura del agua a 20°C con una precisión de 0,5°C.
- Estufa de secado.

Preparación de las submuestras:

Obtener tres submuestras, según establece el proyecto de norma prEN 932-2. Secar el árido a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante. Cada submuestra deberá tener una masa comprendida entre 120% y 150% de la necesaria para llenar el recipiente (Fig. 3.52).

Fig. 3.52 Secado del árido a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante

En el caso de áridos ligeros, cuando proceda, mantener las submuestras en unas condiciones de equilibrio de humedad a $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ y $(50 \pm 10)\%$ de humedad relativa, después del secado a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento operatorio:

Pesar en seco el recipiente limpio y vacío (m_1). Colocar el recipiente sobre una superficie horizontal y llenarlo con la pala hasta que rebose. Durante la operación de llenado, reducir al mínimo la segregación de partículas apoyando la paleta sobre el borde superior del recipiente. El borde de la paleta no debe estar separado en ningún caso más de 50 mm por encima del borde del recipiente. Retirar con cuidado cualquier exceso de árido de la parte superior del recipiente, asegurándose de que la superficie extendida está nivelada, para evitar su separación. Nivelar la superficie del árido con la regla de acero, teniendo cuidado de no producir ningún efecto de compactación sobre la superficie superior del árido. Si ello no fuera posible, nivelar la superficie a mano, procurando aproximar lo más posible el volumen del árido introducido con la capacidad del recipiente. Pesar el recipiente una vez lleno y anotar la masa (m_2) redondeada a la fracción 0,1 % más próxima. Se deberá repetir el ensayo con tres submuestras (Fig. 3.53).

a

b

Fig. 3.53 a) Pesado del recipiente vacío. b) Pesado del recipiente conteniendo la muestra

Cálculo y expresión de los resultados:

Calcular la densidad aparente de cada submuestra, ρ_b , a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

donde

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

m_2 es la masa del recipiente y de la submuestra, expresada en kilogramos;

m_1 es la masa del recipiente vacío, expresada en kilogramos;

V es el volumen del recipiente, expresado en litros.

Calcular la densidad aparente ρ_b como la media aritmética de los tres valores obtenidos, redondeados a la segunda cifra decimal para los áridos normales, y a la tercera cifra decimal para los áridos ligeros.

El porcentaje de huecos v es la proporción volumétrica de los huecos del recipiente y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$$

donde

v es el porcentaje de huecos;

ρ_b es la densidad aparente, expresada en megagramos por metro cúbico;

ρ_p es la densidad de partículas tras secado previo o secado en estufa, expresada en megagramos por metro cúbico y determinada según establece el prEN 1097-6, empleando una muestra de ensayo tomada de la misma muestra de laboratorio.

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma describe el método de referencia utilizado para el ensayo tipo y en caso de litigio para la determinación del contenido en agua de los áridos por secado en una estufa ventilada.

Principio del método:

El método de secado en estufa proporciona una medida del contenido total de agua libre presente en una muestra de ensayo de árido. El agua puede estar presente en la superficie del árido y en los poros accesibles al agua dentro de las partículas de árido. Se pesa una muestra de ensayo y se la introduce en una estufa ventilada de secado a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Por pesadas sucesivas, se determina la masa constante de la muestra de ensayo seca. En todas las etapas de manipulación y preparación del árido antes del inicio del ensayo, se protege la muestra de laboratorio y la muestra de ensayo obtenida para evitar pérdidas o absorción de agua.

El contenido en agua se determina como la diferencia entre la masa húmeda y seca de la muestra de ensayo y se expresa como porcentaje respecto de la masa seca de la muestra de ensayo.

Equipo de ensayo:

- Agitador resistente al calor, como por ejemplo, una espátula.
- Balanza, de capacidad adecuada, con una exactitud del 0,1 % de la masa de la muestra ensayo.
- Estufa de secado ventilada, controlada por un termostato para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Bandejas, resistentes al calor, y en número y tamaño suficiente para contener las muestras de ensayo.

Preparación de la muestra de ensayo:

Debe reducirse la muestra de laboratorio como se especifica en la Norma EN 932-2 para producir una muestra de ensayo. Se calcula la masa mínima de la muestra de ensayo a partir del valor del tamaño del tamiz superior (D), en milímetros, del siguiente modo:

- si $D \geq 1,0$ mm, la masa mínima (en kilogramos) debe ser $0,2 D$;
- si $D < 1,0$ mm, la masa mínima debe ser 0,2 kg.

Procedimiento operatorio:

Se limpian y secan un número suficiente de bandejas para contener la muestra de ensayo durante el secado. Se pesa y se anota la masa de las bandejas (M_2). Se extiende la muestra de ensayo sobre las bandejas. Se pesan las bandejas que contienen la muestra de ensayo húmeda y se determina la masa de la muestra de ensayo (M_1) restando la masa de las bandejas (M_2). Se colocan las bandejas en la estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante.

Para establecer si se ha obtenido la masa constante (M_3), se procede como se indica a continuación con cada bandeja:

Se enfría la bandeja a temperatura ambiente. Se determina la masa de la muestra de ensayo (M_{d1}) restando la masa de la bandeja (M_2). Se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa durante al menos 1 h, se saca la bandeja y se deja enfriar a temperatura ambiente, y se repite la determinación de la masa de la muestra de ensayo (M_{d1}). Si M_{d1} se diferencia de M_{d1} en menos del 0,1%, se asume que se ha alcanzado la masa constante. Si la diferencia es 0,1% o superior, se vuelve a introducir la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa y se repite este procedimiento hasta que la diferencia entre dos determinaciones sucesivas sea inferior al 0,1 %. Si se utiliza más de una bandeja, M_3 es la suma de los valores M_{d1} . Se anota el valor final de M_{d1} como M_3 una vez que se ha alcanzado la masa constante (Fig. 3.54).

a **b** **c**
Fig. 3.54 a) Pesado de la bandeja vacía. b) Pesado de la bandeja conteniendo la muestra. c) Colocación de la bandeja en la estufa a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante

Cálculo y expresión de los resultados:

El valor del contenido en agua (w) es la masa de agua de la muestra de ensayo expresada como porcentaje respecto de la masa de la muestra de ensayo seca. Se calcula el contenido en agua, w , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

donde

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

M_3 es la masa constante de la muestra de ensayo secada, en gramos.

Se expresa el resultado redondeando al 0,1% más próximo.

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica los métodos de referencia utilizados para los ensayos tipo y, en caso de litigio, para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua de áridos de peso normal y ligeros.

Los métodos de referencia para los áridos de peso normal especificados son:

- un método de la balanza hidrostática para partículas de áridos retenidas sobre el tamiz de 31,5 mm;
- un método del picnómetro para partículas de áridos que pasen el tamiz de ensayo de 31,5 mm y queden retenidas sobre el tamiz de ensayo de 4 mm;
- un método del picnómetro para partículas de áridos que pasen el tamiz de ensayo de 4 mm y queden retenidas sobre el tamiz de ensayo de 0,063 mm.

El método de referencia para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua en la grava utilizada es:

- método de la balanza hidrostática para partículas de áridos retenidas sobre el tamiz de 31,5 mm.

En estos métodos se determinan tres parámetros diferentes de densidad de partículas (densidad de partículas de secado en estufa, densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente y densidad aparente de partículas) y la absorción de agua después de un periodo de inmersión de 24 h.

Principio del método:

La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina por pesada de la porción de ensayo en la condición saturada y

secada superficialmente, y de nuevo en la condición secada en estufa. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, tanto por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática como mediante pesadas en el método del picnómetro.

Equipo de ensayo:

- Estufa ventilada, controlada termostáticamente para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Balanza, con exactitud del 0,1 % de la masa de la porción de ensayo y de suficiente capacidad para ser capaz de que se cuelgue y pese en agua la cesta de tela metálica que contiene la muestra.
- Baño de agua, controlado termostáticamente, capaz de mantenerse a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.
- Termómetro, de $0,1^{\circ}\text{C}$ de exactitud.
- Tamices de ensayo, de 0,063 mm, 4 mm, 31,5 mm y 63 mm, con aberturas como se especifica en la Norma EN 933-2.
- Bandejas, que pueden calentarse en una estufa ventilada sin cambio en la masa.
- Paños absorbentes suaves secos.
- Equipo de lavado.
- Cronómetro.
- Cesta de tela metálica, o recipiente perforado de tamaño adecuado para que pueda colgarse de la balanza. La cesta o el recipiente deben ser resistentes a la corrosión.
- Tanque estanco, que contenga agua a $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ en el cual pueda colgarse la cesta libremente con una holgura mínima de 50 mm entre la cesta y los lados del tanque.

Método de la balanza hidrostática para las partículas de árido que pasen el tamiz de ensayo de 63 mm y queden retenidas en el tamiz de ensayo de 31,5 mm

Preparación de la porción de ensayo:

La toma de muestras de los áridos debe estar de acuerdo con la Norma EN 932-1 y la reducción debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-2. Se lava la muestra sobre el tamiz de 63 mm y el tamiz de 31,5 mm para eliminar las partículas más finas. Se retira cualquier partícula retenida sobre el tamiz de 63 mm. Se deja escurrir la

muestra. La masa de la porción de ensayo de árido no debe ser menor que la masa dada en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Masa mínima de las porciones de ensayo (método de la balanza hidrostática)

Tamaño de árido superior (D) (mm)	Masa mínima de las porciones de ensayo (kg)
63	15
≤ 45	7

Procedimiento de ensayo:

Se coloca la porción de ensayo preparada en la cesta de tela metálica y se sumerge en el tanque que contiene agua a una temperatura de $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$, cubriéndose con, al menos, 50 mm de agua sobre la parte superior de la cesta.

Inmediatamente después de la inmersión, se retira el aire atrapado de la porción de ensayo preparada elevando la cesta unos 25 mm por encima de la base del tanque y se deja caer 25 veces, una vez por segundo. Se deja la cesta y el árido permanecer completamente sumergidos en el agua a $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de $(24\pm0,5)$ h.

Se sacude la cesta y la porción de ensayo y se pesan en agua a una temperatura de $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$, M_2 . Se registra la temperatura del agua cuando se determina M_2 .

Si es necesario que se transfiera la porción de ensayo a un tanque diferente para la pesada, se sacude la cesta y la porción de ensayo 25 veces como se hizo previamente en el nuevo tanque antes de la pesada M_2 .

Se retira la cesta y el árido del agua y se deja escurrir durante unos pocos minutos. Con cuidado se vacía el árido de la cesta sobre uno de los paños secos. Se devuelve la cesta vacía al agua, se sacude 25 veces y se pesa en agua, M_3 (Fig. 3.55).

a **b**
Fig. 3.55 a) Pesado de la muestra contenida en la cesta metálica. b) Pesado de la cesta metálica

Con cuidado se seca la superficie del árido y se transfiere el árido a un segundo paño absorbente suave seco cuando el primero no retire más humedad. Se esparce el árido en una sola capa sobre el segundo paño, y se deja expuesto a la atmósfera apartado de la luz directa del sol o de cualquier otra fuente de calor hasta que todas las películas visibles de agua se hayan eliminado pero de forma que el árido permanezca con apariencia húmeda.

Se pesa el árido, M_1 . Se transfiere el árido a una bandeja y se coloca en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que haya alcanzado masa constante.

Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa, M_4 .

Se registran todas las masas con una exactitud del 0,1% de la masa de la porción de ensayo, M_4 , o mejor (Fig. 3.56).

a

b

c

Fig. 3.56 a) Secado de la muestra sobre uno de los paños secos. b) Pesado del árido secado superficialmente. c) Pesado del árido, después de ser secado en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ y enfriado a temperatura ambiente hasta que ha alcanzado masa constante

Cálculo y expresión de los resultados:

Se calculan las densidades de partículas (ρ_a , ρ_{rd} , ρ_{ssd} como sea apropiado) en megagramos por metro cúbico de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Densidad aparente de partículas

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Densidad de partículas secadas en estufa

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

y la absorción de agua después de la inmersión durante 24 h, WA_{24} , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde

- ρ_w es la densidad del agua a la temperatura registrada cuando se determina M_2 en megagramos por metro cúbico;
- M_1 es la masa del árido saturado y secado superficialmente, pesado al aire, en gramos;
- M_2 es la masa aparente en agua de la cesta que contiene la muestra del árido saturado, en gramos;
- M_3 es la masa aparente en agua de la cesta vacía, en gramos;
- M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

Los valores de densidad de partículas se expresan redondeando al 0,01 Mg/m³ más cercano y la absorción de agua redondeando al 0,1 % más cercano.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos* que se cumplirá la siguiente limitación en cuanto a la absorción de agua por los áridos, determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6 y que será $\leq 5\%$.

3.2.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN. METODOLOGÍA

3.2.3.1 Dosificación

Para desarrollar el método experimental, se hizo una aproximación del volumen necesario de hormigón para realizar los diferentes ensayos. Se calcularon el volumen de las diferentes probetas y se multiplicaron por el número de probetas necesarias para la realización de cada ensayo. Las dosificaciones se calcularon para una amasada de $0,01854 \text{ m}^3$ (18,54 l).

La dosificación del hormigón de referencia queda indicada en la Tabla 3.8, con una relación agua/cemento de 0.56.

Tabla 3.8 Dosificación de referencia

Componente	Peso por m^3 (kg)	Peso por amasada (kg)
Cemento	300	5,57
Agua	169	3,13
Arena	1032	19,14
Gravilla	517	9,59
Grava	437	8,11

Este trabajo de investigación centra su atención en comparar las características físico-mecánicas entre un hormigón de referencia y hormigones con la introducción de ROCA (cáscara de almendra) en sustitución del árido grueso. Para poder llevar a cabo el desarrollo experimental se han diseñado 3 mezclas de hormigón con incorporación de cáscara de almendra a partir de la dosificación estándar para un hormigón de referencia sin alterar la relación agua/cemento.

Para la confección de los hormigones con ROCA, se ha sustituido el 10%, 20% y 30% del peso de la grava del hormigón de referencia. La nomenclatura utilizada para estos

hormigones es H10%-C, H20%-C y H30%-C, respectivamente, denominando H-P al hormigón de referencia.

El criterio seguido para realizar la sustitución en peso y no en volumen fue debido a que la mezcla suministrada de árido natural tenía menos contenido de granulometría gruesa de lo que era de esperar, alrededor del 22% del total de la mezcla, por lo que si se procedía a dosificar en volumen, la cantidad de cáscara de almendra era mínima y poco representativa para determinar de una manera precisa las diferencias entre los diferentes hormigones fabricados.

Las distintas dosificaciones de los hormigones fabricados con cáscara de almendra para una amasada de 18,54 litros están recogidas en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Dosificaciones según amasada

Mezclas	Cemento (kg)	Áridos convencionales (kg/m ³)			Cáscara de almendra (kg)	Agua (kg)
		Arena	Gravilla	Grava		
H/P	5,57	19,14	9,59	8,11	----	3,13
H/10	5,57	19,14	9,59	7,18	0,95	3,13
H/20	5,57	19,14	9,59	6,23	1,89	3,13
H/30	5,57	19,14	9,59	5,29	2,84	3,13

3.2.3.2 Preparación de los áridos

A fin de corregir las posibles alteraciones de humedad de los áridos se procedió a introducir éstos en sacos de polipropileno y procediendo 24 h antes de la fabricación del hormigón a extender en bandejas la porción de áridos a emplear para que se secaran a temperatura ambiente.

Dada la gran capacidad de absorción de agua de la cáscara de almendra, lo cual provocaría absorción del agua de amasado y curado, dando una baja trabajabilidad del

hormigón, además de una desecación y una peor hidratación del cemento, se procedió a hidratar la misma bajo inmersión en un cubo con agua por un periodo de 24 h. Antes de iniciar la fabricación del hormigón se procedió a extender en bandejas por espacio de unos 15 minutos la cáscara de almendra sacada del cubo para someterla a un secado superficial a temperatura ambiente (Fig. 3.57).

Fig. 3.57 Inmersión de la cáscara de almendra en cubo con agua para su saturación y posterior extensión de la misma sobre bandeja para su secado superficial a temperatura ambiente

3.2.3.3 Proceso de elaboración de la mezcla

Una vez pesados todos los componentes, se procedió a su mezclado. Para el amasado se ha utilizado una hormigonera de eje vertical, marca WISKEHRS modelo MK-130, con capacidad de 130 litros (Fig. 3.58).

Fig. 3.58 Hormigonera WISKEHRS modelo MK-130, con capacidad de 130 litros para el amasado

En primer lugar se colocó en la hormigonera aproximadamente la mitad del peso total del agua de amasado y todo el cemento, hasta conseguir una mezcla homogénea. A continuación, se añadió la mitad del árido con una cuarta parte del agua y después se añadió la otra mitad del árido con el resto de agua. Se llevó a cabo el amasado por espacio de unos 4 minutos aproximadamente. Antes del vertido del hormigón en los moldes, se mezcló la masa manualmente con una paleta para comprobar la homogeneidad de la pasta.

3.2.3.4 Preparación y llenado de los moldes

La preparación de los moldes se ha realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-1:2013 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes*, en la que se especifica la forma, dimensiones y tolerancias de probetas para ensayo de hormigón cúbicas, cilíndricas y prismáticas y de los moldes requeridos para fabricarlas. Los moldes son estancos y no absorbentes (Fig. 3.59).

a **b** **c**
Fig. 3.59 Moldes utilizados. a) Moldes cilíndricos BAUER SÜDLOHN utilizados para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia a compresión de probetas; Determinación de la resistencia a tracción indirecta de probetas; Profundidad de penetración de agua bajo presión; Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido.
b) Moldes prismáticos BAUER SÜDLOHN utilizados para la para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia a flexión de probetas.
c) Moldes cúbicos BAUER SÜDLOHN utilizados para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial

Antes del llenado se cubrió la parte interior del molde con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiriera al molde.

Para el llenado se procuró un sitio adecuado para el correcto emplazamiento de las probetas, vigilando especialmente la nivelación del terreno y otro factores como la protección frente al soleamiento excesivo en verano o el riesgo de heladas en invierno, las vibraciones derivadas de maquinaria, o la posibilidad de caída de objetos sobre las probetas, entre otros. Se tuvo muy en cuenta no almacenar probetas apilándolas unas encima de otras.

El número mínimo de capas con las que se rellenaron las probetas fue de tres en función de su consistencia, procedimiento de compactación, forma y dimensiones de la misma.

3.2.3.5 Compactación del hormigón

La compactación del hormigón se ha realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*, en la que describe los métodos para la fabricación y curado de probetas destinadas a la realización de ensayos de resistencia. Cubre la preparación y llenado de los moldes, la compactación del hormigón, el nivelado de la superficie, el curado de las probetas de ensayo y su transporte.

El hormigón se compactó inmediatamente después de su vertido en el molde, de forma tal que se obtuvo una compactación completa sin una excesiva segregación o aparición de flujo de lechada.

En las probetas prismáticas considerando un asentamiento del hormigón inferior a 40 mm, cada capa se compactó por vibración mecánica mediante vibrador interno aplicando la vibración durante el mínimo tiempo necesario para lograr la compactación completa del hormigón.

En todo momento se evitó la sobrevibración evitando con ello pérdidas de aire ocluido. Se tuvo la precaución de no dañar el molde. El vibrador se mantuvo en posición vertical y no se permitió que tocara ni las paredes ni el fondo del recipiente (Fig. 3.60).

Fig. 3.60 Vibrador eléctrico portátil para compactación del hormigón en probetas prismáticas

Para la compactación del resto de las probetas considerando un asentamiento del hormigón igual o mayor a 40 mm, se utilizó la compactación manual. Para ello se distribuyeron los golpes de la barra de compactar o maza de manera uniforme sobre la sección transversal del molde.

Se tuvo cuidado de que la barra de compactar o maza no golpeará con fuerza la parte inferior del molde, cuando se compactara la primera capa, ni penetrara significativamente en la capa interior. Se sometió el hormigón a un número suficiente de golpes por capa, normalmente de 25 para hormigones con una consistencia equivalente a las clases de asentamiento S1 y S2, con objeto de eliminar las burbujas del aire atrapado, pero no del aire ocluido. Después de compactar cada capa, se golpeó lateralmente el recipiente de forma cuidadosa con el mazo, hasta que las burbujas de aire mayores dejaron de aparecer en la superficie y se hubieron eliminado las depresiones dejadas por la barra de compactar o la maza (Fig. 3.61).

a

b

Fig. 3.61 a) Compactación por vibración mecánica mediante vibrador interno.
b) Compactación manual mediante barra de compactar

3.2.3.6 Curado de las probetas de ensayo

El curado de las probetas de ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*, en la que describe los métodos para la fabricación y curado de probetas destinadas a la realización de ensayos de resistencia. Cubre la preparación y llenado de los moldes, la compactación del hormigón, el nivelado de la superficie, el curado de las probetas de ensayo y su transporte.

Con objeto de evitar la desecación, la superficie expuesta de las probetas se mantuvo cubierta con una arpillera húmeda inmediatamente después de la fabricación. Además, durante el periodo de permanencia de las probetas en los moldes, estos se conservaron dentro de una bolsa sellada (Fig. 3.62).

Las probetas se mantuvieron en el molde al menos 24 horas, pero no más de 3 días, protegidas en todo momento de impactos, vibraciones y deshidratación, a una temperatura de $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

Después de ser retiradas las probetas de los moldes, se curaron hasta inmediatamente antes del ensayo, en una cámara a $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa $\geq 95\%$. Se

evitaron las pérdidas de humedad y las desviaciones de la temperatura exigidas en todas las etapas del transporte (Figs. 3.63 y 3.64).

Fig. 3.62 Superficie expuesta de las probetas cubierta con una arpillera húmeda inmediatamente después de la fabricación. Además, durante el periodo de permanencia de las probetas en los moldes, estos se conservaron dentro de una bolsa sellada

a

b

c

Fig. 3.63 Retirada de las probetas de los moldes. a) Probetas cilíndricas. b) Probetas prismáticas. c) Probetas cúbicas

Fig. 3.64 Curado de las probetas hasta inmediatamente antes del ensayo, en una cámara a $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa $\geq 95\%$

3.2.3.7 Nomenclatura empleada para las probetas de ensayo

Se establece la siguiente codificación para la identificación de las probetas sometidas a diferentes ensayos durante la etapa experimental (Tablas 3.10 y 3.11).

Tabla 3.10 Codificación de referencia

Código mezcla	Designación de la probeta
H/P	Sin cáscara de almendra (probeta de referencia)
H/10	Sustitución del 10% en peso de la grava por cáscara de almendra
H/20	Sustitución del 20% en peso de la grava por cáscara de almendra
H/30	Sustitución del 30% en peso de la grava por cáscara de almendra

Tabla 3.11 Codificación según tipo de ensayo

Código	Designación del ensayo
A	Absorción de agua por capilaridad (UNE 83982:2008)
Ac	Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos (UNE-EN 12504-4:2006)
B	Profundidad de penetración de agua bajo presión (UNE-EN 12390-8:2009) Resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2010)
C	Resistencia a compresión (UNE-EN 12390-3:2009)
F	Resistencia a flexión (UNE-EN 12390-5:2009)
H	Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX)
T	Transmisión térmica en régimen estacionario (UNE-EN ISO 8990:1997)

La codificación final utilizada donde quedan reflejados los ensayos realizados a las probetas fabricadas y el número de molde utilizado, es la indicada en la Tabla 3.12, donde:

código mezcla – ensayo – periodo en días – identificación del molde utilizado

Tabla 3.12 Codificación según tipo de mezcla, ensayo, periodo e identificación del molde utilizado

Denominación			
H/P-C-7-24	H/10-C-31	H/30-B-32	H/P-Ac-1
H/P-C-21-31	H/10-C-18	H/30-B-31	H/P-Ac-2
H/10-C-7-24	H/10-C-24	H/30-B-24	H/P-Ac-3
H/10-C-21-31	H/20-C-7	H/P-F-15	H/10-Ac-1
H/20-C-7-9	H/20-C-4	H/10-F-19	H/10-Ac-2
H/20-C-21-21	H/20-C-15	H/20-F-22	H/10-Ac-3
H/30-C-7-24	H/30-C-13	H/30-F-11	H/20-Ac-1
H/30-C-21-31	H/30-C-22	H/P-A-23	H/20-Ac-2
H/10-C-90-1	H/30-C-29	H/10-A-24	H/20-Ac-3
H/10-C-90-28	H/P-B-10	H/20-A-18	H/30-Ac-1
H/20-C-90-36	H/P-B-19	H/30-A-31	H/30-Ac-2
H/20-C-90-16	H/P-B-12	H/30-B-32	H/30-Ac-3
H/30-C-90-31	H/10-B-12	H/P-H-20	H/P-T-1
H/30-C-90-2	H/10-B-19	H/P-H-8	H/P-T-2
H/P-C-9	H/10-B-11	H/10-H-1	H/10-T-1
H/P-C-31	H/20-B-25	H/10-H-6	H/10-T-2
H/P-C-24	H/20-B-30	H/20-H-13	H/20-T-1
	H/20-B-5	H/20-H-5	H/20-T-2
		H/30-H-3	H/30-T-1
		H/30-H-15	H/30-T-2

3.2.4 HORMIGÓN. ENSAYOS

3.2.4.1 Ensayos sobre hormigón fresco

UNE-EN 12350-2:2009

Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma especifica un método para determinar la consistencia de un hormigón fresco mediante el ensayo de asentamiento. El ensayo de asentamiento es sensible a los cambios en la consistencia del hormigón cuando la medida del asentamiento se sitúa entre 10 mm y 210 mm. Más allá de estos valores extremos, la medición del asentamiento puede ser inadecuada y deberían considerarse otros métodos de medida de la consistencia. Este ensayo no es apropiado si el asentamiento continúa produciéndose después de un período de 1 min después del desmoldado. Este ensayo no es aplicable cuando el tamaño máximo del árido en el hormigón es mayor que 40 mm.

Fundamento del método:

El hormigón fresco se compacta en un molde con forma de tronco de cono. Cuando el molde se levanta en dirección vertical, el descenso producido por el asiento del hormigón da una medida de su consistencia.

Equipo de ensayo:

- Molde para conformar la probeta de ensayo, fabricado con metal que no sea fácilmente atacable por la pasta de cemento y de un espesor no inferior a 1,5 mm. El interior del molde debe ser liso y libre de protuberancias tales como cabezas de remaches, y tampoco debe presentar ningún tipo de abolladuras. El molde debe tener forma de tronco de cono con las siguientes dimensiones interiores: diámetro de la base: (200 ± 2) mm; diámetro de la parte superior: (100 ± 2) mm; altura: (300 ± 2) mm.

La base y la parte superior deben estar abiertas y deben ser paralelas entre sí, formando ángulo recto con el eje del cono. El molde debe estar provisto, en la parte superior, de dos asas, y en la parte inferior de dos grapas de fijación o piezas fijas de pie para sostenerlo firmemente. Es aceptable un molde que pueda sujetarse en la base, siempre que el dispositivo de sujeción pueda liberarse completamente sin movimiento del molde y sin interferir en el asentamiento del hormigón (cono Abrams).

- Barra compactadora, de sección transversal circular, recta, fabricada con acero, con un diámetro de (16 ± 1) mm, y de (600 ± 5) mm de longitud, y con sus extremos redondeados.
- Tolva de llenado, fabricada con material no absorbente y no fácilmente atacable por la pasta de cemento y provista de un collarín que le permita acoplarse a la parte superior del molde.
- Regla, graduada desde 0 mm a 300 mm, con divisiones no superiores a 5 mm, y con el punto de cero en uno de los extremos de la regla.
- Bandeja/chapa de base, una placa rígida, plana, no absorbente, u otra superficie en la cual se pueda colocar el molde.
- Cronómetro o reloj que permita la apreciación de 1 s.

Procedimiento de ensayo:

Se humedece el molde y la bandeja base y se coloca el molde sobre la bandeja base en una superficie horizontal. Durante el proceso de llenado se agarra o sujeta el molde firmemente contra la bandeja base, bien anclándolo perfectamente o bien pisando en las dos piezas de pie. Se llena el molde en tres capas, de modo que cada una ocupe aproximadamente un tercio de la altura del molde una vez compactado el hormigón. Se compacta cada capa con 25 golpes con la barra compactadora. Se distribuyen uniformemente los golpes en la sección transversal de cada capa. Para la capa inferior, se necesitará inclinar ligeramente la barra compactadora y posicionar la mitad de los golpes aproximadamente en forma espiral hacia el centro. Se compacta la segunda y la última capa a lo largo de toda su altura, de forma que la barra penetre ligeramente en la capa inferior. En el llenado y compactado de la última capa, se procurará que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactado (Fig. 3.65).

Fig. 3.65 Procedimiento de ensayo de asentamiento mediante el cono Abrams

Si como consecuencia del proceso de compactado de la última capa resultase que falta hormigón y que por tanto está por debajo del nivel superior del molde, se añade más hormigón para que siempre haya exceso sobre el nivel superior del molde. Después de compactar la última capa, se retira el hormigón sobrante por medio de una acción de corte y rodillo de la barra compactadora. Se retira el hormigón sobrante de la superficie o placa base. Se retira el molde levantándolo con cuidado en dirección vertical. La operación de levantar el molde debe realizarse en un tiempo de 2 s a 5 s, de una manera uniforme, sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión.

La operación completa, desde el comienzo del llenado del molde hasta la retirada del mismo, será realizada sin interrupción y debe completarse en un tiempo no superior a 150 s. Inmediatamente después de retirar el molde, se mide y se registra el asentamiento h determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada (Fig. 3.66).

a

b

c

Fig. 3.66 a) Sujeción del molde firmemente contra la bandeja base pisando en las dos piezas de pie. Llenado del molde en tres capas, de modo que cada una ocupe aproximadamente un tercio de la altura del molde una vez compactado. b) Compactado de cada capa con 25 golpes con la barra compactadora. c) Retirado del molde, medición y registro del asentamiento h determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 31 Hormigones, epígrafe 31.5 *Docilidad del hormigón*, que la docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento, según UNE-EN 12350-2. Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono, serán los siguientes (Tabla 3.13):

Tabla 3.13 Distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0 - 2
Plástica (P)	3 - 5
Blanda (B)	6 - 9
Fluida (F)	10 - 15
Líquida (L)	16 - 20

Salvo en aplicaciones específicas que así lo requieran, se evitará el empleo de las consistencias seca y plástica. No podrá emplearse la consistencia líquida, salvo que se

consiga mediante el empleo de aditivos superplastificantes. En todo caso, la consistencia del hormigón que se utilice será la especificada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, definiendo aquella por su tipo o por el valor numérico de su asentamiento en cm.

3.2.4.2 Ensayos sobre hormigón endurecido

UNE-EN 12390-3:2009

Ensayos de hormigón endurecido.

Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma especifica un método para la determinación de la resistencia a compresión de probetas de ensayo de hormigón endurecido.

Fundamento:

Las probetas se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión. Se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

Equipo de ensayo:

- Prensa hidráulica de 300 t
- Devastadora

Probetas de ensayo:

Las probetas utilizadas son cilíndricas que cumplen las especificaciones de la Norma EN 12390-2. Las dimensiones son Ø 150 mm y altura 300 mm.

Ajuste de las probetas de ensayo:

Dado que es necesario reducir las dimensiones de las probetas, éstas deben rectificarse. Se emplea el método de pulido introduciéndolas en la devastadora (Fig. 3.67).

Fig. 3.67 Reducción de las dimensiones de las probetas (rectificación) mediante el método de pulido introduciéndolas en la devastadora

Procedimiento de ensayo:

a) Preparación y posicionamiento de las probetas

Se limpian los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos. No se debe usar ningún suplemento distinto de los platos auxiliares o bloques espaciadores entre la probeta y los platos de ensayo de la máquina.

Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos.

Las probetas deben centrarse respecto al plato inferior con una aproximación de $\pm 1 \%$ de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica o del diámetro normalizado de la probeta cilíndrica (Fig. 3.68).

Fig. 3.68 Colocación de la probeta cilíndrica en la prensa hidráulica de 300 t

b) Carga

Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2.\text{s}$). Se aplica la carga inicial, que no debe exceder de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no se pueda soportar más carga. Se registra la carga máxima indicada en kN (Fig. 3.69).

Fig. 3.69 Registro de la carga máxima indicada en kN

c) *Valoración del tipo de rotura*

Una vez rota la probeta, se procede a valorar el tipo de rotura, indicando si ha sido una rotura satisfactoria o no. En el caso de que se produzca una rotura no satisfactoria se hará constar con una referencia al tipo de rotura más parecido que esta designado por esta norma según las Figs. 3.70; 3.71 y 3.72.

Fig. 3.70 Roturas satisfactorias en probetas cilíndricas

Fig. 3.71 Roturas no satisfactorias en probetas cilíndricas

H/P-C-9

H/P-C-31

H/P-C-24

H/10-C-31

H/10-C-18

H/10-C-24

H/20-C-7

H/20-C-4

H/20-C-15

H/30-C-13

H/30-C-22

H/30-C-29

Fig. 3.72 Roturas de probetas cilíndricas

Expresión de los resultados:

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

donde

- f_c es la resistencia a compresión, en MPa (N/mm²);
 F es la carga máxima de rotura, en N;
 A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta.

La resistencia a compresión debe expresarse con aproximación de 0,1 MPa (N/mm²).

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 31 Hormigones, epígrafe 31.4 *Valor mínimo de la resistencia* que en los hormigones estructurales, la resistencia de proyecto f_{ck} no será inferior a 20 N/mm² en hormigones en masa, ni a 25 N/mm² en hormigones armados o pretensados.

UNE-EN 12390-5:2009

Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica un método para determinar la resistencia a flexión de probetas de hormigón endurecido.

Fundamento:

Se somete una probeta prismática a un momento flector mediante la aplicación de una carga a través de rodillos superiores e inferiores, Se registra la carga máxima alcanzada y se calcula la resistencia a flexión.

Equipo de ensayo:

- Prensa multiensayo de 20 t
- Pie de rey

Probetas de ensayo:

Las probetas de ensayo utilizadas son prismáticas de dimensiones 150x600x150 mm de acuerdo con las especificaciones de la Norma EN 12390-1. Las probetas se han fabricado en moldes de acuerdo con las Normas EN 12350-1 y EN 12390-2. Se han comprobado las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey y cumplen las tolerancias especificadas en la Norma EN 12390-1:2000 (Fig. 3.73).

Fig. 3.73 Comprobación de las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey

Procedimientos de ensayo:

Preparación y colocación de las probetas

Se limpian todas las superficies de los soportes del dispositivo de ensayo, y se eliminan de las caras de la probeta que van a estar en contacto con los rodillos todo el polvo u otros materiales extraños. En las probetas almacenadas en agua se elimina el exceso de humedad de las caras de las probetas antes de su colocación en la máquina de

ensayo. Se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo, correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores. Se comprueba que la dirección de referencia de la carga es perpendicular a la dirección de hormigonado de la probeta (Fig. 3.74).

Fig. 3.74 Preparación del dispositivo de ensayo, prensa multiensayo de 20 t, para la colocación de la probeta correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores

Carga

La carga no se comienza a aplicar hasta que los rodillos de carga y los de apoyo descansen firmemente sobre la probeta. Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$) a 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$).

Tras aplicarse la carga inicial, que no debe exceder aproximadamente el 20% de la carga de rotura, se aplica la carga de forma continua y sin brusquedades con el incremento constante seleccionado $\pm 10\%$, hasta que la probeta no soporte una carga mayor. Se debe anotar la carga máxima alcanzada (Fig. 3.75).

Fig. 3.75 Registro de la carga máxima alcanzada

Expresión de los resultados: (Fig. 3.76)

La resistencia a flexión viene dada por la fórmula:

$$f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

donde

f_{cf}	es la resistencia a flexión, en MPa (N/mm ²);
F	es la carga máxima, en N;
l	es la distancia entre los rodillos soportes, en mm;
d_1 y d_2	son las dimensiones laterales de la probeta, en mm

La resistencia a flexión se expresa con una aproximación de 0,1 MPa (N/mm²).

H/P-F-15

H/10-F-19

H/20-F-22

H/30-F-11

Fig. 3.76 Rotura de probetas a flexión

UNE-EN 12390-6:2010

*Ensayos de hormigón endurecido.
Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma europea especifica un método para determinar la resistencia a tracción indirecta sobre probetas cilíndricas de hormigón endurecido.

Fundamento:

Se somete una probeta cilíndrica a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante provoca que la probeta rompa a tracción.

Equipo de ensayo:

- Prensa hidráulica de 300 t
- Pie de rey

Probetas de ensayo:

Las probetas utilizadas han sido cilíndricas, de diámetro 150 mm y altura 300 mm, fabricadas conforme a la norma UNE-EN 12390-2. Serán las mismas que las que se utilizan en el ensayo de penetración de agua bajo presión. Se comprueban las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey cumpliendo las tolerancias especificadas en la norma UNE EN 12390-1:2000 (Fig. 3.77).

Fig. 3.77 Comprobación de las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey

Procedimiento de ensayo:

Preparación de la probeta

Se limpian todas las superficies de los soportes del dispositivo de ensayo, bandas, piezas de carga y platos. Se limpian y eliminan de la superficie de la probeta que vaya a estar en contacto con las bandas de apoyo la arena suelta u otros materiales extraños.

Colocación de la probeta

La probeta se coloca centrada en la prensa, si se desea utilizando el dispositivo opcional. Se sitúan con cuidado las bandas de apoyo y, si fuera necesario, las piezas de carga, a lo largo de la parte superior e inferior del plano de carga de la probeta. Asegurarse durante la carga que el plato superior es paralelo al inferior (Fig. 3.78).

Fig. 3.78 Colocación de la probeta centrada en la prensa situando con cuidado las bandas de apoyo a lo largo de la parte superior e inferior del plano de carga de la probeta

Carga

Asegurarse que la probeta permanece centrada cuando comienza la carga, bien sea por medio del dispositivo o mediante soportes temporales. Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 MPa/s ($\text{N/mm}^2\cdot\text{s}$) a 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2\cdot\text{s}$). Después de la aplicación de la carga inicial, que no debe sobrepasar aproximadamente el 20% de la carga de rotura, la carga se aplica sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no soporte una carga mayor. Se anota la máxima carga alcanzada.

Expresión de los resultados (Fig. 3.79):

La resistencia a tracción indirecta viene dada por la fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

donde

f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta, en megapascuales (MPa) o en newtons por milímetro cuadrado (N/mm²);

F es la carga máxima, en newtons (N);

L es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros (mm);

d es la dimensión de la sección transversal, en milímetros (mm).

La resistencia a tracción indirecta se expresa con una aproximación de 0,05 MPa (o N/mm²).

H/P-B-10

H/P-B-19

H/P-B-12

H/10-B-12

H/10-B-19

H/10-B-11

H/20-B-25

H/20-B-30

H/20-B-5

H/30-B-32

H/30-B-31

H/30-B-24

Fig. 3.79 Rotura de probetas a tracción indirecta

UNE-EN 12390-8:2009

*Ensayos de hormigón endurecido.
Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma especifica un método para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigones endurecidos que han sido curados en agua.

Fundamento:

Se aplica agua a presión a la superficie del hormigón endurecido. A continuación se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua.

Equipo de ensayo:

- Prensa hidráulica de 300 t.
- Equipo de agua a presión.

- Balanza, de capacidad adecuada, con una exactitud del 0,1% de la masa de la muestra ensayo.
- Estufa de secado ventilada, controlada por un termostato para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Regla.
- Cartulina de plástico.

Probetas de ensayo:

Las probetas utilizadas han sido cilíndricas, de diámetro 150 mm y altura 300 mm, fabricadas conforme a la norma UNE-EN 12390-2. Han sido las mismas que las que se han utilizado en el ensayo de resistencia a tracción indirecta.

Procedimiento de ensayo:

Preparación de la probeta de ensayo

Inmediatamente después de desmoldar la probeta, se desbasta la superficie de la cara de la probeta que va a estar expuesta a la presión del agua, con un cepillo de púas metálicas y se cura la probeta en agua de acuerdo con los procedimientos indicados en la Norma EN 12390-2.

Aplicación del agua a presión

El ensayo debe comenzar cuando las probetas tengan al menos una edad de 28 días. Antes de iniciar el ensayo, se someten las probetas a un periodo de secado previo de 72 horas en estufa ventilada a $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$. La probeta se coloca en el equipo de ensayo y se aplica al agua una presión de (500 ± 50) kPa durante (72 ± 2) h. Durante el ensayo, se observa periódicamente el estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua. Si se observaran filtraciones, se reconsiderará la validez del resultado y se registra el hecho en el informe (Fig. 3.80).

a

b

Fig. 3.80 a) Secado de probetas en estufa ventilada. b) Colocación de las probetas en el equipo de presión

Examen de la probeta

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retira la probeta del equipo de ensayo. Se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua. Cuando se rompa la probeta, y durante el examen, la cara de la probeta expuesta a la presión de agua se situará en el fondo. Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración.

A continuación, se procede a calcular la profundidad media de penetración. Para ello, se determinara el área encerrada por el frente de penetración, pesando un cartulina de plástico con las dimensiones de la probeta y anotando su masa. Después, se apoya la cartulina sobre la cara partida de la probeta y se marca el frente de penetración. Se recorta el perímetro exterior siguiendo el dibujo marcado, para obtener una reproducción del frente de penetración. Se pesa esta reproducción y se anota su masa. Con estas dos masas y las dimensiones de la probeta se puede determinar el área de penetración, lo que permite a su vez calcular la profundidad media de penetración.

Para finalizar, se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al mm más próximo (Fig. 3.81).

Fig. 3.81 a) Pesada de la cartulina de dimensiones 150x300 mm. b) Pesada de la cartulina del frente de penetración. c) Medida de la profundidad de penetración máxima

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VII Durabilidad, Art. 37 Durabilidad del hormigón y de las armaduras, epígrafe 37.3.3 *Impermeabilidad del hormigón*, que para la clase de exposición ambiental IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F y Qb la profundidad de penetración máxima del agua a presión debe ser 50 mm, mientras que la profundidad de penetración media debe ser 30 mm.

Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund

Objeto y campo de aplicación:

Esta norma tiene por objeto describir un método de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido, que depende de la interconexión de la red de poros existente en el interior del material.

Fundamento:

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (k) del hormigón endurecido se determina mediante la medida periódica de la ganancia de peso de una probeta en contacto con una lámina de agua de 5 mm de altura.

Equipo de ensayo:

- Balanza, con capacidad mínima de 3000 g y precisión de 0,1 g.
- Cronómetro y reloj.
- Recipiente, de material impermeable, con la base plana y superficie superior a la de la sección de la probeta, con tapa hermética, y una altura mínima de 80 mm, de tal manera que queden, al menos, 20 mm libres entre la probeta y la tapa.
- Base de apoyo de la probeta, de material rígido, no absorbente, y que asegure una superficie mínima de contacto entre la probeta y el agua de al menos el 95%.
- Estufa de secado ventilada, controlada por un termostato para mantener una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Nivel de burbuja.

Probetas de ensayo:

Las probetas utilizadas han sido cilíndricas de diámetro 150 mm y espesor mínimo de 100 mm, obtenidas del corte de una probeta cilíndrica, de diámetro 150 mm y altura 300 mm y fabricada conforme a la Norma UNE-EN 12390-2 (Fig. 3.82).

Fig. 3.82 Probetas para el ensayo de absorción de agua por capilaridad. Método Fagerlund

Procedimiento de ensayo:

Antes de iniciar el ensayo, se acondicionan previamente las probetas según el procedimiento descrito en la norma UNE 83966. Este procedimiento consiste en colocar las probetas de hormigón en un recipiente hermético con suficiente distancia entre ellas de al menos 10 mm. Se pesan las probetas periódicamente hasta obtener masa constante.

Después de acondicionadas las probetas, se colocan sobre la base de apoyo dispuesta en el interior del recipiente previamente nivelado con el nivel de burbuja. Se introduce el agua en el recipiente citado, teniendo cuidado de no mojar la superficie del hormigón, hasta conseguir una lámina de agua con una altura de (5 ± 1) mm en la cara lateral de la probeta. Se mantiene el nivel de agua constante a lo largo del ensayo, añadiendo agua si fuera necesario, y el recipiente tapado herméticamente para evitar la evaporación por las caras de la probeta (Fig. 3.83).

a

b

Fig. 3.83 a) Medición de la lámina de agua. b) Recipientes de ensayo tapados herméticamente

Se pone en marcha el cronómetro y se pesa la probeta a intervalos de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, etc. Los intervalos de pesada podrán tener una variación de hasta 10% con relación al tiempo especificado. A partir de las 96 h los intervalos pueden variar según la conveniencia del operador. Se recomienda no sobrepasar un periodo superior a 72 h sin realizar la pesada.

Todas las operaciones de pesada deben ser precedidas por un ligero secado de la cara de la probeta en contacto con el agua mediante un paño ligeramente humedecido para retirar las gotas condensadas, y deben ser realizadas en un periodo de tiempo inferior, lo que ocurrirá a 30 s desde que se introducen las probetas en el recipiente.

Se repite el procedimiento hasta que la probeta alcance la constancia de masa, esto ocurrirá cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas, espaciadas un mínimo de 24 h, sea inferior al 0,1% (Fig. 3.84).

a

b

Fig. 3.84 a) Secado de las caras de la probeta. b) Pesada de la probeta de ensayo

Cálculo y expresión de los resultados:

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (K), se calcula por medio de las siguientes expresiones:

$$k = \frac{\delta_a \cdot \varepsilon_e}{10 \cdot \sqrt{m}}$$

$$\varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta_a}$$

donde

- K es el coeficiente de absorción capilar ($\text{kg}/\text{m}^2\text{min}^{0,5}$);
- δ_a es la densidad del agua (se considera el valor de $1 \text{ g}/\text{cm}^3$);
- ε_e es la porosidad efectiva del hormigón (cm^3/cm^3);
- m es la resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar (min/cm^2);
- Q_n es el peso de la probeta al alcanzar la saturación ($t = t_n$) (g);

- Q_0 es el peso de la probeta antes de empezar el ensayo ($t = 0$) (g);
- A es la sección de la probeta (cm^2);
- h es el espesor de la probeta (cm);
- t_n es el periodo de tiempo necesario para alcanzar la saturación (min).

UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

Ensayos de hormigón endurecido.

Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial

Objeto y campo de aplicación:

Esta especificación técnica describe el ensayo de resistencia del hormigón al descascarillado frente al hielo-deshielo tanto para el contacto con agua como con disolución de cloruro sódico. Se puede utilizar el ensayo para comparar nuevos componentes o nuevas composiciones de hormigón frente a un componente o una composición de hormigón que sea conocida, para proporcionar una funcionalidad adecuada en el ambiente particular, o para evaluar los resultados del ensayo comparándolos con valores numéricos absolutos basados en experiencias particulares.

Se dan dos tipos de deterioro del hormigón cuando se produce el ataque de hielo-deshielo, descascarillado y daño microestructural interno.

Ha sido necesario adaptar el procedimiento experimental normalizado, a las limitaciones que se derivan del equipo utilizado y las características de las probetas ensayadas, procurando, en todo momento, obtener resultados significativos.

Fabricación de las probetas de ensayo:

Las probetas de ensayo se preparan de acuerdo con la Norma EN 12390-2, excepto en el curado. Se registrarán las condiciones de temperatura y humedad relativa del acondicionamiento.

Ensayo del cubo (Método alternativo):

Principio

Se someten al ataque del hielo-deshielo probetas cúbicas sumergidas en agua desionizada o en disolución de cloruro sódico (NaCl) al 3%. Se evalúa la resistencia al hielo-deshielo a partir de la medición de la pérdida de masa del cubo después de 28 ciclos de hielo-deshielo, aunque se realizarán medidas de la pérdida de la masa de las probetas en ciclos intermedios.

Equipo necesario

- Equipo para fabricar cubos de hormigón de 100 mm según la Norma EN 12390-2.

Nota: al no disponer de moldes de estas características, se utilizaron moldes cúbicos de 150 mm;

- Cámara con una temperatura de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y una evaporación de $(45 \pm 15) \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$;

- Balanza, con una precisión dentro de $\pm 0,05 \text{ g}$;

- Arcón congelador;

- Recipiente para el baño de agua;

- Cepillo, con cerdas cortas (aproximadamente 20 mm), rígidas para cepillar el material que se ha desprendido.

Preparación de las probetas de ensayo

El ensayo requiere cuatro cubos de 100 mm (2 recipientes con 2 cubos cada uno).

Nota: al no disponer de espacio en el arcón congelador se procedió a realizar el ensayo sobre dos cubos. Durante el primer día después del hormigonado se procede a actuar de acuerdo a lo comentado en el apartado de fabricación de probetas.

Después de (24 ± 2) h, se retiran los cubos de los moldes y se colocan al baño de agua a una temperatura de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Cuando los cubos cumplan 7 días, se retiran del baño de agua y se colocan en una cámara climática donde se almacenan durante 20 días.

Procedimiento de ensayo:

A los 27 días, 1 día antes de empezar el ensayo de congelación, se determina la masa de los dos cubos con una precisión de 1 g. Luego se colocan los cubos fabricados en el recipiente para el ensayo de congelación de manera que las caras que estaban boca arriba durante el hormigonado estén perpendiculares a la base del recipiente y que exista aproximadamente 10 mm de distancia entre los cubos. Se vierte el medio de congelación hasta que cubra los cubos a una altura de (25 ± 5) mm.

Después de 24 horas, se determina la masa de cada cubo y se calcula la cantidad de medio de congelación absorbido en 24 horas a partir del aumento de masa. A los 28 días se colocan los recipientes conteniendo los cubos sumergidos en el medio de congelación en el congelador. Se cambian los recipientes una vez a la semana y se giran los mismos 180° (Fig. 3.85).

a

b

Fig. 3.85 a) Probetas en el recipiente junto con el medio de congelación. b) Probetas en el arcón congelador

Inmediatamente después de 16 horas de la fase de refrigeración se introducen las probetas en un baño de agua a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, es decir, los ciclos son: 16 horas en congelador y 8 horas saturándose en agua.

Si en casos excepcionales, es necesario interrumpir el ensayo o este prosigue durante el fin de semana, si no se utiliza el equipo de ensayo automático, se deben mantener los recipientes con los cubos en estado de congelación a $(-15 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Después de (7 ± 1) , (14 ± 1) , (28 ± 1) , (42 ± 1) y 24 ciclos de hielo-deshielo, se realiza el siguiente procedimiento durante el deshielo de las probetas:

- Se inspeccionan visualmente los cubos para determinar si se han producido fisuras u otro cambio substancial y si la pérdida está sobre la superficie o ha ocurrido en los bordes.
- Se cepillan los cubos con el cepillo haciendo una ligera presión de manera que las piezas que ya se hayan soltado sean, desprendidas y puedan ser recogidas.
- Antes de empezar la próxima fase de enfriamiento, se llena el recipiente con los cubos con nuevo medio de congelación a $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Se devuelve el recipiente al cajón.
- Se secan todas las piezas que hayan sido desprendidas por la acción de la congelación hasta una masa constante a $(110 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3.86).

a

b

Fig. 3.86 a) Cepillado de los cubos de hormigón con cepillo de púas. b) Secado de las muestras desprendidas de las probetas.

Se determina la masa acumulada del material desprendido secado con una precisión de 0,1 g a partir de la ecuación:

$$m_{s,n} = m_{s,antes} + m_{c+f+b}$$

donde

- $m_{s,n}$ es la masa acumulada del material desprendido secado después de n ciclos de hielo-deshielo redondeada a la aproximación de 0,1 g;
- $m_{s,antes}$ es la masa acumulada del material desprendido secado calculada en la medición de la etapa anterior;
- m_{c+f+b} es la masa del material desprendido secado en el recipiente, filtro y obtenido a partir del cepillado, redondeada a la aproximación de 0,1 g.

Tabla 3.14 Tratamiento de las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo

Actividad	Duración (días)	Edad inicio (días)	Edad fin (días)
Amasada	0	0	0
Desmoldado	1	1	1
Curado en balsa de agua	6	1	7
Curado en cámara climática	20	7	27
Saturación	1	27	28
Inicio ciclos de hielo/deshielo			
Medición (fin de ciclo 3)	3	28	31
Medición (fin de ciclo 14)	17	31	48
Medición (fin de ciclo 24)	13	48	61

Una vez realizado el ensayo de hielo-deshielo se procedió a romper las probetas a compresión conforme a la Norma UNE EN 12390-3:2209, para evaluar las posibles diferencias con los valores relativos obtenidos para las probetas cilíndricas.

Expresión de los resultados:

Se calcula la absorción de líquido L para cada cubo antes del inicio de los ciclos de hielo-deshielo como un porcentaje en masa con la aproximación de 0,1% a partir de la ecuación:

$$L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} \times 100$$

donde

m_{27d} es la masa del cubo seco al aire a los 27 días, en gramos;

m_{28d} es la masa del cubo saturado a los 28 días, en gramos.

y se determina el valor medio de los dos cubos con una aproximación de 0,1 %.

Para cada medición se calcula la pérdida P de dos cubos como un porcentaje en masa con una aproximación de 0,1 % a partir de la ecuación:

$$P = \frac{m_{s,n}}{m_0} \times 100\%$$

donde

m_0 es la masa de dos cubos secados al aire (para un recipiente) a los 27 días, en gramos;

$m_{s,n}$ es la masa acumulada del material desprendido seco calculada por la ecuación:

$$m_{s,n} = m_{s,antes} + m_{c+f+b}$$

y se determina el valor medio de los dos recipientes con una aproximación de 0,1%.

Para evaluar la resistencia de descascarillado se utilizan el valor medio y los valores individuales de la pérdida en masa después de 24 ciclos (Fig. 3.87).

H/P-H-20

H/P-H-8

H/10-H-1

H/10-H-6

H/20-H-13

H/20-H-5

H/30-H-3

H/30-H-15

Fig. 3.87 Rotura de probetas a compresión

UNE-EN 12504-4:2006

*Ensayos de hormigón en estructuras.
Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*

Todo lo relacionado con el objeto y aplicación de la norma, el fundamento del método, equipos necesarios y el cálculo y expresión de los resultados ya fueron ampliamente descritos en el epígrafe 2.2.6.2 del presente documento. En el caso de ensayo sobre las probetas cilíndricas de hormigón fabricadas, se hace necesario reflejar el contenido que recoge el Anexo C de la norma en cuanto a la correlación de la velocidad del impulso y la resistencia.

Las propiedades físicas importantes de los materiales que influyen en la velocidad del impulso son el módulo elástico y la densidad. En el hormigón estas propiedades dependen del tipo de árido, su dosificación y de las propiedades físicas de la pasta de cemento, las cuales dependen, principalmente, de la relación agua-cemento original y de la madurez del hormigón. Por otro lado, la resistencia del hormigón depende más de la relación agua-cemento que del tipo de árido y de las proporciones de áridos y pasta. Así, las correlaciones entre la velocidad del impulso y la resistencia del hormigón

son indirectas físicamente y deben establecerse para cada mezcla específica de hormigón. En un hormigón desconocido, la estimación de la resistencia, en base únicamente a la velocidad del impulso, no es fiable.

Correlación con probetas moldeadas

El método utilizado para definir la variable de la resistencia de las probetas influye en la correlación. Es por ello esencial que solamente se utilice un método de variación de la resistencia para una correlación particular y que éste sea apropiado para la aplicación requerida. La correlación de la velocidad del impulso con la resistencia es menos fiable según se incrementa la resistencia del hormigón. Una correlación obtenida variando la edad del hormigón es apropiada cuando se controla el desarrollo de la resistencia, pero a efectos de control de calidad es preferible una correlación obtenida variando la relación agua-cemento.

Las probetas para ensayo deberían fabricarse y curarse de acuerdo con las Normas EN 12390-1 y EN 12390-2. Deberían fabricarse al menos tres probetas de cada amasada. La velocidad del impulso debería medirse entre las caras moldeadas en caso de cubos o axialmente para cilindros y testigos. Por cada probeta se deberían efectuar al menos tres medidas espaciadas entre su parte superior y su parte inferior (Fig. 3.88).

Fig. 3.88 a) Medición de la longitud de la probeta. b) Colocación de los palpadores electroacústicos sobre la probeta

La variación entre los tiempos de propagación medidos sobre probetas de un solo ensayo deberían estar dentro del ± 1 % del valor medio de esas tres medidas, de otra

forma la probeta debería rechazarse como anómala. Las probetas de ensayo deberían entonces ensayarse a compresión según la Norma EN 12390-3.

La velocidad de impulso media y la resistencia media obtenida de cada conjunto de tres probetas pertenecientes al mismo ensayo proporcionan los datos para el establecimiento de una curva de correlación. La curva obtenida de esta forma se refiere únicamente a las probetas fabricadas, curadas y ensayadas de forma similar; pueden obtenerse diferentes curvas de correlación para los mismos hormigones si el curado al aire es sustituido por el curado en agua.

UNE-EN ISO 8990:1997

*Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada*

Todo lo relacionado con el objeto y aplicación de la norma, el fundamento del método, equipos necesarios y el cálculo y expresión de los resultados ya fueron ampliamente descritos en el epígrafe 2.2.8.1 del presente documento. Cabe destacar cierta variación con respecto a los morteros en las dimensiones de las probetas fabricadas para el ensayo de hormigones.

Probetas de ensayo

Para la realización del ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente se han fabricado probetas de hormigón en forma de placas, de dimensiones 250x250x50 mm. Los moldes utilizados para fabricar estas probetas han sido elaborados en el propio laboratorio, con una base de madera de aglomerado con acabado plástico para evitar absorción del agua de amasado, utilizando una cola para madera para pegar en los bordes un listón del mismo material de 50 mm de altura y un

espesor de 1,8 mm, consiguiendo un vacío interior de las dimensiones de las probetas que se quieren fabricar. Se realizan cuatro ensayos (Fig. 3.89).

Fig. 3.89 Diseño de probetas para ser sometidas al ensayo de transmisión térmica en régimen estacionario por medio del método de la caja caliente

La caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00 utilizada, está diseñada para la realización de prácticas de laboratorio, en las que se determinen las conductividades térmicas de los materiales. Aunque también son válidas para estudiar la atenuación de la temperatura, la capacidad térmica y la transferencia de calor de un determinado material (Fig. 3.90).

a

b

Fig. 3.90 a) Componentes de la caja caliente. b) Aberturas de las que dispone la caja PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00. Las probetas de ensayo han sido dispuestas en las mismas y cada abertura está conectada a su vez mediante termopares con cuatro termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas. A su vez se utiliza otro termómetro para medir la temperatura exterior e interior de la caja

Por estas razones se ha seguido la siguiente metodología de ensayo:

- Antes de iniciar el ensayo se procedió a introducir las probetas en la estufa ventilada durante 72 h a una temperatura de $50\pm 5^{\circ}\text{C}$. Una vez secadas se dejaron 24 h a temperatura ambiente para realizar el ensayo en condiciones adecuadas.
- Los ensayos se realizaron de forma comparativa utilizando las cuatro aberturas de las que dispone dicha caja térmica. De este modo, se dispuso una probeta en cada abertura, conectada a su vez mediante termopares con cuatro termómetros que midieron la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas. A su vez se utilizó otro termómetro para medir la temperatura exterior e interior de la caja térmica. Después se procedió a realizar la comparación de los resultados de las cuatro mediciones para observar la diferencia de comportamiento térmico de los materiales.

3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En la campaña experimental se han determinado a través de una serie amplia de ensayos, las propiedades del hormigón fresco y del hormigón endurecido, para las distintas sustituciones del 10, 20 y 30% en peso de los ROCA empleados, como sustitutos parciales del árido, en la fabricación de hormigones.

Los resultados obtenidos son comparados con las muestras patrón. Se inicia el análisis con la valoración de los resultados de la caracterización del árido natural y de los ROCA empleados. Se sigue la metodología de análisis empleada para el capítulo de los morteros.

3.3.1 Ensayos sobre ÁRIDOS

UNE-EN 933-1:2012

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*

La curva granulométrica de la mezcla de los áridos empleados se encuentra entre las curvas teóricas de Fuller y Bolomey excepto cuando esta se aproxima a la fracción más fina del árido (Fig. 3.91).

A partir de los datos de ensayo obtenidos en el laboratorio, se establecen las curvas granulométricas resultantes al incorporar la cáscara de almendra como sustitución en porcentajes en peso del 10, 20 y 30% comparándolas con la curva granulométrica de referencia (patrón) con el fin de evaluar las diferencias existentes entre estas y si las mismas pueden influir en la fabricación del hormigón. Las curvas granulométricas obtenidas son las siguientes (Figs. 3.92; 3.93 y 3.94):

Fig. 3.91 Curva granulométrica de la mezcla de los áridos empleados (curva de referencia-patrón) comparada con las curvas granulométricas teóricas

Fig. 3.92 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 10%

Fig. 3.93 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 20%

Fig. 3.94 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 30%

Como se puede observar en las Figs. 3.92; 3.93 y 3.94, la diferencia entre las curvas es mínima, produciéndose un pequeño aumento en la fracción granulométrica comprendida entre el tamiz 14 mm y el 20 mm de un 10%, 20% y 30% según el porcentaje de sustitución de cáscara de almendra empleada, mientras se reduce en la fracción granulométrica comprendida entre el tamiz 8 mm y el 14 mm en la misma proporción.

Una vez obtenidas las curvas de las diferentes mezclas de áridos con sustitución de cáscara de almendra, se procedió a comparar las características de la cáscara de almendra con la grava que va a sustituir.

UNE-EN 933-3:2012

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*

UNE-EN 933-4:2008

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma*

Inicialmente se procedió a realizar ensayos sobre cada uno de los materiales, y posteriormente sobre las muestras teóricas de las distintas sustituciones de cáscara de almendra obteniendo los siguientes resultados mostrados en las tablas y figuras que se exponen a continuación.

Tabla 3.15 Índice de lajas y coeficiente de forma de la grava y de la cáscara de almendra

	Índice de lajas global (%)	Coeficiente de forma global (%)
Grava > 4 mm	13	9
Almendra > 4 mm	85	81
Límite EHE-08		≤ 35

Fig. 3.95 Índice de lajas

Tabla 3.16 Índice de lajas de lajas con diferentes sustituciones

% de sustitución	Índice de lajas (%)
10	20,23
20	27,46
30	34,74

Fig. 3.96 Índice de lasajas con diferentes porcentajes de sustitución (10, 20 y 30)

La Fig. 3.96 muestra como el valor del índice de lasajas crece a medida que se aumenta la cantidad de árido sustituido. La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.5 *Forma del árido grueso*, que se expresará mediante su índice de lasajas, entendido como el porcentaje en peso de áridos considerados como lasajas según UNE EN 933-3, y su valor debe ser inferior a 35.

Aunque no se llega a superar ese valor establecido por la EHE-08, la cantidad de árido ROCA de estas características como agregado de sustitución en la dosificación de la mezcla para la fabricación de hormigones traerá consigo una probable disminución de valores en las resistencias mecánicas a compresión. Esto será verificado más adelante al aportar los resultados de los ensayos de resistencias mecánicas realizados a las diferentes probetas estudiadas.

Fig. 3.97 Coeficiente de forma

Como se puede observar en la Fig. 3.97, el coeficiente de forma disminuye conforme el tamaño del árido va también disminuyendo. Esta reducción es más acusada en la grava, mientras que la disminución del coeficiente de forma en la cáscara de almendra es más sostenida llegando a igualarse en las aberturas 8 mm y 10 mm.

UNE-EN 1097-1:2011

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)*

UNE-EN 1097-2:2010

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*

UNE 83115:1989 EX

Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos*, que se cumplirá la limitación en cuanto a la Resistencia a la fragmentación del árido grueso determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-2 (ensayo de Los Ángeles) ≤ 40 . También indica que para la fabricación de hormigón en masa o armado, de resistencia característica especificada no superior a 30 N/mm^2 , podrán utilizarse áridos gruesos con una resistencia a la fragmentación entre 40 y 50 en el ensayo de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2) si existe experiencia previa en su empleo y hay estudios experimentales específicos que avalen su utilización sin perjuicio de las prestaciones del hormigón.

Se observa que tanto la grava como la cáscara de almendra cumplen con la especificación de la EHE-08 además de la recomendación para la fabricación de hormigón en masa o armado, de resistencia característica especificada no superior a 30 N/mm^2 (Tabla 3.17).

El bajo coeficiente de Los Ángeles que presenta la cáscara de almendra es debido a la forma característica de la misma y sobretodo a su composición. Es muy probable que las fibras que componen la cáscara de la almendra permitan a esta recibir el impacto

de las bolas de acero durante el ensayo al que se ve sometida deformándose en lugar de romperse.

Tabla 3.17 Coeficientes de resistencia al desgaste (Micro-Deval) y a la fragmentación (Los Ángeles)

	Coeficiente Micro-Deval	Coeficiente de Los Ángeles
Grava > 4 mm	17	25
Almendra > 4 mm	--	9
	Límite EHE-08	≤ 40

El resultado del ensayo realizado a las arenas en cuanto a su resistencia a la fragmentación mediante la determinación del coeficiente de friabilidad cumple con la EHE-08 (≤ 40) (Tabla 3.18).

Tabla 3.18 Coeficiente de friabilidad de las arenas

	Coeficiente de friabilidad
Arena (< 4 mm)	17
	Límite EHE-08
	≤ 40

UNE-EN 1097-3:1999

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*

UNE-EN 1097-6:2014

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*

Los resultados de los ensayos de densidad aparente de los áridos empleados (árido natural y cáscara de almendra) quedan recogidos en la Tabla 3.19. En la misma la densidad aparente viene determinada por la de conjunto; de las partículas antes y después del secado en estufa y de las partículas saturadas.

Tabla 3.19 Densidades de los áridos empleados

Árido	Densidades (Mg/m ³)			
	Densidad aparente de conjunto	Densidad aparente de las partículas	Densidad de las partículas tras secado en estufa	Densidad de las partículas saturadas, con superficie seca
Arena < 4 mm	1,64	2,62	2,53	2,57
Grava > 4 mm	1,35	2,68	2,64	2,66
Cáscara de almendra > 4 mm	0,30	1,37	0,78	1,21

En cuanto a la absorción de los áridos, en la Tabla 3.20 se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 3.20 Porosidad de conjunto y absorción de agua de los áridos empleados

Árido	Porosidad de conjunto (%)	Absorción de agua (%)
Arena < 4 mm	35,43	1,42
Grava > 4 mm	50,97	0,5
Cáscara de almendra > 4 mm	61,43	54,89
Límite EHE-08		≤ 5

Fig. 3.98 Densidades de los áridos empleados

Fig. 3.99 Porosidad de conjunto y absorción de agua

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.6 *Requisitos físico-mecánicos* que se cumplirá la siguiente limitación en cuanto a la absorción de agua por los áridos, determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6 y que será $\leq 5\%$.

Destaca la diferencia de densidad entre el árido convencional (grava y arena) y la cáscara de almendra, un 50% de la del árido, y más aún cuando observamos la denominada densidad de conjunto donde el árido convencional tiene cerca de cinco veces más densidad.

Fig. 3.100 Absorción de agua según el tiempo transcurrido

Se puede observar la gran absorción de agua por parte de la cáscara de almendra que supera el 50%, cuando la EHE-08 indica que esta debe ser menor al 5%. Esto quiere decir que la cáscara de almendra posee una gran cantidad de poros abiertos de pequeño tamaño. Como ya se ha anotado, esto puede llegar a ser un gran problema debido a que la pasta de cemento no penetre en los poros pero sí lo haga el agua, provocando una absorción de la misma, que traerá como consecuencia una pérdida de la docilidad de la masa resultando ser menos trabajable.

Teniendo en cuenta este hecho y con el fin de evitarlo, se procedió durante los ensayos a una saturación de la cáscara de almendra 24 horas antes de la fabricación de las probetas de hormigón para que esta estuviera completamente hidratada y no absorbiera el agua de amasado. También se tuvo la consideración de que la cáscara de almendra no fuera incorporada húmeda en el hormigón, a fin de no introducir más agua y que esta produjera en el hormigón una relación agua/cemento más elevada. Con este fin, media hora antes de proceder a la fabricación del hormigón, se sacó la cáscara de almendra donde estaba siendo saturada para que se secara superficialmente exponiéndola a temperatura ambiente. Con ello se quiso evitar que el árido tuviera una absorción mayor al 5%.

UNE-EN 1097-5:2009

*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa*

La Tabla 3.21 recoge los resultados del % de humedad de los áridos empleados para la fabricación de hormigones.

Tabla 3.21 Humedad (%) de los áridos empleados

Árido	Humedad (%)
Arena < 4 mm	1,266
Grava > 4 mm	0,439
Cáscara de almendra > 4 mm	8,597

Fig. 3.101 % de humedad de los áridos empleados

La humedad de los áridos naturales en condiciones de laboratorio es bastante baja, debido a ello no se procedió a secar en estufa las porciones de ensayo antes de fabricar las probetas de hormigón puesto que no afecta a las características del hormigón final.

*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena*

Los resultados del ensayo para determinar el contenido en finos y el equivalente de arena son mostrados en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Contenido en finos (%) y Equivalente de arena (SE)

	Contenido en finos (%)	Equivalente de arena (SE)
Árido	1,23	85
Límite EHE-08	$\leq 6\%$	≥ 70

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 28 Áridos, epígrafe 28.4.2 *Calidad de los finos de los áridos* que no se utilizarán áridos finos cuyo equivalente de arena (SE), determinado sobre la fracción 0/4, de conformidad con el Anexo A de la norma UNE EN 933-8 sea inferior a:

- a) 70, para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa o IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición.
- b) 75, el resto de los casos se cumplirá la siguiente limitación en cuanto a la absorción de agua por los áridos, determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6 y que será $\leq 5\%$.

La cantidad de finos presente en la mezcla final de arena y grava (1,23%) no supera en ningún caso el 6% que exige la EHE-08. El árido empleado también cumple lo expuesto anteriormente en lo referido al equivalente de arena.

Este valor permite asegurar que el árido fino empleado para la fabricación del hormigón es conforme a norma y que no contiene partículas arcillosas perjudiciales para fabricar un hormigón de calidad.

Fig. 3.102 Contenido en finos (%) y Equivalente de arena (SE)

3.3.2 Ensayos sobre HORMIGÓN FRESCO

UNE-EN 12350-2:2009

Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento

Tabla 3.23 Asentamiento de las diferentes amasadas

Nº de amasada	Ensayo	Sustitución	Ensayo 1 (mm)	Ensayo 2 (mm)	Media (mm)
1	Compresión	Patrón	37	35	36
2	Compresión	10%	38	36	37
3	Compresión	20%	41	39	40
4	Compresión	30%	34	32	33
5	Flexotracción	Patrón	42	35	38,5
6	Flexotracción	10%	31	29	30
7	Flexotracción	20%	32	34	33
8	Flexotracción	30%	34	30	32
9	Tracción indirecta	Patrón	40	34	37
10	Tracción indirecta	10%	39	31	35
11	Tracción indirecta	20%	40	35	37,5
12	Tracción indirecta	30%	32	36	34
13	Hielo/Absorción	Patrón	35	38	36,5
14	Hielo/Absorción	10%	40	34	37
15	Hielo/Absorción	20%	32	34	33
16	Hielo/Absorción	30%	40	38	39
17	Térmico/compresión	Patrón	38	32	35
18	Térmico/compresión	10%	40	36	38
19	Térmico/compresión	20%	34	30	32
20	Térmico/compresión	30%	42	36	39

Fig. 3.103 Asentamiento medio de las diferentes amasadas

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su Capítulo VI Materiales, Art. 31 Hormigones, epígrafe 31.5 *Docilidad del hormigón*, que la docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento, según UNE-EN 12350-2. Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono, serán los siguientes (Tabla 3.24).

Tabla 3.24 Distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0 - 2
Plástica (P)	3 - 5
Blanda (B)	6 - 9
Fluida (F)	10 - 15
Líquida (L)	16 - 20

Salvo en aplicaciones específicas que así lo requieran, se evitará el empleo de las consistencias seca y plástica. No podrá emplearse la consistencia líquida, salvo que se consiga mediante el empleo de aditivos superplastificantes. En todo caso, la consistencia del hormigón que se utilice será la especificada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, definiendo aquella por su tipo o por el valor numérico de su asentamiento en cm.

Según la EHE-08, este hormigón tendrá una consistencia plástica (P), es decir, la medidas del asentamiento están comprendidas entre los 3-4 cm.

Se pueden observar que no existen variaciones significativas entre las distintas amasadas más allá de las producidas por la fabricación manual del hormigón y los errores estadísticos que esta llega a producir.

3.3.3 Ensayos sobre HORMIGÓN ENDURECIDO

Previa la exposición de los resultados de los ensayos realizados al hormigón endurecido, se ha considerado oportuno indicar la densidad de cada una de las probetas en “condiciones de recepción” según la norma UNE-EN 12390-7:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. Conocer este dato resulta importante debido a que una mayor o menor densidad influye significativamente en cada una de las propiedades del hormigón.

En la Tabla 3.25 quedan reflejadas estas densidades.

Tabla 3.25 Densidad de cada una de las probetas de ensayo en “condiciones de recepción”

Código probeta	Densidad (kg/m ³)	Código probeta	Densidad (kg/m ³)
H/P-C-9	2311,489	H/10-C-31	2289,974
H/P-C-31	2300,354	H/10-C-18	2278,839
H/P-C-24	2307,337	H/10-C-24	2287,521
H/P-B-10	2296,768	H/10-B-12	2262,987
H/P-B-19	2308,846	H/10-B-19	2263,741
H/P-B-12	2302,430	H/10-B-11	2244,303
H/P-C-7-24	2348,290	H/10-C-7-24	2267,893
H/P-C-21-31	2348,667	H/10-C-21-31	2276,952
H/P-A-23	2312,432	H/10-A-24	2302,241
H/P-H-20	2343,111	H/10-H-1	2329,481
H/P-H-8	2370,370	H/10-H-6	2319,704
H/P-Ac-1	2299,347	H/10-Ac-1	2272,528
H/P-Ac-2	2326,166	H/10-Ac-2	2266,882
H/P-Ac-3	2309,228	H/10-Ac-3	2288,055
Media	2320,345	Media	2282,222

Código probeta	Densidad (kg/m ³)	Código probeta	Densidad (kg/m ³)
H/20-C-7	2197,877	H/30-C-13	2163,152
H/20-C-4	2186,553	H/30-C-22	2165,228
H/20-C-15	2190,705	H/30-C-29	2154,659
H/20-B-25	2204,105	H/30-B-32	2170,134
H/20-B-30	2184,855	H/30-B-31	2171,078
H/20-B-5	2217,504	H/30-B-24	2188,629
H/20-C-7-9	2186,742	H/30-C-7-24	2171,267
H/20-C-21-21	2199,009	H/30-C-21-31	2149,186
H/20-A-18	2242,227	H/30-A-31	2194,291
H/20-H-13	2260,741	H/30-H-3	2204,444
H/20-H-5	2250,963	H/30-H-15	2178,963
H/20-Ac-1	2211,834	H/30-Ac-1	2072,094
H/20-Ac-2	2230,183	H/30-Ac-2	2073,506
H/20-Ac-3	2168,077	H/30-Ac-3	2117,262
Media	2209,384	Media	2155,278

Fig. 3.104 Densidades medias en “condiciones de recepción”

La densidad del hormigón disminuyó en función del aumento del porcentaje de sustitución de cáscara de almendra por el árido.

UNE-EN 12390-3:2009

Ensayos de hormigón endurecido.

Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas

En la Tabla 3.26 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la determinación de la resistencia a compresión.

Tabla 3.26 Carga de rotura y tensión de rotura a compresión (a 28 días)

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tensión media de rotura (N/mm ²)	Valor relativo
H/P-C-9	681,1	38,56		
H/P-C-31	672,9	38,10	38,10	100,00 %
H/P-C-24	662,3	37,50		
H/10-C-31	453,6	25,68		
H/10-C-18	470,1	26,62	26,04	68,34 %
H/10-C-24	455,9	25,82		
H/20-C-7	330,9	18,74		
H/20-C-4	319,7	18,10	18,07	47,40 %
H/20-C-15	306,8	17,37		
H/30-C-13	254,7	14,42		
H/30-C-22	262,5	14,86	14,42	37,85 %
H/30-C-29	246,7	13,97		
Límite EHE-08		H. en masa ≥ 20 N/mm ²	H. armado ≥ 25 N/mm ²

Fig. 3.105 Carga de rotura a compresión (a 28 días)

Fig. 3.106 Tensión media de rotura a compresión (a 28 días)

A partir de los resultados obtenidos se observa que la incorporación de cáscara de almendra como porcentaje de sustitución del árido hace que disminuya la resistencia a compresión del hormigón. Sin embargo, esta resistencia no decrece proporcionalmente, ya que para sustituciones del 10% caen las resistencias aproximadamente un 32%, mientras que para aquellas del 20% y el 30%, lo hacen en un 21% y 8,5%, respectivamente.

También se observa respecto a lo establecido en la Instrucción EHE-08 que sólo aquellos hormigones fabricados con sustituciones de cáscara de almendra en un 10%, cumplirían las condiciones requeridas para ser considerados hormigones armados o en masa. Esta reducción importante en los valores de las resistencias se debe principalmente a la baja dureza de la cáscara de almendra y sobretodo, a la forma laminar que esta presenta, que como ha quedado reflejado en este documento en el apartado de estudio y caracterización de los áridos, este tipo de forma repercute negativamente en los valores de las resistencias a compresión.

Otro factor que incide en la pérdida de resistencia a compresión es el comportamiento tan dispar entre la cáscara de almendra y la pasta de cemento. La cáscara de almendra sometida a determinadas cargas tiende a deformarse por sus propiedades elásticas, mientras que la pasta que lo envuelve no reacciona del mismo modo. Esto produce tensiones internas dentro del hormigón que facilitan la aparición de fisuras en el punto de contacto entre la cáscara de almendra y la propia pasta, con la consiguiente disminución de las resistencias.

Precisamente para confirmar este punto se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido (MEB) a porciones del hormigón fabricado, que permitieron interpretar la existencia de dichas fisuras. De esta forma las microfotografías obtenidas (Fig. 3.107) permiten observar varias secuencias del proceso de fraguado de la masa del hormigón a diferentes aumentos. Es apreciable el proceso normal de reacción de la interfase pasta (P)-árido (A), el cual se ha desarrollado normalmente. Los fragmentos de áridos han reaccionado parcialmente con la pasta, sin embargo, su color oscuro demuestra que se encuentran aún en fase de hidratación. Se observan algunos

fragmentos relictos de residuos (R) en la parte superior derecha de la microfotografía Fig. 3.107a sin completar su reacción, aunque sus bordes reflejan una reacción manifiesta con la pasta (P). En la Fig. 3.107b y c se observa con mayores aumentos la relación entre la interfase pasta-árido. Es evidente que se ha comportado como un sistema de reacción hidráulica normal, donde la calidad de la dosificación ha sido la adecuada, ya que las fisuras (F) provocadas por la rotura de los ensayos mecánicos no sólo ha afectado a la pasta, propiamente dicha, sino también a los áridos (A) (ver Fig. 3.107a y b). En la Fig. 3.107c (parte inferior) es posible observar con mayores aumentos zonas de reacción hidráulica (ZR), desde los bordes del grano de árido hacia el centro de éste. La Fig. 3.107c, d y e muestran el desarrollo de los productos de reacción en forma de cristales de portlandita (Pt).

Fig. 3.107 (a, b, c, d y e): Secuencias de microfotografías mostrando el proceso de reacción hidráulica entre los componentes del hormigón, tomadas a diferentes aumentos

En las microfotografías Fig. 3.107d y e se observan fragmentos de áridos (A) en plena reacción con la pasta, evidenciado por el tono difuso de los contornos. En todo el campo visual aparecen fragmentos de residuos (R) de aspecto pálido y difuso, lo cual demuestra el carácter avanzado de la reacción, en contraste con los fragmentos vecinos, los cuales, a juzgar por el intenso color negro, no han completado aún el proceso de reacción.

La Tabla 3.27 expone los resultados de la resistencia del hormigón a 7, 21, 28 y 90 días.

Tabla 3.27 Tensiones de rotura a compresión a 7, 21, 28 y 90 días

% de sustitución	Tensión de rotura a 7 días (N/mm ²)	Tensión de rotura a 21 días (N/mm ²)	Tensión de rotura a 28 días (N/mm ²)	Tensión de rotura a 90 días (N/mm ²)
PP	30,39	36,34	38,56	40,06
10	20,31	24,35	26,04	32,75
20	14,14	16,24	18,07	21,64
30	10,53	11,77	14,42	17,17

Fig. 3.108 Resistencias mecánicas a compresión del hormigón a 7, 21, 28 y 90 días

En la Fig. 3.108 se observa que a periodos de curado mayores con la incorporación de la cáscara de almendra existe un incremento de los valores de la resistencia. Es destacable ese aumento en las sustituciones H/10, H/20 y H/30. Hace ello pensar que a priori se podría utilizar como hormigón estructural aquel fabricado con unas sustituciones del árido por la cáscara de almendra de un 10% a 20%. No así el H/30, que aunque se incrementa su valor de resistencia respecto a periodos de curado más cortos, no alcanza el valor de resistencia mínima de 20 N/mm² que indica la instrucción EHE-08 para hormigón estructural. Sin embargo hormigones fabricados con una sustitución del árido natural por 30% de cáscara de almendra sería factible su empleo como hormigones en masa.

UNE-EN 12390-5:2009

Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas

En la Tabla 3.28 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la determinación de la resistencia a flexión de las probetas fabricadas.

Tabla 3.28 Carga de rotura y tensión de rotura a flexión (a 28 días)

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor relativo
H/P-F-15	36,35	4,85	100,00 %
H/10-F-22	36,23	4,83	99,60 %
H/20-F-19	34,56	4,61	95,01 %
H/30-F-11	29,56	3,94	81,23 %

Fig. 3.109 Carga de rotura a flexión (a 28 días)

Fig. 3.110 Tensión de rotura a flexión (a 28 días)

En base a los resultados obtenidos de los ensayos a flexión se puede deducir a igualdad que en el caso de la resistencia a compresión, que la incorporación de cáscara de almendra en el hormigón no hace disminuir la resistencia de este cuando su proporción de sustitución es del 10%, todo lo contrario ocurre con proporciones de sustitución mayores, del 20% y el 30%.

A diferencia de la compresión, las disminuciones de resistencias no son tan acusadas, quizás debido al carácter dúctil de la cáscara de almendra en comparación con el comportamiento del árido natural. La cáscara de almendra por su mayor elasticidad puede deformarse. Ello le confiere la condición de que su incorporación en ciertas proporciones en la dosificación permita mejorar las propiedades elásticas del hormigón, sin perjudicar la adherencia árido-cemento.

Sin embargo, hay que considerar que a mayores porcentajes de sustitución las resistencias del hormigón fabricado disminuyen. En el caso estudiado, un $\pm 5\%$ para sustituciones del 20% y hasta de un $\pm 19\%$ para sustituciones del 30%.

Finalizado el ensayo, a través de la inspección visual de las probetas sometidas al mismo se observó que la cáscara de almendra tuvo comportamientos dispares, una parte de ella rompió como si fuera un árido convencional, mientras que otra, debido a su carácter elástico, se despegó de la pasta de cemento.

UNE-EN 12390-6:2010

*Ensayos de hormigón endurecido.
Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*

En la Tabla 3.29 son expuestos los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación de la resistencia a tracción indirecta.

Tabla 3.29 Carga de rotura y tensión de rotura a tracción indirecta

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tensión media de rotura (N/mm ²)	Valor relativo
H/P-B-12	169,5	2,41	2,60	100,00%
H/P-B-10	186,6	2,65		
H/P-B-19	193,8	2,75		
H/10-B-12	189,5	2,69	2,64	101,51%
H/10-B-19	170,8	2,43		
H/10-B-11	196,5	2,79		
H/20-B-25	161,2	2,29	2,28	87,69%
H/20-B-30	155,4	2,21		
H/20-B-5	164,6	2,34		
H/30-B-32	134,6	1,91	2,04	78,46%
H/30-B-31	135,9	1,93		
H/30-B-24	159,7	2,27

Fig. 3.111 Carga de rotura a tracción indirecta (a 28 días)

Fig. 3.112 Tensión media de rotura a tracción indirecta (a 28 días)

De los resultados señalados en la Tabla 3.29 y en las Figs. 111 y 112, se puede afirmar que la incorporación de la cáscara de almendra en el hormigón en un porcentaje de sustitución del 10% hace aumentar $\pm 1,5\%$ la resistencia a tracción indirecta del hormigón endurecido.

El motivo es el comentado en los resultados a flexión, y es el comportamiento elástico de la cáscara de almendra en comparación con el árido natural, lo que hace que, en pequeñas cantidades contribuya a mejorar las propiedades elásticas del hormigón sin interferir negativamente en la adherencia árido-cemento.

Sin embargo, con porcentajes de sustitución de cáscara de almendra mayores, la resistencia a tracción indirecta cae drásticamente, $\pm 12\%$ con sustituciones del 20% y $\pm 21\%$ con sustituciones del 30%. El motivo radica en que en grandes proporciones de cáscara la baja resistencia de ésta y su forma laminar, pesan sobre su elasticidad a la hora de pretender mejoras en el hormigón a fabricar.

UNE-EN 12390-8:2009

Ensayos de hormigón endurecido.

Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para la determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión.

Tabla 3.30 Profundidad media y máxima de penetración de agua bajo presión

Código probeta	Profundidad media de penetración (mm)	Profundidad máxima de penetración (mm)	Media		Límite EHE-08 Prof. media	Límite EHE-08 Prof. máxima
			Profundidad media (mm)	Profundidad máxima (mm)		
H/P-B-12	17,21	34	19	35	30	50
H/P-B-10	20,36	35				
H/P-B-19	20,72	36				
H/10-B-12	23,86	38	23	38		
H/10-B-19	21,54	37				
H/10-B-11	24,10	39				
H/20-B-25	24,67	39	23	39		
H/20-B-30	23,27	40				
H/20-B-5	20,79	37				
H/30-B-32	17,38	34	21	38		
H/30-B-31	21,67	41				
H/30-B-24	22,62	38

Fig. 3.113 Profundidad media y máxima de penetración de agua bajo presión

En base a los resultados obtenidos se pueden observar ciertas similitudes entre las sustituciones de cáscara de almendra en porcentaje del 10% con la del 20% y entre la patrón y la del 30% en cuanto a las profundidades media y máxima de penetración de agua bajo presión. Esto es debido probablemente a la mayor porosidad de la cáscara de almendra frente a la porción del árido al que sustituye.

Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund

En la Tabla 3.31 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación del coeficiente de absorción, porosidad efectiva y resistencia a la penetración de agua.

Tabla 3.31 Incremento de masa medio, por absorción capilar (g/cm²)

Tiempos	Patrón	Sustitución		
		10%	20%	30%
t = 0'	0,000	0,000	0,000	0,000
t = 5'	0,026	0,042	0,038	0,021
t = 10'	0,032	0,049	0,047	0,030
t = 15'	0,034	0,049	0,049	0,030
t = 30'	0,045	0,064	0,064	0,053
t = 1 h	0,055	0,077	0,076	0,070
t = 2 h	0,062	0,092	0,091	0,089
t = 3 h	0,074	0,104	0,104	0,106
t = 4 h	0,076	0,113	0,111	0,117
t = 6 h	0,087	0,126	0,126	0,132
t = 24 h	0,132	0,179	0,183	0,206
t = 48 h	0,162	0,215	0,228	0,260
t = 72 h	0,185	0,242	0,257	0,298
t = 144 h	0,245	0,306	0,325	0,394
t = 168 h	0,249	0,315	0,334	0,411

Fig. 3.114 Incremento medio de masa, por absorción capilar (g/cm²)

En los resultados obtenidos y representados se observa como la absorción capilar aumenta en los hormigones fabricados con cáscara de almendra. Esto puede ser debido a la acción de tres factores:

- Mala adherencia de la cáscara de almendra con el cemento, quedando huecos entre ambos por donde circula el agua con mayor facilidad.
- Mayor capacidad de absorción de la cáscara de almendra frente a los áridos, que como se ha venido advirtiendo es bastante superior.
- Las pequeñas fisuras producidas en el proceso de corte de las probetas, puesto que la cáscara de almendra es un material más elástico que los áridos, y al ser sometido a la acción de corte daña la pasta de cemento que lo envuelve, provocando dichas fisuras.

En la Tabla 3.32 se muestran los resultados del coeficiente de absorción capilar, de la porosidad efectiva y de la resistencia a penetración de agua por absorción capilar de los distintos hormigones fabricados.

Tabla 3.32 Coeficiente de absorción capilar, porosidad efectiva y resistencia a la penetración de agua por absorción capilar

	Patrón	Sustitución		
		10%	20%	30%
Coeficiente de absorción capilar ($\text{kg}/\text{m}^2\text{m}^{0,5}$)	0,0002489	0,0003149	0,0003337	0,0004110
Porosidad efectiva (cm^3/cm^3)	0,0255908	0,0326336	0,0343841	0,0429850
Resistencia a la penetración de agua por absorción capilar (min/cm^2)	105,71	107,27	108,3336	109,29

Fig. 3.115 Coeficiente de absorción capilar

Los resultados obtenidos muestran claramente cómo el coeficiente de absorción capilar aumenta en los hormigones fabricados con cáscara de almendra según se aumenta el % de sustitución del árido por la cáscara de almendra. Este aumento del coeficiente de absorción capilar podría considerarse proporcional, ya que la pendiente de la curva se asemeja a una recta, produciéndose una pequeña estabilización de dicho aumento entre las sustituciones del 10% y el 20% con la cáscara de almendra.

Fig. 3.116 Porosidad efectiva (cm^3/cm^3) para las distintas sustituciones

Como muestra la Fig. 3.116 la porosidad efectiva aumenta en los hormigones fabricados con cáscara de almendra, según aumenta el % de sustitución. Este aumento de la porosidad efectiva está en función del coeficiente de absorción capilar cuya representación gráfica es muy similar demostrando ésta relación.

Fig. 3.117 Resistencia a la penetración de agua (min/cm²)

La resistencia a la penetración de agua no aporta ningún dato relevante que permita valorar si existe o no una mejora o una deficiencia en alguna característica, ya que es un parámetro que simplemente depende de la altura de la probeta y que sirve para el cálculo de la absorción de agua por capilaridad y de la porosidad efectiva.

Teniendo en cuenta que los resultados de los ensayos de absorción de agua por capilaridad son superiores en hormigones fabricados con incorporación de cáscara de almendra, llegando a ser de hasta un 65% mayor para un 30% de sustitución de este elemento orgánico y que la porosidad efectiva es superior según aumenta ese porcentaje de sustitución llegando a ser de hasta un 68% superior en el caso de la sustitución del 30%, se puede afirmar que hormigones fabricados con sustitución parcial del árido por cáscara de almendra, será menos resistentes a ataques físicos, químicos y biológicos y por lo tanto tendrán una menor durabilidad en el tiempo en el caso de ser empleados bajo éstas circunstancias.

UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

Ensayos de hormigón endurecido.

Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial

En este apartado, además de la pérdida de masa superficial por la acción del hielo, se analizarán como afecta este a la resistencia a compresión.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para la determinación de la pérdida de masa superficial por la acción del hielo-deshielo.

Tabla 3.33 Pérdida media de masa (%), por ciclos

Pérdida por ciclos	Patrón	Sustitución		
		10%	20%	30%
3º ciclo	0,003 %	0,006 %	0,009 %	0,011 %
14º ciclo	0,012 %	0,046 %	0,059 %	0,067 %
26º ciclo	0,06 %	0,069 %	0,075 %	0,085 %

Fig. 3.118 Pérdida media de masa (%), por ciclos

Como se puede observar en la Tabla 3.33 y Fig. 3.118 elaboradas a partir de los resultados obtenidos, la pérdida de masa superficial del hormigón es mayor en hormigones con sustitución del árido por la cáscara de almendra. Esta pérdida de masa no es lineal a lo largo de los ciclos. En la Fig. 3.119 queda gráficamente representada esta tendencia no lineal de pérdida de masa según los porcentajes de sustitución de este elemento orgánico.

Fig. 3.119 Pérdida de masa total (%), por porcentaje de sustitución

La diferencia entre el porcentaje de pérdida de masa superficial entre el hormigón patrón y el hormigón con sustitución de cáscara de almendra al 10%, es bastante más acusada que la que existe entre las sustituciones de cáscara al 10%, 20% y 30%. El incremento del porcentaje de pérdida de masa superficial se debe a una mayor capacidad de absorción de agua de la cáscara. Esta cantidad de agua absorbida por la cáscara de la almendra que se encuentra próxima a las caras de la probeta se expande cuando se congela, provocando tensiones en el hormigón que terminan desprendiendo parte del material.

Después de transcurridos los 26 ciclos de hielo-deshielo llevados a cabo el deterioro producido sobre el hormigón no resultó ser significativo.

Finalizados los ciclos de hielo-deshielo y como se ha explicado anteriormente en este trabajo, se procedió a la rotura de las probetas cúbicas en la prensa hidráulica para realizar el ensayo de resistencia mecánica a compresión, para valorar posibles cambios en los valores de la resistencia que pudieran dar indicios de daños internos provocados por los ciclos de hielo-deshielo a los que había sido sometido el hormigón fabricado.

Tabla 3.34 Carga de rotura y tensión de rotura a compresión, de probetas ensayadas a ciclos de hielo-deshielo

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tensión media de rotura (N/mm ²)	Valor relativo (%)
H/P-H-20	875,48	38,91	38,38	100,00
H/P-H-8	851,63	37,85		
H/10-H-1	597,83	26,57	26,40	68,78
H/10-H-6	590,18	26,23		
H/20-H-13	473,85	21,06	20,67	53,86
H/20-H-5	456,30	20,28		
H/30-H-3	391,73	17,41	17,03	44,36
H/30-H-15	374,40	16,64

Fig. 3.120 Comparación de tensiones de rotura, a 28 días y después del ensayo de ciclos hielo-deshielo

En la Fig. 3.120 se observa al comparar la tensión de rotura de las probetas ensayadas a 28 días y las ensayadas después del ensayo de ciclos de hielo-deshielo, que se produce un incremento de dicha tensión. Esto se debe principalmente al hecho de que las probetas ensayadas a ciclos de hielo-deshielo tienen una edad de 61 días y como es sabido, el hormigón aumenta su resistencia con el paso de los días.

Sin embargo destaca la atención el hecho de que se produzca un incremento mayor de la tensión de rotura con los porcentajes de sustitución del 20% y el 30%. Esto puede ser debido a que la cáscara de almendra retrasa el endurecimiento normal del hormigón haciendo que emplee más tiempo en adquirir la resistencia esperada.

UNE-EN 12504-4:2006

*Ensayos de hormigón en estructuras.
Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*

En la Tabla 3.35 se expresan los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos y la tensión de rotura a compresión de probetas a 28 días, con el fin de poder establecer una correlación entre ambos resultados.

Tabla 3.35 Correlación entre la velocidad de impulsos ultrasónicos y la tensión de rotura a compresión, a 28 días

Código probeta	Velocidad media (km/s)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Velocidad media (km/s)	Tensión de rotura media (N/mm ²)
H/P-C-9	4,7316	38,56		
H/P-C-31	4,6561	38,10	4,669	38,05
H/P-C-24	4,6190	37,50		
H/10-C-31	4,3086	25,68		
H/10-C-18	4,3278	26,62	4,314	26,04
H/10-C-24	4,3046	25,81		
H/20-C-7	4,0421	18,74		
H/20-C-4	4,0449	18,10	4,037	18,07
H/20-C-15	4,0238	17,37		
H/30-C-13	3,9141	14,42		
H/30-C-22	3,9405	14,86	3,922	14,42
H/30-C-29	3,9110	13,97		

En la Tabla 3.35, la velocidad promedio del impulso ultrasónico, (media de las tres mediciones realizadas sobre cada una de las probetas ensayadas), disminuye conforme aumenta el porcentaje de cáscara de almendra como sustituto parcial del árido en el hormigón.

La caída de la velocidad de los impulsos ultrasónicos se corresponde a la caída de la resistencia a compresión del hormigón con cáscara de almendra. A partir de los datos obtenidos en la realización de ensayos se ha realizado la siguiente gráfica (Fig. 3.121), con la finalidad de obtener una correlación entre la velocidad de los impulsos ultrasónicos y la tensión de rotura a compresión.

Fig. 3.121 Velocidad media de los impulsos ultrasónicos en relación a la tensión de rotura a compresión (a 28 días)

Como se observa en la Fig. 3.121, existe una correlación entre la velocidad del impulso ultrasónico y la tensión de rotura que viene determinada por la pendiente de la curva. Una vez obtenida esta pendiente y observando que es constante, se podría calcular la resistencia de cualquier hormigón, sin necesidad de recurrir a un ensayo destructivo.

*Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada*

En la Fig. 3.122 se observa la evolución de las temperaturas obtenidas mediante la realización de los ensayos con la caja caliente para la determinación del coeficiente de conductividad térmica. Esta representación forma parte de uno de los cuatro ensayos realizados cuyos datos se encuentran en los ANEXOS del presente documento.

Fig. 3.122 Temperaturas obtenidas mediante el uso de la caja caliente

TAC	Temperatura ambiente de la cámara	CEM 2	Temperatura cara externa del material 2
TAE	Temperatura ambiente exterior	CIM 3	Temperatura cara interna del material 3
CIM 1	Temperatura cara interna del material 1	CEM 3	Temperatura cara externa del material 3
CEM 1	Temperatura cara externa del material 1	CIM 4	Temperatura cara interna del material 4
CIM 2	Temperatura cara interna del material 2	CEM 4	Temperatura cara externa del material 4

Como se desprende de la Fig. 3.122, la temperatura de partida de todas las probetas en el momento de proceder al ensayo eran similares y por debajo de la temperatura ambiente.

Una vez iniciado el encendido de la caja caliente, la temperatura interior de esta subió en unos 15 minutos a 60°C, lo que provocó a su vez que la temperatura de la cara interna del material adquiriera temperatura más rápidamente que la cara externa de dicho material.

Transcurridos los primeros 15 minutos, las temperaturas se estabilizaron y fueron incrementándose lentamente, de manera, que la cara interna y la cara externa del material ganaron la misma temperatura por minuto.

Como se observa en la Fig. 3.122, se dio por concluido el ensayo cuando tanto la cara interna como la externa del material dejaron de ganar calor. Esto ocurrió aproximadamente 6-7 horas en las que había comenzado el ensayo, dependiendo de la temperatura inicial a la que se encontraba el hormigón.

El procedimiento de ensayo de la caja caliente ha sido ampliamente descrito en el epígrafe 2.2.8.1 del presente documento.

En la Tabla 3.36 quedan resumidos los resultados de los ensayos (4) para la determinación de la conductividad térmica del material.

Tabla 3.36 Resultados del ensayo de la caja caliente para determinar el coeficiente de conductividad térmica (λ)

	TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 1 (°C)	CEM 1 (°C)	λ (W/m°C)
Ensayo 1	68,6	21,9	43,1	37,6	1,526993007
Ensayo 2	69,1	21,8	43,7	37,9	1,458554377
Ensayo 3	68,5	20,7	42,9	37,4	1,567762238
Ensayo 4	68,7	21,6	42,1	37,4	1,838952537
				Media	1,598065540
	TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 2 (°C)	CEM 2 (°C)	λ (W/m°C)
Ensayo 1	68,6	21,9	42,6	37,1	1,526993007
Ensayo 2	69,1	21,8	43,1	37,2	1,430378096
Ensayo 3	68,5	20,7	42,5	37	1,567762238
Ensayo 4	68,7	21,6	41,8	37,1	1,838952537
				Media	1,591021470
	TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 3 (°C)	CEM 3 (°C)	λ (W/m°C)
Ensayo 1	68,6	21,9	43,4	37,5	1,409647979
Ensayo 2	69,1	21,8	43	36,9	1,376796974
Ensayo 3	68,5	20,7	43,5	37,6	1,447653194
Ensayo 4	68,7	21,6	41,8	36,9	1,755572998
				Media	1,497417786
	TAC (°C)	TAE (°C)	CIM 4 (°C)	CEM 4 (°C)	λ (W/m°C)
Ensayo 1	68,6	21,9	43,6	36,8	1,196097285
Ensayo 2	69,1	21,8	43,8	37	1,214083710
Ensayo 3	68,5	20,7	42	36	1,420128205
Ensayo 4	68,7	21,6	42,9	37,1	1,451525199
				Media	1,320458650

Una vez calculados los valores de conductividad térmica del hormigón con las diferentes sustituciones de cáscara de almendra, se procedió a hacer un estudio previo de los valores obtenidos comparativamente con los datos de densidad correspondientes a cada probeta y al mismo tiempo con los valores establecidos en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, epígrafe 3.4.1 Hormigones.

Hormigones				
Material	HE			
	ρ kg / m ³	λ W / m·K	c_p J / kg·K	μ
Hormigón armado	$\rho > 2500$	2,50	1000	80
	$2300 < \rho \leq 2500$	2,30	1000	80
Hormigón en masa	$2300 \leq \rho \leq 2600$	2,00	1000	80
	$2000 \leq \rho \leq 2300$	1,65	1000	70
Hormigón con áridos ligeros	$1800 \leq \rho \leq 2000$	1,35	1000	60
	$1600 \leq \rho \leq 1800$	1,15	1000	60

Fig. 3.123 Valores de conductividad térmica reflejados en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, epígrafe 3.4.1 Hormigones. Fuente: Catálogo Técnico de Elementos Constructivos del CTE

Tabla 3.37 Valores medios de la densidad y la conductividad térmica

Tipo de hormigón	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m ⁰ C)
Patrón	2320	1,59806554
10% sustitución	2282	1,59102147
20% sustitución	2209	1,49741778
30% sustitución	2155	1,32045865

Fig. 3.124 Comparación de la conductividad térmica de los hormigones con el Catálogo Técnico de Elementos Constructivos del CTE

Los resultados obtenidos han proporcionado una información interesante del funcionamiento de la caja caliente y su aplicación a la hora de calcular la conductividad térmica del material ensayado. En la Fig. 3.124 se observa que la conductividad térmica del material según su densidad se aproxima bastante a los valores inferiores obtenidos del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE.

De igual forma se visualiza que todas las sustituciones con cáscara de almendra mejoran la conductividad térmica del hormigón patrón. El dato puede prestarse a engaño ya que tanto para la sustitución con porcentaje del 10% como del 20% el descenso del coeficiente de conductividad térmica obedece más bien a una menor densidad del material.

Sin embargo, en la sustitución con cáscara de almendra en un porcentaje del 30%, se observa la bajada del coeficiente de conductividad térmica del hormigón con respecto a la pendiente de la función que relaciona la pérdida de conductividad térmica mientras la densidad es mayor.

Esto significa que la sustitución con cáscara de almendra en un 30% mejora las propiedades térmicas y la condición de aislante térmico del hormigón, más allá del producido simplemente por la bajada de densidad del mismo.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

Capítulo 4. CONCLUSIONES

El trabajo de investigación desarrollado ha cumplido con el objetivo inicialmente fijado que era desarrollar nuevos productos y servicios, encontrando nuevas vías de minimización de generación de residuos con un incremento de gestión de los recursos.

La posibilidad de que la incineración de estos residuos esté causando contaminación al liberar CO₂ hacia la atmósfera ha hecho que se estudiaran vías de uso de este residuo agroindustrial concreto, la cáscara de almendra, para convertirse en un subproducto con mayor valor añadido.

Para satisfacer estas necesidades se ha pormenorizado el estudio de las posibilidades que tiene este residuo desde varias alternativas: a) como adición (ceniza) en sustitución parcial de cemento en los morteros; b) como agregado en sustitución parcial del árido natural en la fabricación tanto de los morteros como de los hormigones.

Realizada la campaña experimental y con la discusión e interpretación de los resultados obtenidos ha quedado demostrada la viabilidad de utilización de la cáscara de almendra para la fabricación y puesta en obra de los morteros y hormigones con diversos porcentajes de sustitución de este residuo (10, 20 y 30%), con las limitaciones según la aplicación de estos materiales de construcción en obra.

Las conclusiones finales a las que se ha llegado en este trabajo de investigación son:

A) MORTEROS

Los residuos de la cáscara de almendra en estado natural ROCA y calcinada ROCCA pueden sustituir parcialmente al árido (arena) o al cemento, en el caso de la fabricación de los morteros.

En el caso de los ROCCA sus características puzolánicas son muy interesantes por razones de ahorro energético, mejoras de tipo tecnológico y protección medioambiental que aportarán a la industria cementera en el proceso de clinkerización el cual demanda grandes cantidades de energía. Contribuyen los ROCCA en aportar ahorro energético al sector dado que la aportación de esta adición puzolánica le ahorraría combustible en su etapa final de proceso.

Es conocido el hecho de que los materiales puzolánicos son capaces de mejorar las propiedades del producto resultante y su uso, con consiguientes ventajas medioambientales, ya que por una parte se haría un menor consumo de las canteras de las que actualmente se extraen los materiales que requiere el clinker y por otra el aprovechamiento de residuos agroindustriales con propiedades puzolánicas, cuyo empleo en cementos y hormigones disminuiría o eliminaría su vertido o bajo aprovechamiento económico.

Desde la perspectiva industrial, la incorporación de puzolanas minimizan algunas de las desventajas que acompañan a los cementos portland tradicionales, como son: la liberación de gran cantidad de hidróxido cálcico; la posibilidad de reacciones de carácter expansivo y su carácter fuertemente exotérmico de las reacciones de hidratación.

Respecto al mortero de referencia la densidad aparente de los morteros en estado endurecido es significativamente menor en aquellos en los que se ha incorporado la cáscara de almendra en estado natural ROCA y calcinada (ceniza) ROCCA. Los resultados de los ensayos confirman densidades del orden de 2,0 Kg/l en los morteros con ceniza de cáscara de almendra y de 1,57 Kg/l en el caso de morteros con un

porcentaje de sustitución del 30% en cáscara de almendra en estado natural ROCA, por lo que con su empleo se fabricarían morteros más ligeros.

Las resistencias mecánicas de los morteros fabricados con proporciones de cáscara de almendra son menores que los morteros de referencia, pero cumplen con los valores establecidos en las Normas UNE-EN 998-2:2012 *Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería* y en la UNE-EN 196-1:2005 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*, para ser utilizados en obra, tanto como morteros de albañilería como de revoco y enlucido.

Los morteros con adición de ceniza de cáscara de almendra tienen un tamaño medio de poro de $0,01\mu\text{m}$, muy inferior comparándolo con los morteros con cáscara de almendra en estado natural, que con un tamaño medio de poro de $0,1\mu\text{m}$ de radio, se asemejan al del mortero de referencia. Por tanto, morteros fabricados con adiciones de ceniza de cáscara de almendra presentan mayores resistencias a la permeabilidad. A pesar de que las probetas de mortero ensayadas con proporciones de ceniza de cáscara de almendra resistieron al ensayo de ataque de sales, es probable que los tamaños de poros pequeños hagan al mortero fabricado ser susceptible a su degradación ante la exposición en medios agresivos. Por otra parte, los morteros fabricados con proporciones de cáscara de almendra en estado natural con tamaños de poro mayores que le confieren permeabilidad le permiten ser resistentes a las acciones de hielo-deshielo, de acuerdo a los resultados derivados de los ensayos de heladicidad a los que fueron sometidas las probetas fabricadas.

Las resistencias a flexión en los morteros con adición de ceniza disminuyen alrededor de un 40% con respecto a los morteros de cemento (referencia) de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexión en un periodo de curado de 28 días. En cambio, la diferencia de resistencia de los morteros con porcentajes de sustitución con cáscara de almendra del 20% respecto al mortero de referencia solo se reduce en un 10% y sorprendentemente el mortero de 10% con cáscara ve incrementada su resistencia a flexión un 24% con respecto al mortero patrón y en el mismo periodo de curado.

La resistencia a compresión tras el ensayo de hielo-deshielo disminuyó alrededor de un 10% en los morteros con proporciones de sustitución del 10 y 20% por ceniza y en proporciones de sustitución del 30% en cáscara. El mortero con un 30% de ceniza sufre una variación superior, en torno al 30%. Como ocurre con la resistencia a flexión, los morteros con el 10 y el 20% de sustitución por cáscara de almendra incrementan sus resistencias alrededor de un 10 %. Tras estos resultados puede derivarse la idea de que morteros fabricados con proporciones de estos residuos ROCA y ROCCA tienen aplicabilidad en zonas climáticas de bajas temperaturas.

Morteros fabricados con proporciones de un 20% y 30% de ceniza de cáscara de almendra tendrían un buen comportamiento si se emplearan en ambientes expuestos al ataque de sales, por ejemplo en zonas costeras. Los resultados muestran que dichos morteros fabricados con esas dosificaciones son resistentes al ataque de sales tanto en cloruros como en sulfatos, con una reducción de sus resistencias a compresión con respecto a las obtenidas a 28 días de edad de tan solo un 10% y un 5% respectivamente.

Los resultados de absorción acústica muestran que los morteros fabricados con incorporaciones de cáscara de almendra en estado natural ROCA o calcinada ROCCA tienen valores de absorción acústica superiores a las que ofrece el mortero de referencia, la cual es muy pequeña. Esta característica acústica hace de estos morteros ser materiales constructivos potenciales para ser empleados en obra donde sea necesario tener control del nivel de ruido, constituyéndose en barreras acústicas, absorbiendo una parte importante de dicho nivel de ruido que se pudiera generar.

Morteros fabricados con las incorporaciones de la cáscara de almendra han incrementado las propiedades de aislamiento térmico con respecto al mortero de referencia. Los valores obtenidos de las conductividades térmicas así lo demuestran, y están conformes con las directrices recogidas en el CTE DB HE-1 *Limitación de la demanda energética*, admitiéndolos como mortero para revoco y enlucido.

El empleo de residuos agroindustriales como la cáscara de almendra en estado natural y/o calcinada aportan beneficios de tipo medioambiental. Considerando el gran volumen de mortero requerido en cualquier obra de edificación o civil y por tanto de cemento, las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂ generados en la fabricación del mismo disminuirían al emplear estos materiales en el proceso de clinkerización como ya fue expuesto al inicio de estas conclusiones.

Los morteros fabricados con proporciones de estos residuos serían más ligeros, disminuyendo con ello las cargas estructurales con el consiguiente ahorro económico en el proceso constructivo.

Finalmente, su novedosa aplicación en actividades industriales como plantas cementeras, la edificación y la obra civil, aportarían al residuo ROCA un mayor valor añadido del que tiene ahora, dejando en parte de ser empleado como biomasa para procesos de combustión.

B) HORMIGONES

Dada la incorporación del residuo cáscara de almendra ROCA en la dosificación del hormigón a fabricar como sustitutivo parcial del árido natural grueso, con lo que ello conlleva, en relación a las posibles variaciones en las propiedades físicas, mecánicas y químicas de un hormigón de referencia (patrón), es por lo que se ha realizado una exhaustiva caracterización de la cáscara de almendra tanto desde el punto de vista físico-mecánico como químico, utilizando en este último caso técnicas avanzadas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Fluorescencia de Rayos X, Espectroscopía infrarroja (IR), puzolanicidad, entre otras.

Completada la etapa experimental llevada a cabo en la fabricación de hormigones con similares porcentajes de sustitución (10, 20 y 30%) por residuos de cáscara de almendra en estado natural ROCA, con la consiguiente obtención de resultados, realizado el análisis e interpretación de los mismos se ha llegado a las siguientes conclusiones:

La gran porosidad y escasa densidad aparente de la cáscara de almendra frente al árido producirá mejoras de ciertas características del hormigón, como son las térmicas y en pequeñas proporciones la resistencia a tracción indirecta, pero por el contrario producirán un efecto adverso en otras como la durabilidad de dicho hormigón ya que este será más absorbente.

La propiedad de la cáscara de almendra, en cuanto a su mayor elasticidad en comparación con el árido al que sustituye, le proporciona en ciertas cantidades una mejora de su resistencia a flexión. Sin embargo, el mayor inconveniente detectado es la propia forma de la cáscara de almendra. La forma laminar de la cáscara junto con una dureza inferior respecto al árido, provocan una caída importante de las resistencias a compresión y ya en mayor volumen descensos de las resistencias tanto a flexión como a flexotracción.

No obstante, el comportamiento entre la cáscara de almendra, la mezcla de áridos y el cemento ha sido bastante aceptable. Cemento y árido fino han recubierto a la cáscara dando un hormigón compacto con buenas prestaciones.

En cuanto a las propiedades del hormigón en estado fresco, los hormigones con incorporación de cáscara de almendra no experimentan cambios significativos. Esto se debe a que la cáscara de almendra fue introducida en el hormigón saturada en agua y secada superficialmente al aire con el fin de que esta no absorbiera el agua destinada al amasado.

La resistencia a compresión del hormigón disminuye con la incorporación de la cáscara de almendra. Esta reducción de resistencias se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de sustitución por cáscara. Sin embargo, esta reducción no es proporcional, observándose una caída más significativa de las resistencias para un hormigón con sustitución parcial del árido grueso del 10% por cáscara de almendra, atenuándose para los hormigones con porcentajes de sustitución por el 20% y el 30%. Esta característica del hormigón es la más afectada por la inclusión de la cáscara de almendra, provocando que sólo el hormigón con sustitución de cáscara con porcentaje del 10% cumpla las limitaciones que indica la Instrucción EHE-08.

La resistencia a flexión del hormigón disminuye con la incorporación de la cáscara de almendra, pero analizando los valores medios, se puede considerar que la resistencia a flexión experimenta un descenso mucho más discreto que la resistencia a compresión.

La resistencia a tracción indirecta del hormigón en valores totales, disminuye con la incorporación de la cáscara de almendra, pero igualmente, si se analizan los valores medios se puede considerar que la resistencia a tracción indirecta experimenta un descenso mucho más discreto que la resistencia a compresión, incluso mejorando levemente en hormigones cuyo porcentaje de sustitución ha sido por el 10% en peso del árido grueso.

La caída de resistencias a tracción indirecta es similar a la de resistencias a flexión, aunque algo ligeramente superiores. Se observó además, que las probetas de hormigón con cáscara de almendra sometidas a ensayo, se fracturaron pero no se separaron completamente, como consecuencia de las propiedades dúctiles de la cáscara de almendra.

El ensayo de penetración de agua bajo presión no aportó datos concluyentes. Sin embargo, comparando los resultados según la presión final indicada por el manómetro, los resultados obtenidos son muy similares siendo ligeramente peores los hormigones con sustitución con cáscara de almendra. Aunque siendo ligeramente peores los resultados obtenidos, los hormigones cumplen las limitaciones que marca la Instrucción EHE-08.

En cuanto a los ensayos de durabilidad se observa una mayor capacidad de absorción por capilaridad de los hormigones con cáscara de almendra, así como de la porosidad efectiva y una menor resistencia a la penetración de agua. El valor relativo de este aumento de absorción capilar es aproximadamente un 65% superior en hormigones con un porcentaje de sustitución por cáscara de almendra del 30%, lo que indica que estos hormigones serán menos resistentes a ataques físicos, químicos y biológicos y por lo tanto menos durables.

En cuanto al ensayo de resistencia hielo-deshielo, los 26 ciclos empleados parecen insuficientes para provocar daños reseñables y estadísticamente válidos en el hormigón. Dicho esto se puede observar que los hormigones con sustitución por cáscara de almendra sufren más pérdida de masa superficial, aunque esta no sea notable. En cuanto a la rotura del hormigón a compresión se observó que la tensión de rotura del mismo aumentaba debido a tener una edad de 61 días frente a los 28 días, lo que lleva a pensar que la cáscara de almendra retrasa el endurecimiento del hormigón.

Los ensayos no destructivos aportaron resultados significativos que permiten establecer una correlación entre las resistencias a compresión de los hormigones con la velocidad de impulsos ultrasónicos.

El ensayo de la caja caliente arrojó resultados significativos, mejorando las propiedades de aislamiento térmico del propio hormigón. Este descenso de la conductividad térmica no es proporcional. Para hormigones con sustitución del 10% y 20% se observa que la conductividad térmica baja siguiendo la pendiente que marca el descenso de la densidad de dicho hormigón. Pero en el hormigón con sustitución del 30%, su conductividad térmica disminuye más rápidamente lo que indica que este descenso no sólo depende de la menor densidad del hormigón, sino de las propiedades de la cáscara de almendra. Este hecho permite concluir que la incorporación de la cáscara de almendra en un porcentaje del 30% mejora la conductividad térmica del hormigón.

Analizando los resultados obtenidos en la campaña experimental se determina que el empleo de hormigones con sustitución del árido grueso por cáscara de almendra al 20% y 30%, no resultan apropiados en elementos estructurales sometidos a sollicitaciones de compresión. Sin embargo, podrían emplearse cuando se les requiera buen comportamiento térmico, siempre que su empleo como se ha manifestado no tenga un uso estructural ya que el hormigón con un 30% de sustitución por cáscara de almendra tiene una densidad similar al hormigón convencional y una conductividad térmica menor, lo que le proporciona una buena inercia térmica, siendo un parámetro muy bien considerado en la cada vez más demandada construcción sostenible.

Otros posibles usos de los hormigones con sustituciones por cáscara de almendra en proporciones del 10%, 20% y 30% es como elementos prefabricados que no estén destinados a soportar cargas excesivas, como barreras de hormigón de las medianas de autovías y autopistas, adoquines de hormigón para pavimentos, bordillos de aceras, barreras anti ruido, etc., con el fin de ahorrar costes y reducir el impacto ambiental en la fabricación de estos hormigones.

Valorando los resultados de los ensayos realizados y la extensa bibliografía existente acerca de los posibles usos del hormigón, se concluye que hormigones con sustitución por cáscara de almendra del 20% sería apropiado su empleo para elaboración de los firmes de carreteras. La principal exigencia para estos pavimentos es la resistencia a flexión a los 28 días, que debe ser superior a $4,5 \text{ N/mm}^2$, característica que cumple dicho hormigón.

Otro empleo acreditado para estos hormigones es su aportación para reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera que actualmente se producen en el proceso de fabricación del hormigón. No obstante, la normativa exige una relación agua/cemento de 0,46 y una consistencia seca del hormigón, por lo que se debería entonces modificar la relación agua/cemento empleada.

El hecho de que no se produzcan caídas de las resistencias a flexión puede ser debido, como ya fue anotado, a que la cáscara de almendra es un material más dúctil que el árido y más elástico que se deforma y que en pequeñas cantidades puede llegar a mejorar las propiedades elásticas del hormigón sin ser perjudicial para la adherencia árido-cemento. Sin embargo, en el caso de la sustitución del 20% por cáscara de almendra se observa una pérdida de resistencias, en torno al 5%, cayendo hasta el 19% en el caso de hormigones con sustituciones del 30% por cáscara de almendra.

En España este tipo de firmes de carreteras es poco utilizado aunque en las jornadas técnicas organizadas por la Asociación Técnica de Carreteras y el Instituto Español del Cemento y Aplicaciones denominadas "*Últimas tecnologías del Hormigón Aplicadas a las Carreteras*" (Valladolid, 6 de marzo de 2013) se expusieron las bondades del hormigón para elaboración de carreteras. Estas son las siguientes:

Ventajas medioambientales:

- Emplean recursos naturales locales prácticamente inagotables (no consumen derivados del petróleo).
- El consumo de áridos de calidad es menor que el de otras alternativas.
- Permiten el empleo de áridos reciclados (RCDs), procedentes de pavimentos existentes.

- Son reciclables en su totalidad al final de su vida útil, posibilitando el ahorro de áridos naturales.
- Son muy duraderos, por lo que se evita el consumo de nuevos recursos y se reducen las emisiones de CO₂ debidas a las operaciones de mantenimiento o refuerzo.
- Pueden capturar CO₂, lo que contribuye a mejorar el balance de emisiones a lo largo de su vida útil.
- Requieren menor iluminación dada su claridad, con la consiguiente disminución del consumo energético.
- Reducen el efecto invernadero y contribuyen al enfriamiento global, al disminuir la cantidad de radiación solar absorbida por la superficie de la Tierra.
- No emiten lixiviados ni volátiles.
- Es una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Ello se traduce en una disminución de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad de clinker empleado e incorporar subproductos industriales como escorias o cenizas volantes, lo que favorece el cumplimiento del protocolo de Kioto y de los compromisos de desarrollo sostenible.

Ventajas técnicas:

- Los pavimentos de hormigón tienen una excelente capacidad estructural.
- La durabilidad es más elevada que la del resto de soluciones sin apenas mantenimiento. Son numerosos los ejemplos de pavimentos sometidos a tráfico importantes que superan los 40 años en muy buenas condiciones de servicio.
- Poseen una alta resistencia a los ataques de carburantes y agentes químicos.
- Pueden dárseles fácilmente una gran variedad de texturas. Las de árido visto permiten obtener niveles de sonoridad inferiores al resto de pavimentos, sobre todo a largo plazo, sin sacrificar la resistencia al deslizamiento.
- Reducen la distancia de frenado, lo que se traduce en mayor seguridad para el usuario.
- Son incombustibles y resistentes al fuego.

Ventajas económicas:

- El consumo de combustible es menor que sobre otros tipos de firmes, por las menores deformaciones que se producen en el pavimento de hormigón al paso de los vehículos. Estas reducciones son especialmente significativas en los vehículos pesados. Algunos estudios llevados a cabo en diferentes países (Suecia, Canadá, Japón) han medido disminuciones del 1,1% en el consumo en vehículos ligeros y del 6,7% en vehículos pesados.
- Con un coste de construcción similar al de otras soluciones, la vida útil es mayor, y menores las necesidades de mantenimiento. Por ello, los costes totales (inversión inicial + conservación) son siempre inferiores a los de cualquier otra solución.
- Debido a que las operaciones de mantenimiento son muy escasas, la afección que producen sobre los usuarios es mínima. Por ello son muy bajos los costes derivados de dichas operaciones, como los debidos a retenciones, accidentes u otros.
- La práctica totalidad de las ventajas medioambientales y técnicas anteriormente citadas también se traducen en ventajas económicas.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

AFAM Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero. (2003). *Morteros Guía General*. p. 54.

ASTM D4404-84 (2004) *Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry*.

ASTM E1050 - 12 *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*.

Balaguru, P.N., Shah, S.P. (1992). *Fibre Reinforced Cement Composites*, New York, McGraw Hill. 531 p.

Bentur, A., Mindess, S. (1993). *Effect of drying and wetting cycles on length and strength changes of wood fibre reinforced cement*. Durability of Building Materials, vol. 2, p. 37-43.

Bestraten, S., Hormías, E., Altemir, A. (2011). *Construcción con tierra en el siglo XXI*. Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC. Informes de la Construcción”, vol. 63, Nº. 523, p. 5-20.

Binici, H.; Cagatay, I.H., Shah, T., Kapur, S. (2008). *Mineralogy of plain portland and blended cement pastes*. Building and Environment, 43 (7), p. 1318-1325.

Bueno de las Heras, J.L., Gutiérrez, L.A., Pizarro, G.C., García F.R. (2012). *Biomasa: caracterización de un recurso energético*. Ed. Universidad de Oviedo, p. 132.

Cánovas Fernández, M. (2013). *Hormigón*. 10ª edición. Ed. Ibergarceta Publicaciones. Madrid p. 692.

Chaudhary A.K., Gope, P., Singh, V.K. (2013). *Effect of Almond Shell Particles on Tensile Property of Particleboard*. Department of Production Engineering-Department of Mechanical Engineering. College of Technology, G.B. Pant University of Agriculture & Technology, Pantnagar, INDIA. J. Mater. Environ. Sci. 4 (1), p. 109-112.

Chaudhary, A.K., Gope, P.C., Singh, V.K., Verma, A., Suman, A. R. (2014). *Thermal analysis of epoxy based coconut fiber-almond shell particle reinforced biocomposites*. Advances in manufacturing science and technology. De Gruyter Open Ltd. Warsaw-Poland, Vol. 38, No. 2.

Chaudhary, A.K., Singh, V.K., Tewari, M. (2012). *Utilization of waste Agriculture byproduct to enhance the economy of farmers*. Indian research journal of extension education, special issue vol.1, p. 89-92.

Chen, P., Cheng, Y., Deng, S., Lin, X., Huang, G., Ruan, R. (2010) *Utilization of almond residues*. Int. J. Agric. & Biol. December, Vol. 3, num. 4. Eng. p. 1-18.

Crespo Escobar, S. (2010). *Materiales de construcción para edificación y obra civil*. Ed. Club Universitario, San Vicente (Alicante), p. 295.

De Eribe Iturrieta, A.O. (2004). *Valorización material en el proceso de fabricación de cemento*; revista técnica Cemento Hormigón, nº. 864; p. 54-62.

El Bakkouri, A., Ezbakhe, H., Aizoul, T., El Bouardi, A. (2005). *Etude thermomecanique du beton allege avec du liege et du beton allege avec des grignons d'olive*, 12 èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger.

Escalera C.A., et al. (2013). *Estudio de morteros de cemento Pórtland con cenizas de rastrojo de maíz: posibilidades de uso en construcciones rurales*. VI Congreso Universidad y Cooperación al Desarrollo. Valencia 24, 25 y 26 de abril de 2013.

Essabir, H., Nekhlaoui, S., Malha, M., Bensalah, M.O., Arrakhiz, F.Z., Qaiss, A., Bouhfid, R. (2013). *Bio-composites based on polypropylene reinforced with Almond Shells particles: Mechanical and thermal properties*. Materials & Design. Volume 51. p. 225-230.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). *Future Fibres*. International Year of Natural Fibers.

Faraldos, M., Goberna, C. (2002). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Ed. CSIC.

Franco, M.P., Gonzalo, J.C. (2000). *Taller de Petrología: enseñanza de la Petrología con el microscopio petrográfico*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 8 (1), p. 38-47.

Gatani, M., Argüello, R. (2007). *Nuevos materiales de construcción sustentable con cáscaras de maní. Ensayos de comportamiento mecánico*. IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis". De 12 a 14 de novembro de 2007, no Campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Campo Grande.

Gómez Soberón, J.M.V. (2002). *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study*. Cement and Concrete Research, vol. 32, nº 8. p. 1301-1311.

Govindarao, V.M.H. (1980). *Utilization of rice husk, a preliminary analysis*. Journal of Scientific & Industrial Research, vol. 39, no. 9, p. 495-515.

Gürü, M., Tekeli, S., Bilici, I. (2006). *Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite*. Materials and design, vol. 27, p. 1148–1151.

Hill, J., Sharp, J.H. (2002). *The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels*. Cement and Concrete Composites, 24 (2), p. 191-199.

Hillman, A.J. (2003). *Determinants of political strategies in US multinationals*. Business & Society, 42 (4), p. 455-484.

IECA. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

Kester, D.E., Ross, N.W. (1996). *Almond Production Manual . History*. In: Micke, W.C. (Ed.). University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Publication 3364. p. 294.

Kumar Metha, P., Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. Edition ed. United States of America. McGraw-Hill. p. 659.

Khyati, T. (2014). *Fabrication and Analysis of Almond Shell Based Composite Material*. Advance Research and Innovations in Mechanical, Material Science, Industrial Engineering and Management - ICARMMIEM-2014.

Kurpiel, F.T. (1997). *Diffusion of cellulose fibre-cement siding and roofing into North America*. In A. A. Moslemi, ed. Proceedings of Inorganic-Bonded Wood and Fibre Composite Materials, p. 41-44.

Kurpiel, F.T. (1998). *Fibre-cement siding is tomorrow's growth product*. Wood Technology, vol. 125, no. 1, p. 50-54.

Lashgari, A., Eshghi, A., Farsi, M. (2013). *A study on some properties of polypropylene based nanocomposites made using almond shell flour and organoclay*. Asian Journal of Chemistry. Vol. 25. No. 2. p. 1043-1049.

Ledbetter, C.A. (2007). *Shell cracking strength in almond (Prunus dulcis [Mill.] D.A. Webb.) and its implication in uses as a value-added product*". Bioresource Technology. Volume 99. Issue 13. p. 5567–5573. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Crop Diseases, Pests and Genetics Research Unit. Parlier, CA. USA.

López Jimeno, C. (1994). *Manual de áridos*. Ed.: Autor-Editor. p. 612.

Luco, L.F., Castillo, A. (2012). *Hormigones ligeros y hormigón poroso*; Seminario Sostenibilidad: Eficiencia Energética, Evaluación de Edificios y Estructuras (S5E), Madrid, Junio 2012.

MacVicar, R., Matuana, L.M., Balatinecz, J.J. (1999). *Aging mechanisms in cellulose fibre reinforced cement composites*. Cement and Concrete Composites, vol. 21, p. 189-196.

Maldonado R.L., Rivera, G.D., Vela, C.F. (2002). *Introducción a la construcción con tierra*. Arquitectura y construcción con tierra: tradición e innovación. Marea Libros. p. 99-116.

Malholtra, V.M., Mehta, P.K. (1996). *Puzzolanic and Cementitious Materiales*. Gordon & Breach Publishers, Amsterdam, 1996.

Marchán Sanz, C., Regueiro, M., González B. (2014). *Panorama Minero 2014*. IGME Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Economía y Competitividad. p. 365.

Martínez García, A., Alemany Baeza, E. (2013). *New Biodegradable And Eco-Friendly Almond Shell Based Masterbatches For Traditional Sectors*. Project: mastAlmond. Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros. Nº. 679. p. 306-310.

Martínez García, A., Ibáñez García, A., León Cabezas, M.A., Sánchez Reche, A. (2015). *Study of the influence of the almond variety in the properties of injected parts with biodegradable almond shell based masterbatches*. Waste and Biomass Valor. Volume 6, Issue 3, p. 363-370.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1993). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York, McGraw-Hill.

Ministerio de Agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. (2015). *Avances Superficies y producciones de cultivos marzo 2015*.

Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)*.

Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*.

Sánchez de Rojas, M.I., Frías, M. (1996). *The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars*. Cement and Concrete Research, 26, N. 2, p. 203-213.

Mohanty, Amar K., Misra Manjusri, M., T. Drzal, L. (2005). *Natural Fibres, Biopolymers, and Bio-composites*, CRC Press, Taylor & Francis. p. 896.

Montoya, J., Arroyo Portero, J.C., Morán Cabré, F., García Meseguer, A. (2009). *Hormigón armado 15ª edición*. Editorial Gustavo Gili, S.L. p. 660.

M. Moranville-Regourd (1998). *LEA'S Chemistry of Cement and Concrete*. 4ª Edition. Ed. Peter C. Hewlett.

Muncharaz Pou, M. (2004). *El Almendro. Manual Técnico*. Ediciones Mundi-Prensa. p. 414.

Nazerian, M., Dalirzadeh, A., Farrokhpayam, S.R. (2014). *Use of Almond Shell Powder in Modification of the Physical and Mechanical Properties of Medium Density Fiberboard*. Bioresources 10 (1). p. 169-181.

Neville, A.M. (1997). *Properties of Concrete*. 4ª Edition. Longman.

OFICEMEN Agrupación de fabricantes de cementos de España. (2004). *La Valorización Energética de Residuos en la Industria Española del Cemento*.

Ospina, M., De Gutiérrez, R.M., Delvasto, S., Monzó, J., Borrachero, M.V., Payá, J. (2009). *Modificación de la morfología de la ceniza de cascarilla de arroz por molienda de alta energía y su efecto en las propiedades reológicas de pastas de cemento portland adicionadas*. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales; S1 (2): p. 577-584.

Pérez-Monserrat, E.M. (2012). *Técnicas de caracterización petrológicas (I): Microscopía Óptica de Polarización (MOP) y Difracción de Rayos X (DRX)*. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. Madrid: Programa Geomateriales, p. 23-30.

Perkins, D., Henke, K.R., Rodríguez, M.P. (2002). *Minerales en lámina delgada* (Vol. 139). Prentice Hall.

Pirayesh, H., Khazaeian, A., Khanjanzadeh, H., Bahrinejad, A. (2011). *Optimum Condition of Manufacturing Wood-Based Composite from Mixture of Wood*

Particles/Walnut and Almond Shells. Key Engineering Materials. Vols. 471-472. p. 91-96.

Pirayesh, H., Khazaeian, A. (2012). *Using almond (Prunus amygdalus L.) shell as a bio-waste resource in wood based composite*, Composites: Part B: Engineering Volume 43. Issue 3. p. 1475-1479.

Pirayesh, H., Khanjanzadehb, H., Salarib, A. (2013). *Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard*. Composites Part B: Engineering Volume 45. Issue 1. p. 858-863.

Pitarch Roig, A.M., Valiente Soler, J.M., Aznar Molla, J. (2003). *Materiales de construcción: Conglomerados: pastas, morteros y preliminares de hormigón*. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial UPV, p. 20.

Rowell, R.M. (1995). *A new generation of composite materials from agro-based fibres*. In P. N. Prasas, M. E. James, T. F. Joo, eds. *Polymers and Other Advanced Materials: Emerging Technologies and Business Opportunity*. Proceedings of the Third International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Kuala Lumpur, Malaysia. p. 66–69. New York, Plenum Press.

Salas, J., et al. (1986). *Empleo de cenizas de cáscara de arroz como adiciones en morteros*. Materiales de Construcción. Vol. 36, 203, julio/agosto/septiembre 1986.

Sata, V., Juturapitakkul, C., Kiattikomol, K. (2007). *Influence of puzzolan from varius by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete*. Construction and Building Materials, 24, p. 1589-1598.

Shid, P. H., Chang, J.E., Chiang, L.C. (2003). *Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash*. Cement and Concrete. Res. Vol. 33. p. 1831-1836.

Skalny, J., Marchand, J., Older, I. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*. Spon Press.

Talero, R., et al. (2009). *Valorización de residuos agroindustriales incinerados como adición puzolánica. Estudio comparativo con el humo de sílice español*. Materiales de Construcción. Vol. 59, 296, p. 53-89.

Taylor, H.F.W. (1997). *Cement*. Edited by A. Press. Edition ed. London: Thomas Telford Publishing.

TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A. Dirección Adjunta de Ingeniería y Servicios Agrarios Subdirección de Servicios Técnicos. (2011). *Caracterización estructural, estudio de mercado y perspectivas de desarrollo ESTUDIO DEL SECTOR DE FRUTOS CÁSCARA*. p. 372.

UNE-EN 196-1:2005 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.*

UNE-EN 196-3:2005+A1:2009 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*

UNE-EN 196-5:2011 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.*

UNE-EN 539-2:2013 *Tejas de arcilla cocida para colocación discontinua. Determinación de las características físicas. Parte 2: Ensayo de resistencia a la helada.*

UNE-EN 933-1:2012 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.*

UNE-EN 933-3:2012 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.*

UNE-EN 933-4:2008 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.*

UNE-EN 933-8:2012 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.*

UNE-EN 1015-10:2000 *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.*

UNE-EN 1015-18:2003 *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.*

UNE-EN 1097-1:2011 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval).*

UNE-EN 1097-2:2010 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.*

UNE-EN 1097-3:1999 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.*

UNE-EN 1097-5:2009 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa.*

UNE-EN 1097-6: 2014 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.*

UNE-EN 1936:2007 *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.*

UNE-EN ISO 8990:1997 *Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada.*

UNE-EN ISO 10534-2:2002 *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.*

UNE-EN 12350-2:2009 *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.*

UNE-EN 12370:1999 *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.*

UNE-EN 12371:2011 *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.*

UNE-EN 12390-3:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.*

UNE-EN 12390-5:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.*

UNE-EN 12390-6:2010 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.*

UNE-EN 12390-8:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.*

UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial.*

UNE-EN 12504-4:2006 *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.*

UNE-EN 14774-1:2010 *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.*

UNE-EN 14918:2011 *Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.*

UNE-EN 15104:2011 *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales.*

UNE 83115:1989 EX *Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.*

UNE 83982:2008 *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund.*

U.S. Census Bureau (2012). *Statistical Abstract of the United States: 2012.*

USDA United States. Department of Agriculture (1999). *Wood Handbook. Wood as an engineering material.* General Technical Report 113. Madison, WI, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.

Vázquez Borges, E., Heredia Lara, S., Escalante Rodríguez, J.C., Ceja Araujo, M., Pavia Sabido, D. (2011). *Aprovechamiento de los residuos de arroz: cascablock.* Revista: Residuos, 2011 Oct.; (125). p. 46-49.

Woodroof, J.G. (1983). *PEANUTS. Production, processing, products.* The AVI Publishing company, INC. Westport, Connecticut.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	
Componentes de los cementos	578
Componentes de los cementos	578
ANEXO 2	
Tablas de resultados – MORTEROS	581
Tabla ANEXO 2.1 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Método balanza hidrostática (UNE-EN 1097-6: 2014)	581
Tabla ANEXO 2.2 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Método picnómetro (UNE-EN 1097-6: 2014)	581
Tabla ANEXO 2.3 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Método peso específico (UNE-EN 1097-6: 2014)	582
Tabla ANEXO 2.4 Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido (UNE-EN 1015-10: 2000)	583
Tabla ANEXO 2.5 Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido (UNE-EN 1015-18:2003)	584
Tabla ANEXO 2.6 Determinación de la porosidad por intrusión de mercurio del mortero endurecido (ASTM D4404-84) (2004)	585
Tabla ANEXO 2.7 Determinación de la resistencia mecánica a flexión del mortero endurecido a las edades de 7, 15, 28, 60 y 90 días (UNE-EN 196-1:2005)	586
Tabla ANEXO 2.8 Determinación de la resistencia mecánica a compresión del mortero endurecido a las edades de 7, 15, 28, 60 y 90 días (UNE-EN 196-1:2005)	590
Tabla ANEXO 2.9 Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos en probetas de mortero endurecido (UNE-EN 12504-4:2006)	595
Tabla ANEXO 2.10 Determinación de la resistencia a la heladicidad (UNE-EN 12371:2011)	600
Tabla ANEXO 2.11 Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)	601
ANEXO 3	
Certificado de conformidad del control de producción en fábrica. Áridos empleados en HORMIGONES	603
ANEXO 4	
Tablas de resultados – HORMIGONES	609
Tabla ANEXO 4.1 Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado (UNE-EN 933-1:2012)	609
Tabla ANEXO 4.2 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena (UNE-EN 933-8:2012)	610
Tabla ANEXO 4.3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)	611
Tabla ANEXO 4.4 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009)	612

Tabla ANEXO 4.5 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)	613
Tabla ANEXO 4.6 Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas (UNE 83115:1989 EX)	615
Tabla ANEXO 4.7 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)	616
Tabla ANEXO 4.8 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4:2008)	617
Tabla ANEXO 4.9 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval) (UNE-EN 1097-1:2011)	618
Tabla ANEXO 4.10 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación (UNE-EN 1097-2:2010)	619
Tabla ANEXO 4.11 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)	620
Tabla ANEXO 4.12 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009) ...	621
Tabla ANEXO 4.13 a. Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)	622
Tabla ANEXO 4.13 b. Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)	623
Tabla ANEXO 4.14 a. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)	624
Tabla ANEXO 4.14 b. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)	625
Tabla ANEXO 4.14 c. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)	626
Tabla ANEXO 4.14 d. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)	627
Tabla ANEXO 4.14 e. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)	628
Tabla ANEXO 4.15 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4:2008)	629
Tabla ANEXO 4.16 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación (UNE-EN 1097-2:2010)	630
Tabla ANEXO 4.17 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)	631
Tabla ANEXO 4.18 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009)	632

Tabla ANEXO 4.19 a. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)	633
Tabla ANEXO 4.19 b. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)	634
Tabla ANEXO 4.19 c. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)	635
Tabla ANEXO 4.20 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total (UNE-EN 1936:2007)	636
Tabla ANEXO 4.21 a. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	637
Tabla ANEXO 4.21 b. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	638
Tabla ANEXO 4.21 c. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	639
Tabla ANEXO 4.21 d. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	640
Tabla ANEXO 4.21 e. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	641
Tabla ANEXO 4.21 f. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	642
Tabla ANEXO 4.21 g. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	643
Tabla ANEXO 4.21 h. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	644
Tabla ANEXO 4.21 i. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	645
Tabla ANEXO 4.21 j. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	646
Tabla ANEXO 4.21 k. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	647
Tabla ANEXO 4.21 l. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	648
Tabla ANEXO 4.21 m. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	649
Tabla ANEXO 4.21 n. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	650
Tabla ANEXO 4.21 o. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	651
Tabla ANEXO 4.21 p. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	652

Tabla ANEXO 4.21 q. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	653
Tabla ANEXO 4.21 r. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	654
Tabla ANEXO 4.21 s. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	655
Tabla ANEXO 4.21 t. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (UNE-EN 12350-2:2009)	656
Tabla ANEXO 4.22 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido (UNE-EN 12390-7:2009)	657
Tabla ANEXO 4.23 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	658
Tabla ANEXO 4.23 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	659
Tabla ANEXO 4.23 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	660
Tabla ANEXO 4.23 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	661
Tabla ANEXO 4.23 e. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	662
Tabla ANEXO 4.23 f. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	663
Tabla ANEXO 4.23 g. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	664
Tabla ANEXO 4.23 h. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	665
Tabla ANEXO 4.23 i. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009	666
Tabla ANEXO 4.23 j. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009	667
Tabla ANEXO 4.23 k. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009	668
Tabla ANEXO 4.24 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas (UNE-EN 12390-5:2009)	669
Tabla ANEXO 4.24 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas (UNE-EN 12390-5:2009)	670
Tabla ANEXO 4.24 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas (UNE-EN 12390-5:2009)	671

Tabla ANEXO 4.24 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas (UNE-EN 12390-5:2009)	672
Tabla ANEXO 4.25 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6:2010)	673
Tabla ANEXO 4.25 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6:2010)	674
Tabla ANEXO 4.25 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6:2010)	675
Tabla ANEXO 4.25 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6:2010)	676
Tabla ANEXO 4.26 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. (UNE-EN 12390-8:2009)	677
Tabla ANEXO 4.26 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. (UNE-EN 12390-8:2009)	678
Tabla ANEXO 4.26 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. (UNE-EN 12390-8:2009)	679
Tabla ANEXO 4.26 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. (UNE-EN 12390-8:2009)	680
Tabla ANEXO 4.27 a. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. (UNE 83982:2008)	681
Tabla ANEXO 4.27 b. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. (UNE 83982:2008)	682
Tabla ANEXO 4.27 c. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. (UNE 83982:2008)	683
Tabla ANEXO 4.27 d. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. (UNE 83982:2008)	684
Tabla ANEXO 4.28 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX)	685
Tabla ANEXO 4.28 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX)	686
Tabla ANEXO 4.28 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX)	687
Tabla ANEXO 4.28 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX)	688
Tabla ANEXO 4.29 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	689
Tabla ANEXO 4.29 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	690

Tabla ANEXO 4.29 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	691
Tabla ANEXO 4.29 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (UNE-EN 12390-3:2009)	692
Tabla ANEXO 4.30 a. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (UNE-EN 12504-4:2006)	693
Tabla ANEXO 4.30 b. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (UNE-EN 12504-4:2006)	694
Tabla ANEXO 4.30 c. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (UNE-EN 12504-4:2006)	695
Tabla ANEXO 4.30 d. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (UNE-EN 12504-4:2006)	696
Tabla ANEXO 4.31 a. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)	697
Tabla ANEXO 4.31 b. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)	698
Tabla ANEXO 4.31 c. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)	699
Tabla ANEXO 4.31 d. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)	700

ANEXO 1

Componentes de los cementos

Componentes de los cementos.

Fuentes: RC-08: Instrucción para la recepción de cementos.

UNE-EN 934-1:2009 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes.

UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.

Componentes principales	
Clinker de cemento	<p>Clinker de cemento Pórtland (K)</p> <p>Se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y pequeñas cantidades de otras materias. Es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en 2/3 de su masa por silicatos de calcio [3CaO.SiO₂] y (2CaO.SiO₂) estando constituido el resto por fases del clinker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos.</p>
	<p>Clinker de cemento Pórtland (K) empleado en cementos resistentes a los sulfatos y en cementos resistentes al agua de mar</p> <p>Las especificaciones adicionales para los cementos comunes resistentes a los sulfatos y al agua de mar son, en cuanto a su clinker, las limitativas de su contenido de aluminato tricálcico y de la suma de sus contenidos de aluminato tricálcico y ferrito-aluminato tetracálcico.</p>
	<p>Clinker de cemento de aluminato de calcio (K)</p> <p>Es un material hidráulico que se obtiene por fusión o sinterización de una mezcla homogénea de materiales aluminosos y calcáreos conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, siendo los principales los óxidos de aluminio, calcio y hierro (Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃), y pequeñas cantidades de óxidos de otros elementos (SiO₂, TiO₂, S²⁻, SO₃, Cl⁻, Na₂O, K₂O, etc.). El componente mineralógico fundamental es el aluminato monocálcico (CaO.Al₂O₃).</p>

Componentes principales	
Escoria granulada de horno alto (S)	<p>La escoria granulada de horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea y que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada.</p> <p>La escoria granulada de horno alto debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂). El resto contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) junto con pequeñas cantidades de otros compuestos. La relación en masa (CaO + MgO)/(SiO₂) será superior a 1,0.</p>
	<p>Las puzolanas son sustancias naturales de composición silíceo o sílico-aluminosa o combinación de ambas. Las puzolanas no endurecen por sí mismas cuando se amasan con agua, pero finamente molidas y en presencia de agua reaccionan, a la temperatura ambiente normal, con el hidróxido de calcio disuelto Ca(OH)₂ para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos. Las puzolanas están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃). El resto contiene óxido de hierro (Fe₂O₃) y otros óxidos. La proporción de óxido de calcio reactivo es de poca importancia para el endurecimiento. El contenido de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) no será menor del 25,0% en masa. Las puzolanas deben prepararse correctamente, es decir, deben ser seleccionadas, homogeneizadas, secadas o tratadas térmicamente y pulverizadas, dependiendo de su estado de producción o de suministro.</p>
Puzolanas (P, Q)	<p>Puzolana natural (P)</p> <p>Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas.</p>
	<p>Puzolana natural</p> <p>Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen</p>

	calcinada (Q)	volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.
	Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. Las cenizas obtenidas por otros métodos no deberán emplearse en los cementos. Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silícea o calcárea. Las primeras tienen propiedades puzolánicas; las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas.	
Cenizas volantes (V, W)	Cenizas volantes silíceas (V)	La ceniza volante silícea es un polvo fino de partículas esféricas que tiene propiedades puzolánicas. Consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3). El resto contiene óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros compuestos.
	Cenizas volantes calcáreas (W)	La ceniza volante calcárea es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de óxido de calcio reactivo (CaO), dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3). El resto contiene óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros compuestos.
Esquisto calcinado (T)	El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800 °C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases del clinker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico. También contiene proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio, además de pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas, como las del cemento Pórtland, así como propiedades puzolánicas.	
Caliza (L, LL)	Son compuestos principalmente de carbonato cálcico en forma de calcita (superior al 85%), que molidos conjuntamente con el Clinker Pórtland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos. Su acción principal es de carácter físico: dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción, fisuración.	
Humo de sílice (D)	El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas conteniendo al menos el 85% en masa de dióxido de silicio amorfo.	

Componentes adicionales minoritarios	
c. Aditivos	d. Adiciones
Los componentes adicionales minoritarios son materiales minerales naturales o derivados del proceso de fabricación del clinker. Estarán correctamente seleccionados, homogeneizados, secados y pulverizados, en función de su estado de producción o suministro. Los componentes adicionales minoritarios no aumentarán sensiblemente la demanda de agua del cemento, no disminuirán la resistencia del hormigón o del mortero en ningún caso, ni reducirán la protección de las armaduras frente a la corrosión. Estos componentes suelen mejorar las propiedades físicas de los cementos (tales como la docilidad o la retención de agua).	
Sulfato de calcio	El sulfato de calcio se añade durante la fabricación del cemento para controlar el fraguado. Puede ser yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), o anhidrita (sulfato de calcio anhidro CaSO_4), o cualquier mezcla de ellos. El yeso y la anhidrita se encuentran en la naturaleza. Además, el sulfato de calcio también puede obtenerse como subproducto de ciertos procesos industriales.
Aditivos	Son sustancias o productos, en estado sólido o líquido, que incorporadas al mortero antes de, o durante el amasado (o durante un amasado adicional), en una proporción inferior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco y/o endurecido, de alguna de sus características, propiedades habituales o comportamiento. Los aditivos deben cumplir los requisitos establecidos en la norma UNE-EN 934-1 ¹ . Por su parte según la norma UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 ² los aditivos son clasificados en:

¹ UNE-EN 934-1:2009 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes.

	Aditivo reductor de agua/plastificante	Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua, o que sin modificar el contenido en agua, aumenta el asiento/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez. Este también puede ser de alta actividad/superplastificante cuando permite reducir fuertemente el contenido en agua.
	Aditivo retenedor de agua	Aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación.
	Aditivo inclusor de aire	Aditivo modificador del contenido de aire, que incrementa la trabajabilidad, permitiendo la reducción del contenido en agua al incorporar durante el amasado, una cantidad controlada de burbujas de aire. Estas burbujas actúan como lubricante del mortero en estado fresco, mejorando la docilidad, también ayuda a disminuir la densidad aparente del mortero fresco, evitando la segregación y exudación del mismo.
	Aditivo acelerador de fraguado	Aditivo que disminuye el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.
	Aditivo acelerador del endurecimiento	Aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de las resistencias iniciales, con o sin modificación del tiempo de fraguado.
	Aditivo retardador de fraguado	Aditivo modificador del tiempo de fraguado y/o endurecimiento (retardadores del fraguado). Este retrasa el tiempo de fraguado del cemento y aumenta el periodo necesario para que los morteros pasen del estado plástico al estado sólido sin influir notablemente en las resistencias finales.
	Aditivo hidrófugo	Aditivo compuesto principalmente por ácidos grasos saturados o insaturados, siendo su función minimizar la absorción de agua por los capilares del mortero endurecido, obteniendo que la capacidad de absorción frente al agua a baja presión (lluvia) es menor que en un mortero fabricado sin este aditivo.
	Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua/plastificante	Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua/plastificante (función principal) y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).

	c. Aditivos	d. Adiciones
Aditivos	Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua de alta actividad/superplastificante Aditivo acelerador de fraguado/reductor de agua/plastificante Resinas	Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua de alta actividad/superplastificante (función principal) y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria). Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua/plastificante (función principal) y los de un aditivo acelerador de fraguado (función secundaria). Definidas como ligantes orgánicos poliméricos que aportan, principalmente al mortero, adherencia química. Se emplean fundamentalmente para la fabricación de morteros cola, impermeables, de reparación, etc. Este tipo de aditivos ayudan a mejorar las propiedades durante la aplicación del mortero, en el fraguado y a lo largo de su vida útil, mediante el aumento de la capacidad adherente, de la elasticidad y mejora de la impermeabilidad.
Adiciones	Son sustancias o productos que se añaden al mortero en proporciones superiores al 5% del peso del conglomerante con el fin de modificar alguna de sus características, propiedades o comportamiento, o conseguir propiedades especiales de los morteros en estado fresco y/o endurecido. Son preferentemente materiales inorgánicos, como: pigmentos, filleres minerales, puzolánicos, cenizas volantes, escorias, de sílice, etc.	

² UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.

ANEXO 2

Tablas de resultados - MORTEROS

**Tabla ANEXO 2.1 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua
Método Balanza hidrostática (UNE-EN 1097-6: 2014)**

Ensayo balanza hidrostática				M ₀	M ₂	M ₃	M ₁	M ₄
Muestra 1	M ₂₁	31,08						
	M _{malla}	1,28						
	M ₃₁	107,12						
Muestra				1000 g	185,6 g	117,9 g	1350 g	903 g
Muestra 2	M ₂₂	81,09						
	M _{malla}	1,39						
	M ₃₂	36,56						

**Tabla ANEXO 2.2 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua
Método Picnómetro (UNE-EN 1097-6: 2014)**

Ensayo picnómetro

Muestra	m. muestra (g)	m. Picn.+ agua (g)	m. Picn.+ muestra (g)	ρ agua (20°C) g/cm ³	ρ muestra
Cáscara polvo 1	10	99,29	102,27	0,9982	1,0281
Cáscara polvo 2	10	100,29	103,35	0,9982	1,0286
Ceniza 1	10	100,18	106,03	0,9982	1,0565
Ceniza 2	10	99,38	105,08	0,9982	1,0555

**Tabla ANEXO 2.3 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua
Método Peso específico (UNE-EN 1097-6: 2014)**

Ensayo volumenómetro de Le Chatelier	Cáscara polvo 1	Cáscara polvo 2	Ceniza cáscara 1	Ceniza cáscara 2
Masa muestra m (g)	30	30	50	50
Volumen inicial V1 (cm ³)	0	0	0	0
Volumen final V2 (cm ³)	20,9	20,7	20,6	20,5
Temperatura (0C)	20	20	20	20
Peso específico ρ_e (g/cm ³)	1,44	1,45	2,43	2,44

**Tabla ANEXO 2.4 Determinación de la densidad aparente en seco
del mortero endurecido (UNE-EN 1015-10: 2000)**

Probeta	Peso sat. (g)	Peso seco (g)	V (cm ³)	m (msat-min) (g)	ρ (kg/cm ³)	ρ_m (kg/cm ³)
PP/1	556,43	542,96	256	13,47	2,1209375	
PP/2	558,88	545,46	256	13,42	2,13070313	2,128
PP/3	558,06	545,5	256	12,56	2,13085938	
C-10/1	534,14	518,31	256	15,83	2,02464844	
C-10/2	528,69	512,64	256	16,05	2,0025	2,013
C-10/3	531,65	515,07	256	16,58	2,01199219	
C-20/1	548,52	530,92	256	17,6	2,07390625	
C-20/2	546,43	529,39	256	17,04	2,06792969	2,072
C-20/3	549,62	531,03	256	18,59	2,07433594	
C-30/1	527,56	512,57	256	14,99	2,00222656	
C-30/2	528,59	514,39	256	14,2	2,00933594	2,005
C-30/3	526,52	513	256	13,52	2,00390625	
A-10/1	503,18	459,17	256	44,01	1,79363281	
A-10/2	505,64	462,03	256	43,61	1,80480469	1,801
A-10/3	503,87	462,18	256	41,69	1,80539063	
A-20/1	466,62	429,73	256	36,89	1,67863281	
A-20/2	465,68	428,05	256	37,63	1,67207031	1,669
A-20/3	465,72	423,89	256	41,83	1,65582031	
A-30/1	481,14	403,52	256	77,62	1,57625	
A-30/2	479,12	401,5	256	77,62	1,56835938	1,572
A-30/3	476,31	402,42	256	73,89	1,57195313	

Tabla ANEXO 2.5 Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido (UNE-EN 1015-18:2003)

PROBETA	Peso seca	M1 (g) (10 min.)	M2 (g) (90 min.)	M3 (g) (24 h.)	C kg/(m.min ^{0,5})	C _m Kg/(m ² .min ^{0,5})
PP/1 ₁	264,75	265,7	267,47	273,23	0,177	0,1771667
PP/1 ₂	289,04	290,04	291,78	297,65	0,174	
PP/2 ₁	240,11	241,13	242,97	248,97	0,184	
PP/2 ₂	316,97	318,03	319,83	325,87	0,18	
PP/3 ₁	274,81	275,95	277,66	283,49	0,171	
PP/3 ₂	281,89	282,92	284,69	290,45	0,177	
C-10/1 ₁	244,24	247,16	253,06	266,88	0,59	0,876
C-10/1 ₂	286,13	289,05	294,78	310,61	0,573	
C-10/2 ₁	261,41	246,23	269,67	285	2,344	
C-10/2 ₂	270,7	273,79	279,56	295,06	0,577	
C-10/3 ₁	264,93	267,64	273,51	289,11	0,587	
C-10/3 ₂	264,24	267,05	272,9	288,51	0,585	
C-20/1 ₁	262,28	282,56	289,53	283,07	0,697	0,721
C-20/1 ₂	279,1	265,71	272,84	301,1	0,713	
C-20/2 ₁	252,04	255,58	263	272,61	0,742	
C-20/2 ₂	288,55	291,9	299,24	311,3	0,734	
C-20/3 ₁	295,91	299,35	306,53	319,11	0,718	
C-20/3 ₂	253,94	257,43	264,65	274,03	0,722	
C-30/1 ₁	263,66	268,41	279,13	287,45	1,072	1,0658333
C-30/1 ₂	262,95	267,84	278,42	286,36	1,058	
C-30/2 ₁	273,58	278,58	289,07	297,76	1,049	
C-30/2 ₂	257,83	262,64	273,03	280,44	1,039	
C-30/3 ₁	252,88	257,72	267,86	275,03	1,014	
C-30/3 ₂	278,02	282,02	293,65	302,6	1,163	
A-10/1 ₁	219,59	220,86	221,82	225,17	0,096	0,0893333
A-10/1 ₂	244,74	246,05	246,83	250,01	0,078	
A-10/2 ₁	232,28	233,69	234,73	237,41	0,104	
A-10/2 ₂	234,42	235,57	236,69	239,46	0,112	
A-10/3 ₁	238,23	239,38	240,03	242,34	0,065	
A-10/3 ₂	231,31	232,63	233,44	236,12	0,081	
A-20/1 ₁	207,4	209,48	210,69	214,42	0,121	0,107
A-20/1 ₂	228,32	229,92	230,96	234,5	0,104	
A-20/2 ₁	203,98	205,9	206,92	210,58	0,102	
A-20/2 ₂	234,76	236,33	237,2	240,68	0,087	
A-20/3 ₁	236,36	238,28	239,4	243,14	0,112	
A-20/3 ₂	204,93	206,56	207,72	211,85	0,116	
A-30/1 ₁	205,54	208,23	210,36	215,47	0,213	0,182
A-30/1 ₂	207,78	210,36	211,82	217,65	0,146	
A-30/2 ₁	190,73	193,91	195,83	236,312	0,192	
A-30/2 ₂	225,8	228,77	230,66	202,06	0,189	
A-30/3 ₁	215,61	218,32	220	225,72	0,168	
A-30/3 ₂	196,44	199,17	201,01	206,89	0,184	

**Tabla ANEXO 2.6 Determinación de la porosidad por intrusión de mercurio
del mortero endurecido (ASTM D4404-84) (2004)**

Probeta	Peso sat. (g)	Peso seco (g)	ρ agua (20°C) (g/cm ³)	poros (msat- min)	volumen aparente de poros (cm ³)	volumen aparente medio de poros (cm ³)	volumen probeta (cm ³)	Porosidad efectiva (%)	Porosidad efectiva media (%)
PP/1	556,43	542,96	0,9982	13,47	13,49428		256	5,27	
PP/2	558,88	545,46	0,9982	13,42	13,44419	13,174	256	5,25	5,146
PP/3	558,06	545,5	0,9982	12,56	12,58264		256	4,91	
C10/1	534,14	518,31	0,9982	15,83	15,85854		256	6,19	
C10/2	528,69	512,64	0,9982	16,05	16,07894	16,182	256	6,28	6,321
C10/3	531,65	515,07	0,9982	16,58	16,60989		256	6,49	
C20/1	548,52	530,92	0,9982	17,6	17,63173		256	6,88	
C-20/2	546,43	529,39	0,9982	17,04	17,07072	17,775	256	6,67	6,943
C20/3	549,62	531,03	0,9982	18,59	18,62352		256	7,27	
C30/1	527,56	512,57	0,9982	14,99	15,01703		256	5,87	
C30/2	528,59	514,39	0,9982	14,2	14,22560	14,262	256	5,56	5,571
C30/3	526,52	513	0,9982	13,52	13,54437		256	5,29	
A10/1	503,18	459,17	0,9982	44,01	44,08936		256	17,22	
A10/2	505,64	462,03	0,9982	43,61	43,68863	43,181	256	17,06	16,868
A10/3	503,87	462,18	0,9982	41,69	41,76517		256	16,31	
A20/1	466,62	429,73	0,9982	36,89	36,95652		256	14,44	
A20/2	465,68	428,05	0,9982	37,63	37,69785	38,853	256	14,72	15,177
A20/3	465,72	423,89	0,9982	41,83	41,90542		256	16,37	
A30/1	481,14	403,52	0,9982	77,62	77,75996		256	30,37	
A30/2	479,12	401,5	0,9982	77,62	77,75996	76,514	256	30,37	29,888
A30/3	476,31	402,42	0,9982	73,89	74,02324		256	28,91	

Tabla ANEXO 2.7 Determinación de la resistencia mecánica a flexión del mortero endurecido a las edades de 7, 15, 28, 60 y 90 días (UNE-EN 196-1:2005)

Cálculo de la resistencia a flexión. Edad 7 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	100	2880	6,75	6,98
	PP/2				2910	6,82	
	PP/3				3150	7,38	
C10	C10/1	40	40	100	1310	3,07	3,23
	C10/2				1420	3,33	
	C10/3				1400	3,28	
C20	C20/1	40	40	100	1540	3,60	3,51
	C20/2				1470	3,44	
	C20/3				1490	3,49	
C30	C30/1	40	40	100	1180	2,76	2,60
	C30/2				1186	2,78	
	C30/3				970	2,27	
A10	A10/1	40	40	100	1310	3,07	3,30
	A10/2				1550	3,63	
	A10/3				1360	3,19	
A20	A20/1	40	40	100	910	2,13	2,18
	A20/2				1000	2,34	
	A20/3				880	2,06	
A30	A30/1	40	40	100	830	1,94	1,72
	A30/2				520	1,22	
	A30/3				850	1,99	

Cálculo de la resistencia a flexión. Edad 15 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	100	3417	8,01	7,89
	PP/2				3440	8,06	
	PP/3				3244	7,60	
C10	C10/1	40	40	100	1899	4,45	4,48
	C10/2				1969	4,61	
	C10/3				1869	4,38	
C20	C20/1	40	40	100	1818	4,26	4,31
	C20/2				1799	4,22	
	C20/3				1894	4,44	
C30	C30/1	40	40	100	1357	3,18	3,30
	C30/2				1471	3,45	
	C30/3				1395	3,27	
A10	A10/1	40	40	100	1410	3,30	3,33
	A10/2				1450	3,40	
	A10/3				1400	3,28	
A20	A20/1	40	40	100	1490	3,49	3,70
	A20/2				1640	3,84	
	A20/3				1610	3,77	
A30	A30/1	40	40	100	900	2,11	2,52
	A30/2				1090	2,55	
	A30/3				1240	2,91	

Cálculo de la resistencia a flexión. Edad 28 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	100	3497	8,20	8,57
	PP/2				3819	8,95	
C10	C10/1	40	40	100	2222	5,21	5,39
	C10/2				2379	5,58	
C20	C20/1	40	40	100	2102	4,93	4,74
	C20/2				1944	4,56	
C30	C30/1	40	40	100	1553	3,64	3,80
	C30/2				1691	3,96	
A10	A10/1	40	40	100	1620	3,80	4,02
	A10/2				1810	4,24	
A20	A20/1	40	40	100	1376	3,23	3,34
	A20/2				1471	3,45	
A30	A30/1	40	40	100	1395	3,27	3,10
	A30/2				1250	2,93	

Cálculo de la resistencia a flexión. Edad 60 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	100	3371	7,90
C10	C10/1	40	40	100	2872	6,73
C20	C20/1	40	40	100	1540	3,61
C30	C30/1	40	40	100	1190	2,79
A10	A10/1	40	40	100	2298	5,39
A20	A20/1	40	40	100	1464	3,43
A30	A30/1	40	40	100	1685	3,95

Cálculo de la resistencia a flexión. Edad 90 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	100	2920	6,84	6,68
	PP/2				2700	6,33	
	PP/3				2930	6,87	
C10	C10/1	40	40	100	3030	7,10	7,10
	C10/2				3090	7,24	
	C10/3				2970	6,96	
C20	C20/1	40	40	100	1850	4,34	4,35
	C20/2				1910	4,48	
	C20/3				1810	4,24	
C30	C30/1	40	40	100	790	1,85	2,28
	C30/2				1000	2,34	
	C30/3				1130	2,65	
A10	A10/1	40	40	100	1740	4,08	4,64
	A10/2				1880	4,41	
	A10/3				2320	5,44	
A20	A20/1	40	40	100	1410	3,30	3,42
	A20/2				1500	3,52	
	A20/3				1470	3,45	
A30	A30/1	40	40	100	1030	2,41	2,68
	A30/2				1210	2,84	
	A30/3				1190	2,79	

Tabla ANEXO 2.8 Determinación de la resistencia mecánica a compresión del mortero endurecido a las edades de 7, 15, 28, 60 y 90 días (UNE-EN 196-1:2005)

Cálculo de la resistencia a compresión. Edad 7 días						
Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm²)	Valor medio (N/mm²)
PP	PP/1	40	40	57270	35,79	35,61
				55340	34,59	
	PP/2			56220	35,14	
				56410	35,26	
	PP/3			57390	35,87	
				59220	37,01	
C10	C10/1	40	40	18610	11,63	11,62
				18620	11,64	
	C10/2			18390	11,49	
				18330	11,46	
	C10/3			18560	11,60	
				19080	11,93	
C20	C20/1	40	40	23450	14,66	15,02
				22580	14,11	
	C20/2			24450	15,28	
				23580	14,74	
	C20/3			24530	15,33	
				25620	16,01	
C30	C30/1	40	40	17660	11,04	10,34
				17890	11,18	
	C30/2			16200	10,13	
				17050	10,66	
	C30/3			18260	11,41	
				12220	7,64	
A10	A10/1	40	40	18630	11,64	12,63
				20530	12,83	
	A10/2			20500	12,81	
				20340	12,71	
	A10/3			20260	12,66	
				21010	13,13	
A20	A20/1	40	40	11530	7,21	6,88
				10520	6,58	
	A20/2			11120	6,95	
				1110	6,94	
	A20/3			11490	7,18	
				10330	6,46	
A30	A30/1	40	40	10360	6,48	6,40
				10000	6,25	
	A30/2			10350	6,47	
				9780	6,11	
	A30/3			11080	6,93	
				9840	6,15	

Cálculo de la resistencia a compresión. Edad 15 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm²)	Valor medio (N/mm²)
PP	PP/1	40	40	65538	40,96	39,69
				66624	41,64	
	PP/2			64876	40,55	
				64263	40,16	
	PP/3			64718	40,45	
				54984	34,37	
C10	C10/1	40	40	27211	17,01	17,34
				27830	17,39	
	C10/2			27161	16,98	
				28468	17,79	
	C10/3			27596	17,25	
				28177	17,61	
C20	C20/1	40	40	25734	16,08	17,01
				25684	16,05	
	C20/2			28922	18,08	
				25678	16,05	
	C20/3			28644	17,90	
				28594	17,87	
C30	C30/1	40	40	20514	12,82	12,29
				20262	12,66	
	C30/2			19820	12,39	
				19151	11,97	
	C30/3			19650	12,28	
				18621	11,64	
A10	A10/1	40	40	16910	10,57	10,76
				16420	10,26	
	A10/2			18820	11,76	
				18080	11,30	
	A10/3			16170	10,11	
				16900	10,56	
A20	A20/1	40	40	26110	16,32	15,28
				23660	14,79	
	A20/2			24850	15,53	
				23600	14,75	
	A20/3			24850	15,53	
				23600	14,75	
A30	A30/1	40	40	26310	16,44	12,37
				26980	16,86	
	A30/2			15360	9,60	
				17040	10,65	
	A30/3			16990	10,62	
				16110	10,07	

Cálculo de la resistencia a compresión. Edad 28 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	74735	46,71	44,57
				67912	42,45	
	PP/2			71560	44,73	
				71068	44,42	
C10	C10/1	40	40	31377	19,61	18,82
				30439	19,02	
	C10/2			30800	19,25	
				27805	17,38	
C20	C20/1	40	40	30550	19,09	18,55
				30216	18,89	
	C20/2			29042	18,15	
				28941	18,09	
C30	C30/1	40	40	21227	13,27	14,57
				25270	15,79	
	C30/2			22870	14,29	
				23866	14,92	
A10	A10/1	40	40	38984	24,37	20,61
				32040	20,03	
	A10/2			30580	19,11	
				30300	18,94	
A20	A20/1	40	40	19519	12,20	11,73
				17550	10,97	
	A20/2			19744	12,34	
				18255	11,41	
A30	A30/1	40	40	20546	12,84	12,16
				19900	12,44	
	A30/2			19070	11,92	
				18292	11,43	

Cálculo de la resistencia a compresión. Edad 60 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/3	40	40	87214	54,51	54,26
				86425	54,02	
C10	C103	40	40	37828	23,64	22,90
				35436	22,15	
C20	C203	40	40	35228	22,02	21,10
				32283	20,18	
C30	C30/3	40	40	22187	13,87	13,98
				22540	14,09	
A10	A10/3	40	40	33833	21,15	21,71
				35651	22,28	
A20	A20/3	40	40	20880	13,05	13,55
				22471	14,04	
A30	A30/3	40	40	17787	11,12	11,37
				18595	11,62	

Cálculo de la resistencia a compresión. Edad 90 días

Probeta		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/1	40	40	93900	58,69	58,71
				94010	58,76	
	PP/2			93500	58,44	
				93800	58,62	
	PP/3			94100	58,81	
				94300	58,94	
C10	C10/1	40	40	41050	25,66	25,72
				41450	25,91	
	C10/2			41200	25,75	
				41300	25,81	
	C10/3			41000	25,62	
				40900	25,56	
C20	C20/1	40	40	36240	22,65	23,03
				35160	21,98	
	C20/2			34910	21,82	
				37130	23,21	
	C20/3			38920	24,33	
				38710	24,19	
C30	C30/1	40	40	28630	17,89	17,56
				27720	17,33	
	C30/2			28420	17,76	
				26470	16,54	
	C30/3			27560	17,23	
				29750	18,59	
A10	A10/1	40	40	38730	24,21	24,02
				37210	23,26	
	A10/2			36310	22,69	
				38760	24,23	
	A10/3			38860	24,29	
				40740	25,46	
A20	A20/1	40	40	22560	14,29	14,42
				22840	14,28	
	A20/2			23390	14,62	
				23250	14,53	
	A20/3			23850	14,91	
				22540	14,09	
A30	A30/1	40	40	18340	11,46	11,24
				16910	10,57	
	A30/2			18290	11,43	
				18490	11,56	
	A30/3			16920	10,58	
				18940	11,84	

Tabla ANEXO 2.9 Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos en probetas de mortero endurecido (UNE-EN 12504-4:2006)

Probetas para ensayo a resistencia 15 días										
	Probetas	x	v (mm/s)	v. media (mm/s)	y	v (mm/s)	v. media (mm/s)	z	v (mm/s)	v. media (mm/s)
PP	PP/1	60	2,67		32,8	1,22		18,8	2,13	
	PP/2	48,8	3,28	2,70	28,7	1,39	1,33	28,8	1,39	1,62
	PP/3	73,9	2,17		29,2	1,37		29,5	1,36	
C10	C10/1	61,5	2,60		30,6	1,31		18,9	2,12	
	C10/2	52,8	3,03	2,68	29,8	1,34	1,34	20,2	1,98	2,10
	C10/3	66,2	2,42		29	1,38		18,2	2,20	
C20	C20/1	51,7	3,09		16,8	2,38		23,5	1,70	
	C20/2	51,8	3,09	3,11	16,1	2,48	2,35	15,6	2,56	2,30
	C20/3	50,7	3,16		18,3	2,19		15,2	2,63	
C30	C30/1	68	2,35		23,5	1,70		22,9	1,75	
	C30/2	70	2,29	2,35	30,8	1,30	1,45	21,1	1,90	1,82
	C30/3	66,5	2,41		29,8	1,34		21,9	1,83	
A10	A10/1	107	1,50		32	1,25		35	1,14	
	A10/2	103	1,55	1,53	37	1,08	1,18	36	1,11	1,16
	A10/3	104	1,54		33	1,21		33	1,21	
A20	A20/1	59	2,71		45,8	0,87		25,4	1,57	
	A20/2	49	3,27	3,10	35	1,14	1,05	27	1,48	1,43
	A20/3	48	3,33		35	1,14		32,8	1,22	
A30	A30/1	86,9	1,84		25,6	1,56		15	2,67	
	A30/2	89,6	1,79	2,16	26,2	1,53	1,49	20	2,00	2,25
	A30/3	56	2,86		28,9	1,38		19,2	2,08	

Probetas para ensayo a resistencia 28 días

	Probetas	x	v (mm/s)	v. media (mm/s)	y	v (mm/s)	v. media (mm/s)	z	v (mm/s)	v. media (mm/s)
PP	PP/1	60,2	2,66		28,50	1,40		26,80	1,49	
	PP/2	59,3	2,70	2,72	27,80	1,44	1,39	26,30	1,52	1,49
	PP/3	57,3	2,79		30,20	1,32		27,50	1,45	
C10	C10/1	68,2	2,35		29,60	1,35		31,20	1,28	
	C10/2	68,1	2,35	2,34	31,90	1,25	1,32	34,80	1,15	1,24
	C10/3	68,6	2,33		29,60	1,35		30,80	1,30	
C20	C20/1	62,8	2,55		17,60	2,27		16,60	2,41	
	C20/2	62,8	2,55	2,55	14,80	2,70	2,37	17,80	2,25	2,35
	C20/3	62,3	2,57		18,80	2,13		16,80	2,38	
C30	C30/1	49,6	3,23		23,80	1,68		14,60	2,74	
	C30/2	48,8	3,28	3,22	29,80	1,34	1,61	14,20	2,82	2,45
	C30/3	50,7	3,16		22,30	1,79		22,40	1,79	
A10	A10/1	47	3,40		25,20	1,59		13,20	3,03	
	A10/2	48,9	3,27	3,28	26,00	1,54	1,50	13,00	3,08	2,97
	A10/3	50,8	3,15		29,00	1,38		14,20	2,82	
A20	A20/1	57,5	2,78		12,80	3,13		20,80	1,92	
	A20/2	51,2	3,13	3,03	11,90	3,36	3,29	26,30	1,52	1,56
	A20/3	50,2	3,19		11,80	3,39		32,50	1,23	
A30	A30/1	86	1,86		17,90	2,23		21,00	1,90	
	A30/2	56,6	2,83	2,26	21,60	1,85	2,11	22,20	1,80	1,98
	A30/3	76,9	2,08		17,90	2,23		18,00	2,22	

Probetas ensayadas a densidad

	Probetas	x	v (mm/s)	v. media (mm/s)	y	v (mm/s)	v. media (mm/s)	z	v (mm/s)	v. media (mm/s)
PP	PP/1	76,6	2,09		30,80	1,30		30,60	1,31	
	PP/2	78,8	2,03	2,05	30,60	1,31	1,23	31,80	1,26	1,28
	PP/3	78,8	2,03		36,80	1,09		31,20	1,28	
C10	C10/1	62,7	2,55		17,50	2,29		17,80	2,25	
	C10/2	63,4	2,52	2,60	21,90	1,83	1,79	22,30	1,79	1,76
	C10/3	58,5	2,74		31,60	1,27		32,50	1,23	
C20	C20/1	86,3	1,85		24,80	1,61		25,60	1,56	
	C20/2	88,8	1,80	1,84	23,80	1,68	1,72	23,60	1,69	1,60
	C20/3	86,4	1,85		21,30	1,88		25,90	1,54	
C30	C30/1	83,8	1,91		21,90	1,83		26,60	1,50	
	C30/2	84,2	1,90	1,90	22,90	1,75	1,73	22,70	1,76	1,47
	C30/3	84,8	1,89		24,80	1,61		35,30	1,13	
A10	A10/1	60,8	2,63		37,80	1,06		17,00	2,35	
	A10/2	66,6	2,40	2,56	34,50	1,16	1,13	18,60	2,15	2,20
	A10/3	60,6	2,64		34,30	1,17		19,20	2,08	
A20	A20/1	92,8	1,72		37,50	1,07		23,50	1,70	
	A20/2	91,2	1,75	1,75	27,80	1,44	1,18	22,20	1,80	1,69
	A20/3	90,8	1,76		38,50	1,04		25,60	1,56	
A30	A30/1	122	1,31		29,60	1,35		23,50	1,70	
	A30/2	106,8	1,50	1,43	49,20	0,81	1,26	28,80	1,39	1,57
	A30/3	108,6	1,47		24,90	1,61		24,90	1,61	

Probetas ensayadas a densidad, secas

	Probetas	x	v (mm/s)	v. media (mm/s)	y	v (mm/s)	v. media (mm/s)	z	v (mm/s)	v. media (mm/s)
PP	PP/1	76,2	2,1		18,8	2,15		17,9	2,23	
	PP/2	75,3	2,12	2,11	19,3	2,07	2,035	19,2	2,08	2,33
	PP/3	76,3	2,1		21	1,90		14,9	2,68	
C10	C10/1	82,7	1,93		16,1	2,48		16,2	2,47	
	C10/2	84,8	1,89	1,92	16,4	2,43	2,3	19	2,10	2,21
	C10/3	82,2	1,95		19,6	2,04		19,5	2,05	
C20	C20/1	84,2	1,90		29,4	1,36		19,3	2,07	
	C20/2	85,8	1,86	1,89	29,8	1,34	1,39	30	1,33	1,57
	C20/3	84,2	1,90		29,8	1,34		30,4	1,31	
C30	C30/1	85,6	1,87		31,4	1,27		35,8	1,12	
	C30/2	86,8	1,84	1,87	29,8	1,34	1,37	29,7	1,37	1,26
	C30/3	86,2	1,85		28,7	1,39		30,3	1,32	
A10	A10/1	60,8	2,63		17	2,35		37,8	1,058	
	A10/2	66,6	2,40	2,56	18,6	2,15	2,19	34,5	1,16	1,13
	A10/3	60,6	2,64		19,2	2,08		34,3	1,16	
A20	A20/1	92,8	1,72		23,5	1,70		37,5	1,07	
	A20/2	91,2	1,75	1,75	22,2	1,80	1,69	27,8	1,44	1,18
	A20/3	90,8	1,76		25,6	1,56		38,5	1,09	
A30	A30/1	122	1,31		23,5	1,70		49,6	0,81	
	A30/2	106,8	1,49	1,43	28,8	1,39	1,56	49,2	0,81	0,85
	A30/3	108,6	1,47		24,9	1,60		42,9	0,93	

Ultrasonidos, probetas después de ensayo de sales Na₂SO₄

Probetas	x	v (mm/s)	y	v (mm/s)	z	v (mm/s)
PP	84,9	1,9	32,8	1,22	29,8	1,34
C10						
C20						
C30						
A10						
A20	137,2	1,2	37	1,08	40	1,00
A30	114,8	1,4	34,7	1,15	36,8	1,09

Ultrasonidos, probetas después de ensayo de sales NaCl

Probetas	x	v (mm/s)	y	v (mm/s)	z	v (mm/s)
PP	81,2	2,0	48,5	0,82	27,5	1,45
C10	63,4	2,5	30,8	1,30	20,4	1,96
C20	95,3	1,7	18,1	2,21	20,8	1,92
C30	66,8	2,4	19,3	2,07	23,6	1,69
A10	74,2	2,2	23,2	1,72	54,9	0,73
A20	216,6	0,7	115,8	0,35	38,8	1,03
A30						

Ultrasonidos, probetas después de ensayo de heladicidad

Probetas	x	v (mm/s)	y	v (mm/s)	z	v (mm/s)
PP	79,4		31,6	1,27	33,3	1,20
C10	52,4		14,8	2,70	23,8	1,68
C20	56,2		53,6	0,75	34,3	1,17
C30	59,4		24,8	1,61	39,4	1,02
A10	53,3		23,3	1,38	18,8	2,13
A20	86		89,4	1,72	23,5	1,70

A30

0,45

64,4

0,62

**Tabla ANEXO 2.10 Determinación de la resistencia a la heladicidad
(UNE-EN 12371:2011)**

Ensayo a flexión Probetas H/D

Probeta	Altura (mm)	Base (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N×mm ²)
PP/1	40	40	100	2556	5,99
C10/1	40	40	100	1275	2,99
C20/1	40	40	100	1609	3,77
C30/1	40	40	100	1004	2,35
A10/1	40	40	100	2127	4,99
A20/1	40	40	100	1319	3,09
A30/1	40	40	100	738	1,73

Ensayo a compresión Probetas H/D

Probetas		Altura (mm)	Base (mm)	Carga (N)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Valor medio (N/mm ²)
PP	PP/3	40	40	69502	43,44	44,06
				71478	44,67	
C10	C103	40	40	27394	17,12	16,92
				26751	16,72	
C20	C203	40	40	28316	17,70	17,65
				28150	17,59	
C30	C30/3	40	40	15143	9,46	9,65
				15730	9,83	
A10	A10/3	40	40	38314	23,95	23,55
				37033	23,15	
A20	A20/3	40	40	20956	13,10	12,48
				18974	11,86	
A30	A30/3	40	40	17412	10,88	10,69

**Tabla ANEXO 2.11 Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)**

Fecha ensayo: 25/06/2014

Hora inicio: 09:10

Tiempo (min.)	CAJA		PP		A-10		A-20		A-30	
					Temperaturas en °C					
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
0	21,7	22,6	21,6	21,6	21,7	21,8	22,3	22,2	22,4	22,4
5	22,3	39,9	21,7	23,4	21,8	23,8	22,4	25,1	22,6	25,4
10	22,6	50,5	22,5	25,5	22,3	26,1	23,4	26,1	23,7	28,1
15	22,6	55,1	23,7	28,0	23,5	28,5	24,8	31,0	25,4	31,1
30	22,6	56,5	27,6	33,9	27,1	33,0	29,4	36,0	29,9	36,2
45	22,4	57,0	30,7	37,3	30,0	36,2	32,1	38,9	33,0	39,4
60	22,8	57,3	32,7	40,1	31,9	38,2	33,5	40,0	34,7	41,1
75	22,9	58,0	34,0	41,6	33,3	39,2	34,6	41,1	35,7	42,2
90	22,9	57,9	35,0	42,6	34,3	40,8	34,9	42,0	36,4	42,9
105	23,0	57,9	35,6	43,1	34,9	41,4	35,3	42,3	36,9	43,3
120	23,1	58,0	36,2	43,6	35,5	42,0	35,6	47,7	37,2	43,7
135	23,0	58,8	36,6	44,0	35,9	42,9	36,0	43,1	37,7	44,1
150	23,3	59,0	36,8	44,3	36,1	44,0	36,0	43,2	37,7	44,3
165	23,4	58,9	37,1	44,6	36,3	44,4	36,2	43,4	38,0	44,5
180	23,3	59,3	37,3	44,8	36,5	44,7	36,4	43,5	38,1	44,7
195	23,3	59,3	37,5	45,0	36,7	44,8	36,4	43,7	38,2	44,8
210	23,4	59,5	37,6	45,1	36,8	44,9	36,5	43,7	38,3	44,8
225	23,4	59,5	37,7	45,1	36,8	45,0	36,6	43,8	38,4	44,9
240	23,4	59,3	37,7	45,2	36,9	45,1	36,6	43,9	38,4	45,0
255	23,3	59,8	37,8	45,3	36,9	45,2	36,7	43,9	38,4	45,0
270	23,4	59,5	37,9	45,3	37,0	45,3	36,7	44,0	38,4	45,0
285	23,2	59,4	37,9	45,3	37,1	45,3	36,7	44,0	38,4	45,0

Leyenda:

- TAC Temperatura ambiente de la cámara
- TAE Temperatura ambiente exterior
- CIM 1 Temperatura cara interna del material 1
- CEM 1 Temperatura cara externa del material 1
- CIM 2 Temperatura cara interna del material 2
- CEM 2 Temperatura cara externa del material 2
- CIM 3 Temperatura cara interna del material 3
- CEM 3 Temperatura cara externa del material 3
- CIM 4 Temperatura cara interna del material 4
- CEM 4 Temperatura cara externa del material 4

Fecha ensayo: 26/06/2014

Hora inicio: 09:10

Tiempo (min.)	CAJA		PP		A-10		A-20		A-30	
	Temperaturas en °C									
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
0	21,6	20,9	20,7	20,6	20,8	20,7	20,9	20,9	21,1	21,1
5	21,7	47,6	21,4	24,5	21,3	24,0	21,4	25,6	21,9	23,8
10	21,9	51,0	22,1	26,1	21,9	26,2	22,0	28,5	22,9	28,1
15	22,1	55,6	23,1	27,9	22,9	27,9	24,3	30,7	24,2	30,3
30	22,4	56,3	27,5	33,3	26,6	32,8	28,7	36,2	29,0	35,8
45	22,7	57,1	30,7	36,6	29,7	36,2	31,5	39,2	32,1	38,8
60	23,0	57,4	32,8	39,5	31,7	38,6	33,1	40,8	34,0	40,6
75	23,1	58,1	34,4	41,2	33,1	40,4	34,1	42,0	35,3	41,8
90	22,9	58,6	35,4	42,2	34,1	41,7	34,7	42,8	35,9	42,6
105	22,4	59,0	36,1	43,0	34,8	42,6	35,2	43,2	36,5	43,2
120	22,9	58,9	36,8	43,7	35,4	43,2	35,6	43,6	37,0	43,7
135	22,8	58,6	37,2	44,2	35,8	43,6	35,8	43,8	37,3	44,0
150	23,1	59,3	37,5	44,6	36,1	44,0	36,1	44,1	37,8	44,3
165	22,8	59,4	37,7	44,8	36,4	44,2	36,3	44,3	38,0	44,5
180	23,0	58,7	38,0	45,0	36,5	44,4	36,6	44,3	38,2	44,8
195	23,4	59,1	38,2	45,1	36,7	44,6	36,9	44,1	38,9	44,9
210	23,4	59,3	38,3	45,3	36,8	44,7	38,2	44,5	38,6	45,1
225	23,6	59,0	38,5	45,4	36,9	44,8	38,3	44,6	38,8	45,2
240	23,9	58,7	38,6	45,6	37,2	44,9	38,4	44,7	38,9	45,3
255	23,9	59,4	38,8	45,6	37,3	45,0	38,5	44,8	39,1	45,4
270	23,3	59,4	38,8	45,9	37,3	45,1	38,5	44,7	39,1	45,5
285	24,0	59,5	39,0	45,9	37,3	45,2	38,5	44,4	39,2	45,6

Coefficiente de conductividad térmica

$$\lambda = \frac{e \cdot ((TAC - TAE) - (CIM - CEM))}{((CIM - CEM) - (R_{si} - R_{se}))}$$

λ	Coefficiente de conductividad térmica (W/m °C)
e	Espesor de la capa (en metros)
$(CIM - CEM)$	Incremento de temperatura entre las caras de la probeta (en °C)
$(TAC - TAE)$	Incremento de temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la caja
R_{se}	Resistencia térmica superficial exterior (m ² °C/W)
R_{si}	Resistencia térmica superficial interior (m ² °C/W)

ANEXO 3**Certificado de conformidad del control de producción en fábrica
Áridos empleados en HORMIGONES****Certificado de conformidad del
control de producción en fábrica****0099/CPR/A60/0673**

En cumplimiento del Reglamento de Productos de Construcción (UE) 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, el organismo notificado AENOR (nº 0099) ha emitido este certificado a favor de

MATERIALES DE CONSTRUCCION PEPE, S.L.

con domicilio social en: AV CRUZ ROJA, S/N 16004 CUENCA (España)

Producto de construcción: Áridos

Ver norma armonizada en el Anexo: ---

Referencias: Detalladas en el Anexo al Certificado

Centro de producción: PARAJE "CERRO LA VIÑA" - PARCELA 1006 DEL POLIG. 504 - CN 420 P.F. 409 16122 VALDEGANGA (Cuenca - España)

Esquema de certificación: Para emitir este certificado se han aplicado todas las disposiciones del sistema 2+ para la evaluación y verificación de constancia de las prestaciones, según lo descrito en el Anexo ZA de las normas armonizadas aplicables mencionadas en el anexo. El control de producción en fábrica cumple los requisitos establecidos en ellas.

Este certificado se concedió por primera vez en la fecha de emisión abajo indicada y permanecerá en vigor hasta su fecha de expiración, siempre y cuando no hayan cambiado los métodos de ensayo y los requisitos del control de producción en fábrica incluidos en la norma armonizada para evaluar las prestaciones de las características declaradas, y el producto y las condiciones de fabricación no se hayan modificado significativamente.

Fecha de emisión: 2007-10-11
Fecha de renovación: 2013-10-11
Fecha de expiración: 2016-10-11

AENOR

Avelino BRITO MARQUINA
Director General de AENOR

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6 28004 Madrid, España
Tel. 902 102 201 - www.aenor.es

Organismo de Control Autorizado acreditado por ENAC con acreditación Nº OC-P137

Certificado de conformidad del control de producción en fábrica

0099/CPR/A60/0673

Anexo al Certificado

Norma Aplicable	Tamaño (d/D)
EN 12620:2002+A1:2008	0/4 ; 4/12 ; 10/22

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Fecha de emisión: 2007-10-11
Fecha de renovación: 2013-10-11
Fecha de expiración: 2016-10-11

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6. 28004 Madrid, España
Tel. 902 102 201 - www.aenor.es

Organismo de Control Autorizado acreditado por ENAC con acreditación N° OC-P/137

C.2 ÁRIDOS PARA HORMIGONES

EMPRESA PETICIONARIA: **MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.**
 EMPRESA FABRICANTE: **MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.**
 LUGAR DEL CENTRO DE PRODUCCIÓN: **CERRO LA VIÑA – VALDEGANGA (CUENCA)**
 TAMAÑO: **AF – R – 0/4 – S – L**
 NORMA DE APLICACIÓN: **UNE-EN 12620:2002+A1:2008**
 ENSAYO DE TIPO INICIALES EFECTUADOS: ☒ SI ☐ NO

REQUISITO	VALOR DECLARADO	UNIDADES	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	0 / 4	d / D		
Granulometría			G_F 85	EN 933-1
Forma de las partículas		-	-	EN 933-3
Densidad	2,52	(Mg/m ³)		EN 1097-6
Contenido en conchas de árido grueso		-	-	EN 933-7
Finos		1,1	f₃	EN 933-1
Equiv. arena/Azul de metileno	78	-		
Resistencia a la fragmentación del árido grueso		-	-	EN 1097-2
Resistencia al desgaste del árido grueso		-	-	EN 1097-1
Resistencia al pulimento		-	-	EN 1097-8
Resistencia a la abrasión		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Cloruros	0,0028	(% C)		EN 1744-1
Sulfatos solubles en ácido		0,050	AS_{0,2}	EN 1744-1
Azufre total	0,070	(% S)		EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento del hormigón	-	Tiempo de fraguado en minutos y resistencia a la compresión S%		EN 1744-1
Contenido de carbonato en el árido fino para superficies pavimentadas de hormigón	-	(CO ₂)		EN 196-21
Retracción por secado	-	(% WS)		EN 1097-3
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de escorias de horno alto enfriadas por aire	-	(aspecto)		EN 1744-1
Absorción de agua	0,18	(% WA)		EN 1097-6
Resistencia al hielo y al deshielo		-	-	EN 1367-1/2
Reactividad álcali / sílice	-	-		Anexo G (UNE 12620)

AENORAsociación Española de
Normalización y Certificación**C.2 ÁRIDOS PARA HORMIGONES**

EMPRESA PETICIONARIA: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.

EMPRESA FABRICANTE: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.

LUGAR DEL CENTRO DE PRODUCCIÓN: CERRO LA VIÑA – VALDEGANGA (CUENCA)

TAMAÑO: AG – M – 4/12 – C – L

NORMA DE APLICACIÓN: UNE-EN 12620:2002+A1:2008

ENSAYO DE TIPO INICIALES EFECTUADOS: ☒ SI ☐ NO

REQUISITO	VALOR DECLARADO	UNIDADES	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	4 / 12	d / D		
Granulometría			Gc 90 /15	EN 933-1
Forma de las partículas		10	Fl 15	EN 933-3
Densidad	2,57	(Mg/m ³)		EN 1097-6
Contenido en conchas de árido grueso		-	-	EN 933-7
Finos		0,24	f_{1,5}	EN 933-1
Equiv. arena/Azul de metileno	-	-		
Resistencia a la fragmentación del árido grueso		24	LA₃₀	EN 1097-2
Resistencia al desgaste del árido grueso		-	-	EN 1097-1
Resistencia al pulimento		-	-	EN 1097-8
Resistencia a la abrasión		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Cloruros	0,0023	(% C)		EN 1744-1
Sulfatos solubles en ácido		0,08	AS_{0,2}	EN 1744-1
Azufre total	0,09	(% S)		EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento del hormigón	-	Tiempo de fraguado en minutos y resistencia a la compresión 5%		EN 1744-1
Contenido de carbonato en el árido fino para superficies pavimentadas de hormigón	-	(CO ₂)		EN 196-21
Retracción por secado	-	(%WS)		EN 1097-3
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de escorias de horno alto enfriadas por aire	-	(aspecto)		EN 1744-1
Absorción de agua	1,18	(%WA)		EN 1097-6
Resistencia al hielo y al deshielo		15	SM₁₈	EN 1367-1/2
Reactividad álcali / sílice	NO REACTIVO			Anexo G (UNE 12620)

AENORAsociación Española de
Normalización y Certificación**C.2 ÁRIDOS PARA HORMIGONES**EMPRESA PETICIONARIA: **MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.**EMPRESA FABRICANTE: **MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.**LUGAR DEL CENTRO DE PRODUCCIÓN: **CERRO LA VIÑA – VALDEGANGA (CUENCA)**TAMAÑO: **AG – M – 10/22 – C – L**NORMA DE APLICACIÓN: **UNE-EN 12620:2002+A1:2008**ENSAYO DE TIPO INICIALES EFECTUADOS: ☒ SI ☐ NO

REQUISITO	VALOR DECLARADO	UNIDADES	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	10 / 22	d / D		
Granulometría			Gc 90 /15	EN 933-1
Forma de las partículas		7	FI 15	EN 933-3
Densidad	2,57	(Mg/m ³)		EN 1097-6
Contenido en conchas de árido grueso		-	-	EN 933-7
Finos		0,16	f_{1,5}	EN 933-1
Equiv. arena/Azul de metileno	-	-		
Resistencia a la fragmentación del árido grueso		24	LA₃₀	EN 1097-2
Resistencia al desgaste del árido grueso		-	-	EN 1097-1
Resistencia al pulimento		-	-	EN 1097-8
Resistencia a la abrasión		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados		-	-	(Anexo A) EN 1097-8
Cloruros	0,0023	(% C)		EN 1744-1
Sulfatos solubles en ácido		0,08	AS_{0,2}	EN 1744-1
Azufre total	0,09	(% S)		EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento del hormigón	-	Tiempo de fraguado en minutos y resistencia a la compresión S%		EN 1744-1
Contenido de carbonato en el árido fino para superficies pavimentadas de hormigón	-	(CO ₂)		EN 196-21
Retracción por secado	-	(%WS)		EN 1097-3
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de escorias de horno alto enfriadas por aire	-	(aspecto)		EN 1744-1
Absorción de agua	1,18	(%WA)		EN 1097-6
Resistencia al hielo y al deshielo		15	SM₁₈	EN 1367-1/2
Reactividad álcali / sílice	NO REACTIVO			Anexo G (UNE 12620)

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PEPE, S.L.

Avda. Cruz Roja, s/n
16004 CUENCA
Tel. 969 22 42 70

Declaramos, de acuerdo con el certificado de control de producción en fábrica de los áridos nº 0099/CPR/A60/0673 que se adjunta, que los áridos que se referencian en el cuadro siguiente cumplen con las disposiciones de la norma UNE EN 12620:2002/A1:2008

Explotación					Paraje Cerro La Viña - Parcela 1006 del Polig. 504 - CN 420 P.K. 409 Valdeganga (Cuenca)		
Referencia (o código)	Grupo	Forma de presentación	Granulometría	Naturaleza	Lavado	Aplicación	Condiciones particulares: aplicables: al uso
						UNE EN 12620 Hormigones	
001	AF	R	0/4	S	L	X	Excluido el uso en capas de rodadura
002	AG	T	4/12	M		X	
003	AG	T	10/22			X	

Las características declaradas en el marcado de los productos que se indican más arriba se encuentran recogidas en las fichas de información del mercado que se adjuntan a la presente declaración

Nombre: JUAN CARLOS HERNÁNDEZ MATAS
Cargo: ADMINISTRADOR
Fecha: 23/01/2015
Firma:

ANEXO 4

Tablas de resultados - HORMIGONES

**Tabla ANEXO 4.1 Determinación de la granulometría de las partículas.
Método del tamizado (UNE-EN 933-1:2012)**

MASA MUESTRA SECA TOTAL (M_1):	6,50 kg
MASA DE MUESTRA TRAS LAVADO (M_2):	5,423 kg
MASA MUESTRA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO:	0,074 kg

Código de tamices	TAMICES UNE (mm)	Material retenido (kg)	Material pasa (kg)	% Retiene	% Pasa acumulado	% Retiene acumulado
LMAT-38-4	63	0	6,423	0	100	0
LMAT-38-7	40	0	6,423	0	100	0
LMAT-38-9	31.5	0	6,423	0	100	0
LMAT-38-13	20	0,061	6,362	0,95	99,05	0,95
LMAT-38-15	16	0,108	6,254	1,68	97,37	2,63
LMAT-38-17	14	0,134	6,12	2,09	95,28	4,72
LMAT-38-18	12.5	0,22	5,9	3,43	91,85	8,15
LMAT-38-20	10	0,496	5,404	7,73	84,13	15,87
LMAT-38-22	8	0,528	4,876	8,22	75,90	24,10
LMAT-38-24	6.3	0,577	4,299	8,99	66,92	33,08
LMAT-38-26	5	0,556	3,743	8,66	58,26	41,74
LMAT-38-28	4	0,455	3,288	7,09	51,17	48,83
LMAT-38-32	2	0,803	2,485	12,51	38,66	61,34
LMAT-38-36	1	0,704	1,781	10,97	27,69	72,31
LMAT-38-43	0.5	0,725	1,056	11,29	16,40	83,60
LMAT-38-46	0.25	0,55	0,506	8,57	7,83	92,17
LMAT-38-52	0.125	0,283	0,223	4,41	3,43	96,57
LMAT-38-58	0.063	0,22	0,003	3,43	0	100

Material retenido en el fondo de la bandeja	0,003 g
Porcentaje de finos que pasa por el tamiz 0.063mm	1,23 %

Tabla ANEXO 4.2 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena
(UNE-EN 933-8:2012)

Masa seca submuestra (M_1)	200 g
Masa secada en estufa submuestra (M_3)	196,32 g
Contenido en agua (w) $w = (M_1 - M_3)/(M_3)$	1,87 %
Masa secada de partículas retenidas en tamiz 0,063mm (M_2)	188,89 g
Contenido en finos (f) $f = 100 - (M_2 (100 + w))/M_1$	3,79 %

	1º muestra de ensayo	2º muestra de ensayo
Masa de la muestra de ensayo MT	122,24 g	122,24 g
Temperatura aprox. °C	22,8°C	22,8 °C
Lectura de arcilla h_1	104 mm	103 mm
Lectura de arena h_2	87 mm	89 mm
SE	83,36	86,40

Hora de agitación	10	15
Hora de lectura	32	37

SE	85
-----------	-----------

Tabla ANEXO 4.3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)

Tamaño máximo del árido	4 mm
Volumen mínimo del recipiente	1 l

Masa del recipiente vacío (m_1)		0,307 kg
	m_2 (1)	1,942 kg
Masa del recipiente y submuestra	m_2 (2)	1,957 kg
	m_2 (3)	1,943 kg
	ρ_b (1)	1,635 Mg/m ³
Densidad aparente	ρ_b (2)	1,650 Mg/m ³
	ρ_b (3)	1,636 Mg/m ³
ρ_p		2,539 Mg/m ³

Densidad aparente ρ_b (Mg/m ³)	1,640 Mg/m ³
---	-------------------------

Porcentaje de huecos	35,43 %
$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$	

ρ_p es la densidad de partículas tras secado previo o secado en estufa, expresada en megagramos por metro cúbico.

Tabla ANEXO 4.4 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009)

Tamaño máximo del árido	4 mm
Tipo de árido	normal

Masa de la muestra de ensayo (kg) (M_1)	0,800 kg
Masa 1 pesada (M_3)	0,790 kg
Masa 2 pesada (M_3)	0,790 kg
Masa 3 pesada (M_3)	kg
Masa 4 pesada (M_3)	kg
Masa 5 pesada (M_3)	kg
Masa 6 pesada (M_3)	kg
Diferencia entre pesadas consecutivas	0 Kg
% diferencia entre pesadas consecutivas < 0,1%	0 %

Contenido en agua	
$\omega = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$	1,266%

Tabla ANEXO 4.5 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)

Método del picnómetro

Tamaño máximo del árido	4 mm
Tipo de árido	normal

Masa de la muestra (M_4)		350 g
Masa del picnómetro lleno de agua (M_3)		1560,98 g
		Tª baño de agua (°C)
	M_2 (5 min.)	1776,32 g
	M_2 (1h)	1776,57 g
	M_2 (2h)	1776,60 g
Masa del picnómetro más muestra de árido saturado y agua	M_2 (3h)	1776,64 g
	M_2 (4h)	1776,70 g
	M_2 (24h)	1777,46 g
Masa de la muestra con secado superficial (M_1)		354,74 g
Densidad aparente de las partículas ρ_a		2,62 Mg/m ³
Densidad de partículas secadas en estufa ρ_{rd}		2,53 Mg/m ³
Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente ρ_{ssd}		2,57 Mg/m ³
Absorción de agua a 24 h (WA_{24})		1,35 %
	WA (5 min.)	1,02 %
	WA (1h)	1,09 %
Absorción de agua para diferentes periodos de tiempo	WA (2h)	1,10 %
	WA (3h)	1,12 %
	WA (4h)	1,14 %

Método del picnómetro

Tamaño máximo del árido	4 mm
Tipo de árido	normal

Masa de la muestra (M_4)		350 g	
Masa del picnómetro lleno de agua (M_3)		1557,16 g	Tª baño de agua (°C)
	M_2 (5 min.)	1773,61 g	23,0
	M_2 (1h)	1774,13 g	22,7
Masa del picnómetro más muestra de árido saturado y agua	M_2 (2h)	1774,37 g	22,7
	M_2 (3h)	1774,78 g	22,5
	M_2 (4h)	1774,79 g	22,4
	M_2 (24h)	1775,32 g	21,5
Masa de la muestra con secado superficial (M_1)		355,25 g	
Densidad aparente de las partículas ρ_a		2,65 Mg/m³	
Densidad de partículas secadas en estufa ρ_{rd}		2,55 Mg/m³	
Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente ρ_{ssd}		2,59 Mg/m³	
Absorción de agua a 24 h (WA_{24})		1,50 %	
	WA (5 min.)	1,02 %	
	WA (1h)	1,16 %	
Absorción de agua para diferentes periodos de tiempo	WA (2h)	1,23 %	
	WA (3h)	1,34 %	
	WA (4h)	1,40 %	

Tabla ANEXO 4.6 Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas (UNE 83115:1989 EX)

	Pesada 1 (M_1)	Pesada 2 (M_2)
Muestra seca inicial (M)	500 g	500 g
	Pesada 1 (m_1)	Pesada 2 (m_2)
Muestra después ensayo > 0,05mm	413,20 g	413,20 g
Pérdida ($M-m$)		86,80 g

	Ø 30 mm (9 bolas)	983 g
Carga abrasiva	Ø 18 mm (21 bolas)	494 g
	Ø 10 mm	1023 g
Total carga abrasiva		2500 g

COEFICIENTE DE FRIABILIDAD DE LAS ARENAS	17
--	----

Tabla ANEXO 4.7 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)

MASA DE LA PORCIÓN DE ENSAYO (M_0):	3000 g
MASA RETENIDA POR EL TAMIZ DE 10 mm:	0 g
MASA QUE PASA POR EL TAMIZ DE 4 mm:	0 g

Código de tamices UNE	Tamices UNE (mm)	Masa (R_i) retenida (g)	Código de tamices de barras	Tamices de barras (mm)	Masa que pasa (M_i) (g)	$IL_i = (M_i/R_i) \times 100$
LMAT-38-2	80	0	-	50	-	-
LMAT -38-4	63	0	-	40	-	-
LMAT -38-5	50	0	-	31.5	-	-
LMAT -38-7	40	0	-	25	-	-
LMAT -38-9	31,5	0	-	20	-	-
LMAT-38-11	25	0	-	16	-	-
LMAT-38-13	20	0	-	12.5	-	-
LMAT-38-15	16	12	-	10	4	33,33
LMAT-38-18	12,5	48	-	8	6	12,53
LMAT-38-20	10	1036	-	6.3	192	18,53
LMAT-38-22	8	1779	-	5	177	9,94
LMAT-38-24	6,3	125	-	4	12	9,6
LMAT-38-26	5	0	-	3.15	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	2.5	-	-
$M_1 =$		3000	$M_2 =$		394	

$$IL = (M_2/M_1) \times 100 \quad 13.13 \%$$

$$100 \times \frac{M_0 - [\Sigma R_i + \Sigma(\text{masas rechazadas}) + \Sigma(\text{masas de las fracciones no ensayadas})]}{M_0} = 0 \leq 1\%$$

Tabla ANEXO 4.8 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4:2008)

MASA DE LA PORCIÓN DE ENSAYO (M_0):	1000 g
---	--------

Código de tamices	Tamices UNE (mm)	Masa M_1 (g)	Masa M_2 (g)	Coeficiente de forma
LMAT-38-4	63	0	-	-
LMAT-38-6	45	0	-	-
LMAT-38-9	31,5	0	-	-
LMAT-38-13	20	0	-	-
LMAT-38-15	16	0	-	-
LMAT-38-18	12,5	4	2	50 %
LMAT-38-19	11,2	89	21	23,59 %
LMAT-38-20	10	211	25	11,85 %
LMAT-38-22	8	693	44	6,35 %
LMAT-38	5,6	0	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	-

Nota: M_2 es la masa de las partículas no cúbicas

Tabla ANEXO 4.9 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval) (UNE-EN 1097-1:2011)

Fracciones granulométricas empleadas en el ensayo	10 mm	11,2 mm	14 mm
	800 g	1200 g	0 g
Masa de bolas de acero (10 mm) a cada cilindro	5000 g		
Nº de revoluciones	12000 r/min		
Agua añadida a cada cilindro	2,5 l		
	Cilindro 1	Cilindro 2	
Masa muestra inicial (M)	500 g	500 g	
	Cilindro 1	Cilindro 2	
Muestra después de ensayo $>1,66$ mm (m)	411,39 g	417,55 g	
Pérdida ($M-m$)	88.61 g	82.45 g	
Coeficiente Micro-Deval (M_{DE})	17,752	16,490	

Coeficiente Micro-Deval (M_{DE})	17
--	-----------

Tabla ANEXO 4.10 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación (UNE-EN 1097-2:2010)

Fracciones granulométricas empleadas en el ensayo	10 mm	11,2 mm	14 mm
	6000 g	9000 g	0 g
Nº de bolas (carga abrasiva)	11		
Nº de vueltas	500		
Masa total de la carga abrasiva (g)	4711 g		
	Pesada 1 (M_1)	Pesada 1 (M_2)	
Masa muestra inicial (M)	5000 g	5000 g	
	Pesada 1 (m_1)	Pesada 1 (m_2)	
Muestra después de ensayo >1,66 mm (m)	3749 g	3749 g	
Pérdida ($M-m$)	1251 g		

Coeficiente de Los Ángeles (LA)	25
--	-----------

Tabla ANEXO 4.11 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)

Tamaño máximo del árido		16 mm
Volumen mínimo del recipiente		5,3 l
<hr/>		
Masa del recipiente vacío (m_1)		8,864 kg
	$m_2(1)$	15,998 kg
Masa del recipiente y submuestra	$m_2(2)$	16,001 kg
	$m_2(3)$	16,007 kg
	$\rho_b(1)$	1,3460 Mg/m ³
Densidad aparente	$\rho_b(2)$	1,3466 Mg/m ³
	$\rho_b(3)$	1,3477 Mg/m ³
<hr/>		
<hr/>		
$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$		1,3468 Mg/m ³
Densidad aparente		
<hr/>		
<hr/>		
$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$		50,97 %
Porcentaje de huecos		
<hr/>		

Tabla ANEXO 4.12 Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009)

Tamaño máximo del árido	16 mm
Tipo de árido	normal

Masa de la muestra de ensayo (kg) (M_1)	3,200 kg
Masa 1 pesada (M_3)	3,188 kg
Masa 2 pesada (M_3)	3,186 kg
Masa 3 pesada (M_3)	kg
Masa 4 pesada (M_3)	kg
Masa 5 pesada (M_3)	kg
Masa 6 pesada (M_3)	kg
Diferencia entre pesadas consecutivas	0,002 kg
Diferencia entre pesadas consecutivas < 0.1%	0,0625 %

$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$	0,439 %
Contenido en agua	

Tabla ANEXO 4.13 a. Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)

Fecha ensayo: 22-01-2014

Método de la balanza hidrostática

Fracción granulométrica Gruesa

Tipo de árido Normal

Peso de la muestra en inmersión + cestillo (M_2)	683,26 g	T° del agua de inmersión °C	13,7
Peso del cestillo en inmersión (M_3)	56,44 g	T° del agua de inmersión °C	13,7
Peso de la muestra con secado superficial (M_1)	1005,30 g		
Peso de la muestra seca en estufa (M_4)	1000 g		
Densidad aparente de partículas $\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$	2,679 Mg/m ³		
Densidad partículas tras secado en estufa $\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	2,642 Mg/m ³		
Densidad partículas saturadas con sup. Seca $\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	2,656 Mg/m ³		
Absorción de agua $WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4}$	0,53 %		

Tabla ANEXO 4.13 b. Áridos para hormigones. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6:2014)

Fracción granulométrica Gruesa		Tipo de árido Normal	
Peso de la muestra en inmersión + cestillo (M_2)	682,62	T° del agua de inmersión °C	13.7
Peso del cestillo en inmersión (M_3)	56,44 g	T° del agua de inmersión °C	13.7
Peso de la muestra con secado superficial (M_1)	1004.62 g		
Peso de la muestra seca en estufa (M_4)	1000 g		
Densidad aparente de partículas			
$\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$		2,675 Mg/m ³	
Densidad partículas tras secado en estufa			
$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$		2,642 Mg/m ³	
Densidad partículas saturadas con sup. Seca			
$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$		2,654 Mg/m ³	
Absorción de agua			
$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4}$		0,46 %	

Tabla ANEXO 4.14 a. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. (UNE-EN 933-1:2012)

Fecha ensayo: 14-01/2014

Método del tamizado

MASA MUESTRA SECA TOTAL (M₁): 3,00 kg.

MASA DE MUESTRA TRAS LAVADO (M₂): 2,985 kg.

MASA MUESTRA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO: 0,015 kg.

Código de tamices	TAMICES UNE (mm)	Material retenido (kg)	Material pasa (kg)	% Retiene	% Pasa acumulado	% Retiene acumulado
LMAT-38-4	63	0	2,985	0	100	0
LMAT-38-7	40	0	2,985	0	100	0
LMAT-38-9	31,5	0	2,985	0	100	0
LMAT-38-13	20	0,17	2,815	5,66	94,34	5,66
LMAT-38-15	16	0,976	1,839	32,53	61,81	38,19
LMAT-38-17	14	0,825	1,014	27,5	34,31	65,69
LMAT-38-18	12,5	0,510	0,504	17	17,31	82,69
LMAT-38-20	10	0,35	0,154	11,66	5,65	94,35
LMAT-38-22	8	0,151	0,003	5,03	0,62	100
LMAT-38-24	6,3	0	0	0	0	100
LMAT-38-26	5	0	0	0	0	100
LMAT-38-28	4	0	0	0	0	100
LMAT-38-32	2	0	0	0	0	100
LMAT-38-36	1	0	0	0	0	100
LMAT-38-43	0,5	0	0	0	0	100
LMAT-38-46	0,25	0	0	0	0	100
LMAT-38-52	0,125	0	0	0	0	100
LMAT-38-58	0,063	0	0	0	0	100
Material retenido en el fondo de la bandeja						0.003 g
Porcentaje de finos que pasa por el tamiz 0.063mm						0.62 %
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 = 0 \leq 1\%$						

Tabla ANEXO 4.14 b. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)

Fecha ensayo: 14-01-2014

MASA DE LA PORCION DE ENSAYO (M_0): 3000 g.

MASA RETENIDA POR EL TAMIZ DE 10 mm: 0 g.

MASA QUE PASA POR EL TAMIZ DE 4 mm: 0 g.

Código de tamices UNE	Tamices UNE (mm)	Masa (Ri) retenida (g)	Código de tamices de barras	Tamices de barras (mm)	Masa pasa (mi) (g)	ILi=(mi/Ri)x100
LMAT-38-2	80	0	-	50	-	-
LMAT -38-4	63	0	-	40	-	-
LMAT -38-5	50	0	-	31,5	-	-
LMAT -38-7	40	0	-	25	-	-
LMAT -38-9	31,5	0	-	20	-	-
LMAT-38-11	25	0	-	16	-	-
LMAT-38-13	20	211	-	12,5	192	90,99
LMAT-38-15	16	922	-	10	837	90,78
LMAT-38-18	12,5	1274	-	8	1069	83,91
LMAT-38-20	10	391	-	6,3	317	81,07
LMAT-38-22	8	202	-	5	144	71,28
LMAT-38-24	6,3	0	-	4	-	-
LMAT-38-26	5	0	-	3,15	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	2.5	-	-
M1=		3000	M2=		2559	
IL= (M1/M2) x 100= 85,3 %						
100 X $\frac{M_0 - [\Sigma Ri + \Sigma(masas rechazadas) + \Sigma(masas de las fracciones no ensayadas)]}{M_0}$					0	≤ 1%

Tabla ANEXO 4.14 c. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)

Fecha ensayo: 14-01-2014

Observaciones: Realizado para la sustitución del 10%

MASA DE LA PORCION DE ENSAYO (M_0): 3000 g.

MASA RETENIDA POR EL TAMIZ DE 10 mm: 0 g.

MASA QUE PASA POR EL TAMIZ DE 4 mm: 0 g.

Código de tamices UNE	Tamices UNE (mm)	Masa (R_i) retenida (g)	Código de tamices de barras	Tamices de barras (mm)	Masa pasa (m_i) (g)	$IL_i = (m_i/R_i) \times 100$
LMAT-38-2	80	0	-	50	-	-
LMAT -38-4	63	0	-	40	-	-
LMAT -38-5	50	0	-	31,5	-	-
LMAT -38-7	40	0	-	25	-	-
LMAT -38-9	31,5	0	-	20	-	-
LMAT-38-11	25	0	-	16	-	-
LMAT-38-13	20	21	-	12,5	19	90,47
LMAT-38-15	16	103	-	10	87	84,46
LMAT-38-18	12,5	171	-	8	112	65,49
LMAT-38-20	10	972	-	6,3	204	20,98
LMAT-38-22	8	1621	-	5	174	10,73
LMAT-38-24	6,3	112	-	4	11	9,82
LMAT-38-26	5	0	-	3.15	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	2,5	-	-
$M_1 =$		3000	$M_2 =$		607	

$$IL = (M_1/M_2) \times 100 = 20,23 \%$$

$$100 \times \frac{M_0 - [\sum R_i + \sum (\text{masas rechazadas}) + \sum (\text{masas de las fracciones no ensayadas})]}{M_0} = 0 \leq 1\%$$

Tabla ANEXO 4.14 d. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)

Fecha ensayo: 15-01-2014

Observaciones: Realizado para la sustitución del 20%

MASA DE LA PORCION DE ENSAYO (M_0): 3000 g.

MASA RETENIDA POR EL TAMIZ DE 10 mm: 0 g.

MASA QUE PASA POR EL TAMIZ DE 4 mm: 0 g.

Código de tamices UNE	Tamices UNE (mm)	Masa (Ri) retenida (g)	Código de tamices de barras	Tamices de barras (mm)	Masa pasa (mi) (g)	IL=(mi/Ri)x100
LMAT-38-2	80	0	-	50	-	-
LMAT -38-4	63	0	-	40	-	-
LMAT -38-5	50	0	-	31,5	-	-
LMAT -38-7	40	0	-	25	-	-
LMAT -38-9	31,5	0	-	20	-	-
LMAT-38-11	25	0	-	16	-	-
LMAT-38-13	20	42	-	12,5	38	90,47
LMAT-38-15	16	194	-	10	170	87,63
LMAT-38-18	12,5	293	-	8	219	74,74
LMAT-38-20	10	907	-	6.3	217	23,92
LMAT-38-22	8	1464	-	5	170	11,61
LMAT-38-24	6,3	100	-	4	10	10,00
LMAT-38-26	5	0	-	3,15	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	2,5	-	-
M ₁ =		3000	M ₂ =		824	
IL= (M ₁ /M ₂) x 100= 27,46 %						
100 X $\frac{M_0 - [\Sigma Ri + \Sigma (masas rechazadas) + \Sigma (masas de las fracciones no ensayadas)]}{M_0}$					0	≤ 1%

Tabla ANEXO 4.14 e. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas (UNE-EN 933-3:2012)

Fecha ensayo: 15-01-2014

Observaciones: Realizado para la sustitución del 30%

MASA DE LA PORCION DE ENSAYO (M_0): 3000 g.

MASA RETENIDA POR EL TAMIZ DE 10 mm: 0 g.

MASA QUE PASA POR EL TAMIZ DE 4 mm: 0 g.

Código de tamices UNE	Tamices UNE (mm)	Masa (Ri) retenida (g)	Código de tamices de barras	Tamices de barras (mm)	Masa pasa (mi) (g)	IL=(mi/Ri)x100
LMAT-38-2	80	0	-	50	-	-
LMAT -38-4	63	0	-	40	-	-
LMAT -38-5	50	0	-	31,5	-	-
LMAT -38-7	40	0	-	25	-	-
LMAT -38-9	31,5	0	-	20	-	-
LMAT-38-11	25	0	-	16	-	-
LMAT-38-13	20	63	-	12,5	57	60,47
LMAT-38-15	16	285	-	10	254	89,12
LMAT-38-18	12,5	416	-	8	325	78,12
LMAT-38-20	10	843	-	6,3	229	27,16
LMAT-38-22	8	1306	-	5	167	12,78
LMAT-38-24	6,3	87	-	4	9	10,34
LMAT-38-26	5	0	-	3,15	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	2,5	-	-
M ₁ =		3000	M ₂ =		1041	
IL= (M ₁ /M ₂) x 100= 34.7 %						
100 X $\frac{M_0 - [\Sigma Ri + \Sigma (masas rechazadas) + \Sigma (masas de las fracciones no ensayadas)]}{M_0}$					0	≤ 1%

Tabla ANEXO 4.15 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4:2008)

Fecha ensayo: 15-01-2014

MASA DE LA PORCION DE ENSAYO (M_0):

250 g.

Código de tamices	Tamice UNE (mm)	Masa M_1 (g)	Masa M_2 (g)	Coeficiente de forma
LMAT-38-4	63	0	-	-
LMAT-38-6	45	0	-	-
LMAT-38-9	31,5	0	-	-
LMAT-38-13	22,4	0	-	-
LMAT-38-15	16	23,4	21,4	91,45
LMAT-38-18	12,5	112,9	96,9	85,82
LMAT-38-19	11,2	55,5	44,8	80,72
LMAT-38-20	10	35,5	24,7	69,57
LMAT-38-22	8	22,7	15,7	69,16
LMAT-38-24	5,6	0	-	-
LMAT-38-28	4	0	-	-

Nota: M_2 es la masa de las partículas no cúbicas

Tabla ANEXO 4.16 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación (UNE-EN 1097-2:2010)

Fecha ensayo: 17-01-2014

Fracciones granulométricas empleadas en el ensayo	mm	mm	mm
	6000 g	9000 g	g
Nº de bolas (carga abrasiva)	11		
Nº de vueltas	500		
Masa total de la carga abrasiva (g)	4711		
Masa muestra inicial (M)	Pesada 1 (M ₁)	Pesada 1 (M ₂)	
	5000 g	5000 g	
Muestra después de ensayo >1,66mm (m)	Pesada 1 (m ₁)	Pesada 1 (m ₂)	
	4565,8 g	4565,8 g	
Pérdida (M-m)	434,2 g		
Coeficiente de los Ángeles (L.A.)	9		

Tabla ANEXO 4.17 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad (UNE-EN 1097-3:1999)

Fecha ensayo: 17-01-2014

Tamaño máximo del árido 16 mm		Volumen mínimo del recipiente 5,3 l
Masa del recipiente vacío (m_1)		8,870 kg
Masa del recipiente y submuestra	$m_2(1)$	10,461 kg
	$m_2(2)$	10,441 kg
	$m_2(3)$	10,433 kg
Densidad aparente	$\rho_b(1)$	0,300 Mg/m ³
	$\rho_b(2)$	0,296 Mg/m ³
	$\rho_b(3)$	0,295 Mg/m ³
Densidad aparente ρ_b (Mg/m ³)		0,297 Mg/m ³
Porcentaje de huecos $V = \frac{\rho_P - \rho_b}{\rho_P} \times 100$ (%)		61,43 %

Nota: ρ_P es la densidad de partículas tras secado previo según establece la Norma UNE-EN 1097-6: 2014

Observaciones: El LACAE no dispone de recipiente tal como indica la Norma para la realización de este ensayo, por lo que se utilizó una probeta de elaboración de hormigón, de dimensiones Ø150 x 300 mm. Es el sistema de mayor coincidencia con lo estipulado en la Norma.

Tabla ANEXO 4.18 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa (UNE-EN 1097-5:2009)

Fecha ensayo: 17-01-2015

Tamaño máximo del árido 16 mm

Tipo de árido Ligero

Masa de la muestra de ensayo (kg) (m_1)	0,7440 kg
Masa 1 pesada (m_3)	0,6933 kg
Masa 2 pesada (m_3)	0,6865 kg
Masa 3 pesada (m_3)	0,6856 kg
Masa 4 pesada (m_3)	0,6851 kg
Masa 5 pesada (m_3)	kg
Masa 6 pesada (m_3)	kg
Diferencia entre pesadas consecutivas	0,005 Kg
% diferencia entre pesadas consecutivas <0.1%	0,07 %
Contenido en agua $w = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100$ (%)	8,597 %

Tabla ANEXO 4.19 a. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)

Fecha ensayo: 17/01/2015

Método del picnómetro

Fracción granulométrica 8 mm

Tipo de árido ligero

Masa de la muestra (M_4)		190 g	
Masa del picnómetro lleno de agua (M_3)		1552,37 g	Tº baño de agua °C
Masa del picnómetro más muestra de árido saturado y agua	$M_2(5\text{min})$	1551,26 g	22,8 °C
	$M_2(1\text{h})$	1571,44 g	23,0 °C
	$M_2(2\text{h})$	1583,96 g	22,8 °C
	$M_2(3\text{h})$	1590,89 g	22,7 °C
	$M_2(4\text{h})$	1594,96 g	22,4 °C
	$M_2(24\text{h})$	1603,91 g	21,5 °C
Masa de la muestra con secado superficial (M_1)		293,74 g	
Densidad aparente de las partículas ρ_a		1,3722 Mg/m ³	
Densidad de partículas secadas en estufa ρ_{sd}		0,7844 Mg/m ³	
Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente ρ_{ssd}		1,2138 Mg/m ³	
Absorción de agua a 24 (WA_{24})		54,60 %	
Absorción de agua para diferentes tiempos	$WA(5\text{min})$	26,89 %	
	$WA(1\text{h})$	37,51 %	
	$WA(2\text{h})$	44,1 %	
	$WA(3\text{h})$	47,75 %	
	$WA(4\text{h})$	49,89 %	

Tabla ANEXO 4.19 b. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)

Fecha ensayo: 20-01-2014

Método del picnómetro

Fracción granulométrica 8 mm

Tipo de árido ligero

Masa de la muestra (M_4)		190 g	
Masa del picnómetro lleno de agua (M_3)		1557,05 g	Tº baño de agua °C
Masa del picnómetro más muestra de árido saturado y agua	$M_2(5\text{min})$	1557,98 g	22,8 °C
	$M_2(1\text{h})$	1575,77g	23,0 °C
	$M_2(2\text{h})$	1586,95 g	22,8 °C
	$M_2(3\text{h})$	1594,24 g	22,7 °C
	$M_2(4\text{h})$	1598,81 g	22,4 °C
	$M_2(24\text{h})$	1608,34 g	21,5 °C
Masa de la muestra con secado superficial (M_1)		294,84 g	
Densidad aparente de las partículas ρ_a		1,3697 Mg/m ³	
Densidad de partículas secadas en estufa ρ_{sd}		0,7836 Mg/m ³	
Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente ρ_{ssd}		1,2115 Mg/m ³	
Absorción de agua a 24 (WA_{24})		55,18 %	
Absorción de agua para diferentes tiempos	$WA(5\text{min})$	26,67 %	
	$WA(1\text{h})$	38,04 %	
	$WA(2\text{h})$	43,92 %	
	$WA(3\text{h})$	47,75 %	
	$WA(4\text{h})$	50,16 %	

Tabla ANEXO 4.19 c. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6: 2014)

Fecha ensayo: 17-01-2014

Método de la balanza hidrostática

Fracción granulométrica Gruesa

Tipo de árido Ligerio

Peso de la muestra en inmersión + cestillo (M_2)	147,46 g	T° del agua de inmersión °C	13,7 °C
Peso del cestillo en inmersión (M_3)	56,20 g	T° del agua de inmersión °C	13,7 °C
Peso de la muestra con secado superficial (M_1)	600,70 g		
Peso de la muestra seca en estufa (M_4)	400 g		
Densidad aparente de partículas $\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$	1,295 Mg/m ³		
Densidad partículas tras secado en estufa $\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	0,785 Mg/m ³		
Densidad partículas saturadas con sup. seca $\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$	1,179 Mg/m ³		
Absorción de agua $WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4}$	50,17 %		

Observaciones: El método de referencia es el anterior (picnómetro). Se realizó por este método para comprobar si existían diferencias y si las mismas eran apreciables.

Tabla ANEXO 4.20 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total (UNE-EN 1936:2007)

Fecha ensayo: 20-01-2014

	Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra seca (md)	400 g	400 g
Masa de la muestra sumergida en agua (mh)	90,8 g	91,3g
Masa de la muestra saturada (ms)	600,70 g	595,58 g
Volumen de poros abiertos (V_o)	200,7 mm	195,58 mm
Volumen aparente (V_b)	509,9 mm	504,28 mm
Densidad aparente (ρ_b)	785 Kg/m ³	793 Kg/m ³
Porosidad abierta (ρ_o)	39,36 %	38,78 %
Masa muestra triturada (me)	10 g	10 g
Masa del picnómetro + muestra + agua (m_1)	102,42 g	103,75 g
Masa del picnómetro + muestra + agua (m_2)	98,44 g	100,17 g
Densidad real (ρ_r)	1661,13 Kg/m ³	1557,63 Kg/m ³
Porosidad total (ρ)	47,85 %	50,90 %

Observaciones: Este ensayo está realizado a partir de una norma para pétreos, por lo que los resultados obtenidos para un árido ligero como sería en este caso la cáscara de almendra no estarían sujetos a un sistema de calidad que garantizara que los resultados son concluyentes.

Tabla ANEXO 4.21 a. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar
 ☐ Entre ¼ y ¾
 ☒ Elegida de otra forma
 ☐ Otro

Temperatura ambiente	23,8 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ ab.
Temperatura del hormigón	19,4 °C	Lluvia	☐ Sí	☒ No	Viento ☐ Sí ☒ No

Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐	☒	Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
9,31,24	A 28 días	☒	☐	Cúbicas 15*15	☒ Picado
A.....		☐	☐	Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO
 ☒ Compresión
 ☐ Flexión
 ☐ Brasileño
 ☐ Hielo-deshielo
 ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 13:00
 Volumen amasada: 0,0185m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón patrón Aditivos: Ninguno Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R Relación agua/cemento: 0,56 Contenido de cemento: 5,57 kg	Denominación de probetas: H/P-C-9 H/P-C-31 H/P-C-24
---	--

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	37 mm	35 mm	36 mm	
				Simétrico ☒ Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO
 ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda
 ☐ Otro
 Fecha de recogida: 29-01-2014 Hora: 08:40

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN BALSA DE AGUA ☐
 Fecha de entrada: 29-01-2014 Hora: 08:45 Duración: 26 días

Tabla ANEXO 4.21 b. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,5 °C	Estado del tiempo: ☐ Soleado ☐ Nublado ☒ Lab.
Temperatura del hormigón	14,2 °C	Lluvia ☐ Si ☒ No Viento ☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes		A 7 días ☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
31,18,24		A 28 días ☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
		A..... ☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☒ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☐ Hielo-deshielo	☐ Absorción
-----------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	---	------------------------------------

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia

Fecha de elaboración: 03-02-2014

Planta: LACAE

Hora de elaboración: 11:50

Volumen amasada: 0,0185m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 10% sustitución

Aditivos: Ninguno

Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R

Relación agua/cemento: 0,56

Contenido de cemento: 5,57 kg

Denominación de probetas.

H/10-C-31

H/10-C-18

H/10-C-24

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	38 mm	36 mm	37 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda☐ Otro

Fecha de recogida: 04-02-2014

Hora: 12:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒CURADO EN Balsa de AGUA ☐

Fecha de entrada: 04-02-2014

Hora: 12:00

Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 c. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,6 °C	Estado del tiempo: ☐ Soleado ☐ Nublado ☒ Lab.
Temperatura del hormigón	12,2 °C	Lluvia ☐ Sí ☒ No Viento ☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes		A 7 días ☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
7,4,15		A 28 días ☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado
		A..... ☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☒ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☐ Hielo-deshielo	☐ Absorción
----------------	--	----------------------------------	------------------------------------	---	------------------------------------

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 03-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 14:00
 Volumen amasada: 0,0185m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 20% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/20-C-7
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/20-C-4
Relación agua/cemento: 0,56	H/20-C-15
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	41 mm	39 mm	40 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 04-02-2014 Hora: 14:30

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN Balsa de AGUA ☐
 Fecha de entrada: 04-02-2014 Hora: 14:30 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 d. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	19,2 °C	Estado del tiempo: ☐ Soleado ☐ Nublado ☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,5 °C	Lluvia ☐ Si ☒ No Viento ☐ Sí ☒ No

Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes		A 7 días ☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
13,22,29		A 28 días ☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado
		A..... ☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☒ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☐ Hielo-deshielo	☐ Absorción
-----------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	---	------------------------------------

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 03-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 18:00
 Volumen amasada: 0,0185m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 30% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/30-C-13
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/30-C-22
Relación agua/cemento: 0,56	H/30-C-29
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	34 mm	32 mm	33 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 04-02-2014 Hora: 18:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 04-02-2014 Hora: 18:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 e. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	21,4 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,8 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

Nº Probetas	1	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐		☐ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
15	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☐ Picado
	A.....	☐		☒ Prismáticas 15*15*60	☒ Vibrado

TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☒ Flexión ☐ Brasileño ☐ Hielo-deshielo ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 04-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:20
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón patrón	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-F-15
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	
Relación agua/cemento: 0,56	
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	42 mm	35 mm	38,5 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 05-02-2014 Hora 12:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 05-02-2014 Hora: 12:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 f. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar
 ☐ Entre ¼ y ¾
 ☒ Elegida de otra forma
 ☐ Otro

Temperatura ambiente	21,2 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	14,8 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	1	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☐ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
19	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☐ Picado
	A.....	☐		☒ Prismáticas 15*15*60	☒ Vibrado

TIPO DE ENSAYO
 ☐ Compresión
 ☒ Flexión
 ☐ Brasileño
 ☐ Hielo-deshielo
 ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 04-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 13:50
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 10% sustitución Aditivos: Ninguno Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R Relación agua/cemento: 0,56 Contenido de cemento: 5,57 kg	Denominación de probetas. H/10-F-19
--	--

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	31 mm	29 mm	30 mm	
				Simétrico ☒ Sesgado ☐

CONSERVACION EN LABORATORIO
 ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda
 ☐ Otro
 Fecha de recogida: 05-02-2014 Hora 14:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN Balsa de AGUA ☐
 Fecha de entrada: 05-02-2014 Hora: 14:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 g. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	22,3 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	16,6 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	1	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☐ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
22	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☐ Picado
	A.....	☐		☒ Prismáticas 15*15*60	☒ Vibrado

TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☒ Flexión ☐ Brasileño ☐ Hielo-deshielo ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia. Fecha de elaboración: 04-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 14:20
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 20% sustitución Aditivos: Ninguno Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R Relación agua/cemento: 0,56 Contenido de cemento: 5,57 kg	Denominación de probetas. H/20-F-22
--	--

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	32 mm	34 mm	33 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 05-02-2014 Hora 16:30

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 05-02-2014 Hora: 16:30 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 h. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	21,7 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	18,1 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	1	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☐ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
11	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☐ Picado
	A.....	☐		☒ Prismáticas 15*15*60	☒ Vibrado

TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☒ Flexión ☐ Brasileño ☐ Hielo-deshielo ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 04-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 14:50
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 30% sustitución Aditivos: Ninguno Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R Relación agua/cemento: 0,56 Contenido de cemento: 5,57 kg	Denominación de probetas. H/30-F-11
--	--

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	34 mm	30 mm	32 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 05-02-2014 Hora 17:30

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 05-02-2014 Hora: 17:30 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 i. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar
 ☐ Entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$
 ☒ Elegida de otra forma
 ☐ Otro

Temperatura ambiente	23,8 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	19,0 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
10,19,12	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☐ Compresión	☐ Flexión	☒ Brasileño	☐ Hielo-deshielo	☐ Absorción
-----------------------	-------------------------------------	----------------------------------	---	---	------------------------------------

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 13:40
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón patrón	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-B-10
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/P-B-19
Relación agua/cemento: 0,56	H/P-B-12
Contenido de cemento: 5.57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	40 mm	34 mm	37 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 29-01-2014 Hora: 08:45

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN Balsa de AGUA ☐
 Fecha de entrada: 29-01-2014 Hora: 08:45 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 j. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA					
☐ Elegida al azar		☐ Entre ¼ y ¾		☒ Elegida de otra forma	
☐ Otro					
Temperatura ambiente		18,0 °C		Estado del tiempo: ☐ Soleado ☐ Nublado ☒ Lab.	
Temperatura del hormigón		13,8 °C		Lluvia ☐ Si ☒ No Viento ☐ Sí ☒ No	
Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
12,19,11	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado
TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☐ Flexión ☒ Brasileño ☐ Hielo-deshielo ☐ Absorción					
FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN					
Empresa: Elaboración propia			Fecha de elaboración: 05-02-2014		
Planta: LACAE			Hora de elaboración: 12:55		
Volumen amasada: 0,0185 m³					
DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO					
Denominación del hormigón: Hormigón 10% sustitución				Denominación de probetas.	
Aditivos: Ninguno				H/10-B-12	
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R				H/10-B-19	
Relación agua/cemento: 0,56				H/10-B-11	
Contenido de cemento: 5,57 kg					
ENSAYO DE ASENTAMIENTO					
CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO	
	39 mm	31 mm	35 mm	Simétrico	☒
				Sesgado	☐
CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro					
Fecha de recogida: 06-02-2015				Hora 13:00	
CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒			CURADO EN Balsa DE AGUA ☐		
Fecha de entrada: 06-02-2014		Hora: 13:00		Duración: 27 días	

Tabla ANEXO 4.21 k. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,7 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	11,1 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
25,30,5	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☐ Flexión ☒ Brasileño ☐ Hielo-deshielo ☐ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 05-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 15:10
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 20% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/20-B-25
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/20-B-30
Relación agua/cemento: 0,56	H/20-B-5
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	40 mm	34 mm	37 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 06-02-2014 Hora 15:50

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa DE AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 06-02-2014 Hora: 15:50 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 I. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar
 ☐ Entre ¼ y ¾
 ☒ Elegida de otra forma
 ☐ Otro

Temperatura ambiente	19,7 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	17,0 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
32,31,24	A 28 días	☒		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☐ Compresión	☐ Flexión	☒ Brasileño	☐ Hielo-deshielo	☐ Absorción
-----------------------	-------------------------------------	----------------------------------	---	---	------------------------------------

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 10-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:30
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 30% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/30-B-32
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/30-B-31
Relación agua/cemento: 0,56	H/30-B-24
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	32 mm	36 mm	34 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 11-02-2014 Hora 12:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN Balsa de AGUA ☐
 Fecha de entrada: 11-02-2014 Hora: 12:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 m. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	18,2 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	14,8 °C	Lluvia	☐ Sí ☒ No	Viento	☐ Sí ☒ No

N° Probetas	3	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
20,8,23	A 28 días	☐		☒ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO ☐ Compresión ☐ Flexión ☐ Brasileño ☒ Hielo-deshielo ☒ Absorción

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:00
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón Patrón	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-H-20
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/P-H-8
Relación agua/cemento: 0,56	H/P-A-23
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	35 mm	38 mm	36,5 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 28-01-2014 Hora 11:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN BALSA DE AGUA** ☒ 7 días las probetas cubicas
 Fecha de entrada: 28-01-2014 Hora: 11:00 Duración: 27 días + 20 días en cámara húmeda

Tabla ANEXO 4.21 n. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	18,8 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,1 °C	Lluvia	☐ Si	☒ No	Viento
				☐ Sí	☒ No

Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
1,6,24	A 28 días	☐		☒ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☐ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☒ Hielo-deshielo	☒ Absorción
-----------------------	-------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	--	---

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 12:20
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 10% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/10-H-1
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/10-H-6
Relación agua/cemento: 0,56	H/10-A-24
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	40 mm	34 mm	37 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 28-01-2014 Hora 12:30

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN BALSA DE AGUA** ☒ 7 días las probetas cubicas
 Fecha de entrada: 28-01-2014 Hora: 12:30 Duración: 27 días + 20 días en cámara húmeda

Tabla ANEXO 4.21 o. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	19,1 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,1 °C	Lluvia	☐ Si	☒ No	Viento
				☐ Sí	☒ No

Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
12,5,18	A 28 días	☐		☒ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☐ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☒ Hielo-deshielo	☒ Absorción
-----------------------	-------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	--	---

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 13:25
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 20% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/20-H-12
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/20-H-5
Relación agua/cemento: 0,56	H/20-A-8
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	32 mm	34 mm	33 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 28-01-2014 Hora 13:30

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN BALSA DE AGUA** ☒ 7 días las probetas cubicas
 Fecha de entrada: 28-01-2014 Hora: 13:30 Duración: 27 días + 20 días en cámara húmeda

Tabla ANEXO 4.21 p. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	20,1 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,5 °C	Lluvia	☐ Si	☒ No	Viento
				☐ Sí	☒ No

Nº Probetas	3	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
3,15,31	A 28 días	☐		☒ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☐ Prismáticas 15*15*60	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO	☐ Compresión	☐ Flexión	☐ Brasileño	☒ Hielo-deshielo	☒ Absorción
-----------------------	-------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	--	---

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 27-01-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 14:35
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 30% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/30-H-3
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/30-H-15
Relación agua/cemento: 0,56	H/30-A-31
Contenido de cemento: 5,57 kg	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	40 mm	38 mm	39 mm	Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 28-01-2014 Hora 14:25

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN BALSA DE AGUA** ☒ 7 días las probetas cubicas
 Fecha de entrada: 28-01-2015 Hora: 14:25 Duración: 27 días + 20 días en cámara húmeda

Tabla ANEXO 4.21 q. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,8 °C	Estado del tiempo: ☐ Soleado ☐ Nublado ☒ Lab.
Temperatura del hormigón	13,5 °C	Lluvia ☐ Si ☒ No Viento ☐ Sí ☒ No

Nº Probetas	4	Forma de rotura	Nº	Tipo	Compactación
Nº Moldes		A 7 días ☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
24,31,1,2		A 28 días ☐		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
		A..... ☐		☒ Prismáticas 25*25*5	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO Para el ensayo de la caja térmica y compresión a 7 y 21 días (1 probeta de cada)

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 10-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:00
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón patrón	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-C-7-24
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/P-C-7-31
Relación agua/cemento: 0,56	H/P-T-1
Contenido de cemento: 5,57 kg	H/P-T-2

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	38 mm	32 mm	35 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 11-02-2014 Hora 12:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN BALSA DE AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 11-02-2014 Hora: 12:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 r. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar
 ☐ Entre ¼ y ¾
 ☒ Elegida de otra forma
 ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,1 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	14,3 °C	Lluvia	☐ Sí	☒ No	Viento ☐ Sí ☒ No
N° Probetas	4	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
24,31,1,2	A 28 días	☐		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☒ Prismáticas 25*25*5	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO Para el ensayo de la caja térmica y compresión a 7 y 21 días (1 probeta de cada)

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 10-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:10
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 10% sustitución Aditivos: Ninguno Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R Relación agua/cemento: 0,56 Contenido de cemento: 5,57 kg	Denominación de probetas. H/P-C-7-24 H/P-C-7-31 H/P-T-1 H/P-T-2
--	---

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	40 mm	36 mm	38 mm	
				Simétrico ☒ Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 11-02-2014 Hora 11:20

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ CURADO EN Balsa de AGUA ☐
 Fecha de entrada: 11-02-2014 Hora: 11:20 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 s. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	18,3 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	15,1 °C	Lluvia	☐ Sí	☒ No	Viento ☐ Sí ☒ No
N° Probetas	4	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
9,21,1,2	A 28 días	☐		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☒ Prismáticas 25*25*5	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO Para el ensayo de la caja térmica y compresión a 7 y 21 días (1 probeta de cada)

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia. Fecha de elaboración: 11-02-2014
 Planta: Politécnica de Cuenca. Hora de elaboración: 10:45
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón 20% sustitución	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-C-7-9
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/P-C-7-21
Relación agua/cemento: 0,56	H/P-T-1
Contenido de cemento: 5,57 kg	H/P-T-2

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	34 mm	30 mm	32 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 12-02-2014 Hora 11:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 12-02-2014 Hora: 11:00 Duración: 27 días

Tabla ANEXO 4.21 t. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
UNE-EN 12350-2:2009

AMASADA

☐ Elegida al azar ☐ Entre ¼ y ¾ ☒ Elegida de otra forma ☐ Otro

Temperatura ambiente	17,4 °C	Estado del tiempo:	☐ Soleado	☐ Nublado	☒ Lab.
Temperatura del hormigón	14,8 °C	Lluvia	☐ Sí	☒ No	Viento ☐ Sí ☒ No
N° Probetas	4	Forma de rotura	N°	Tipo	Compactación
N° Moldes	A 7 días	☐		☒ Cilíndricas 15*30	☐ Apisonado
24,31,1,2	A 28 días	☐		☐ Cúbicas 15*15	☒ Picado LMAT-52-4
	A.....	☐		☒ Prismáticas 25*25*5	☐ Vibrado

TIPO DE ENSAYO Para el ensayo de la caja térmica y compresión a 7 y 21 días (1 probeta de cada)

FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Empresa: Elaboración propia Fecha de elaboración: 12-02-2014
 Planta: LACAE Hora de elaboración: 11:20
 Volumen amasada: 0,0185 m³

DATOS DE HOJA DE SUMINISTRO

Denominación del hormigón: Hormigón patrón	Denominación de probetas.
Aditivos: Ninguno	H/P-C-7-24
Tipo y clase del cemento: CEM I 42,5 R	H/P-C-7-31
Relación agua/cemento: 0,56	H/P-T-1
Contenido de cemento: 5,57 kg	H/P-T-2

ENSAYO DE ASENTAMIENTO

CONSISTENCIA	Ensayo 1	Ensayo 2	Media	FORMA DE ASENTAMIENTO
	42 mm	36 mm	37 mm	
				Simétrico ☒
				Sesgado ☐

CONSERVACIÓN EN LABORATORIO ☒ Bolsa de plástico + arpillera húmeda ☐ Otro
 Fecha de recogida: 13-02-2014 Hora 12:00

CURADO EN CAMARA HÚMEDA ☒ **CURADO EN Balsa de AGUA** ☐
 Fecha de entrada: 13-02-2014 Hora: 13:00 Duración: 27 días

**Tabla ANEXO 4.22 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido
UNE-EN 12390-7:2009**

Código probeta	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Código probeta	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
H/P-C-9	12,248	0,005299	2311,489	H/10-C-31	12,134	0,005299	2289,974
H/P-C-31	12,189	0,005299	2300,354	H/10-C-18	12,075	0,005299	2278,839
H/P-C-24	12,226	0,005299	2307,337	H/10-C-24	12,121	0,005299	2287,521
H/P-B-10	12,170	0,005299	2296,768	H/10-B-12	11,991	0,005299	2262,987
H/P-B-19	12,234	0,005299	2308,846	H/10-B-19	11,995	0,005299	2263,741
H/P-B-12	12,200	0,005299	2302,430	H/10-B-11	11,892	0,005299	2244,303
H/P-C-7-24	12,443	0,005299	2348,290	H/10-C-7-24	12,017	0,005299	2267,893
H/P-C-21-31	12,445	0,005299	2348,667	H/10-C-21-31	12,065	0,005299	2276,952
H/P-A-23	12,253	0,005299	2312,432	H/10-A-24	12,199	0,005299	2302,241
H/P-H-20	7,908	0,003375	2343,111	H/10-H-1	7,862	0,003375	2329,481
H/P-H-8	8,000	0,003375	2370,370	H/10-H-6	7,829	0,003375	2319,704
H/P-Ac-1	1,629	0,000708	2299,347	H/10-Ac-1	1,610	0,000708	2272,528
H/P-Ac-2	1,648	0,000708	2326,166	H/10-Ac-2	1,606	0,000708	2266,882
H/P-Ac-3	1,636	0,000708	2309,228	H/10-Ac-3	1,621	0,000708	2288,055

Código probeta	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Código probeta	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
H/20-C-7	11,646	0,005299	2197,877	H/30-c-13	11,462	0,005299	2163,152
H/20-C-4	11,586	0,005299	2186,553	H/30-C-22	11,473	0,005299	2165,228
H/20-C-15	11,608	0,005299	2190,705	H/30-C-29	11,417	0,005299	2154,659
H/20-B-25	11,679	0,005299	2204,105	H/30-B-32	11,499	0,005299	2170,134
H/20-B-30	11,577	0,005299	2184,855	H/30-B-31	11,504	0,005299	2171,078
H/20-B-5	11,750	0,005299	2217,504	H/30-B-24	11,597	0,005299	2188,629
H/20-C-7-9	11,587	0,005299	2186,742	H/30-C-7-24	11,505	0,005299	2171,267
H/20-C-21-21	11,652	0,005299	2199,009	H/30-C-21-31	11,388	0,005299	2149,186
H/20-A-18	11,881	0,005299	2242,227	H/30-A-31	11,627	0,005299	2194,291
H/20-H-13	7,630	0,003375	2260,741	H/30-H-3	7,440	0,003375	2204,444
H/20-H-5	7,597	0,003375	2250,963	H/30-H-15	7,354	0,003375	2178,963
H/20-Ac-1	1,567	0,000708	2211,834	H/30-Ac-1	1,468	0,000708	2072,094
H/20-Ac-2	1,580	0,000708	2230,183	H/30-Ac-2	1,469	0,000708	2073,506
H/20-Ac-3	1,536	0,000708	2168,077	H/30-Ac-3	1,500	0,000708	2117,262

Tabla ANEXO 4.23 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 24-02-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/P-C-9	681,1	38,56	-	-	S	
H/P-C-31	672,9	38,10	-	-	S	
H/P-C-24	662,3	37,50	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 03-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/10-C-31	453,6	25,68	-	-	S	
H/10-C-18	470,1	26,62	-	-	S	
H/10-C-24	455,9	25,81	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 03-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/20-C-7	330,9	18,74	-	-	S	
H/20-C-4	319,7	18,10	-	-	S	
H/20-C-15	306,8	17,37	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 03-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/30-C-13	254,7	14,42	-	-	S	
H/30-C-22	262,5	14,86	-	-	S	
H/30-C-29	246,7	13,97	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 e. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 10-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 14-02-2014 /24-02-2014

Edad: 7 días/21 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/P-C-7-24	536,7	30,39	-	-	S	
H/P-C-21-31	641,8	36,34	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 f. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 10-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 17-02-2014 /24-02-2014

Edad: 7 días/21 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/10-C-7-24	358,8	20,31	-	-	S	
H/10-C-21-31	430,1	24,36	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 g. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 11-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 18-02-2014 /25-02-2014

Edad: 7 días/21 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/20-C-7-9	249,7	14,14	-	-	S	
H/20-C-21-21	286,8	16,24	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 h. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 12-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 19-02-2014 /26-02-2014

Edad: 7 días/21 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/30-C-7-24	186,0	10,53	-	-	S	
H/30-C-21-31	207,9	11,77	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 i. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-03-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 02-06-2014

Edad: 90 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/P-C-90	717,4	40,60	-	-	S	
H/P-C-90	698,3	39,52	-	-	S	
H/10-C-90	598,8	33,90	-	-	S	
H/10-C-90	558,3	31,61	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 j. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-03-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 02-06-2014

Edad: 90 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/20-C-90	423,5	23,97	-	-	S	
H/20-C-90	341,0	19,30	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.23 k. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-03-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 02-06-2014

Edad: 90 días

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/30-C-90	288,4	16,33	-	-	S	
H/30-C-90	318,1	18,01	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.24 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas
UNE-EN 12390-5:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 20 t

Categoría: CLASE 0,5

Dirección de la carga: perpendicular al hormigonado

Tipo de dispositivo: ☒ dos puntos ☐ punto central**DATOS DEL HORMIGÓN**

Fecha de fabricación: 04-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 04-03-2014

Edad: 28 días.

Relación a/c: 0,56

Aspecto del hormigón ☒ Normal ☐ No normal**CONSERVACIÓN**☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:**

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐Húmeda ☒**APLICACIÓN DE LA CARGA**☒ 370 N/s☐ OTRA

Código probeta	Detalle del rectificado por pulido	Distancia entre los apoyos (mm) l	Longitud (mm) L	d ₁ mm	d ₂ mm	Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura N/mm ²	Situación de rotura dentro/fuera
H/P-F-15	-	450	600	150,1	150,58	36,35	4,85	dentro

Tensión de rotura: $f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_1^2}$

Tabla ANEXO 4.24 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas
UNE-EN 12390-5:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 20 t

Categoría: CLASE 0,5

Dirección de la carga: perpendicular al hormigonado

Tipo de dispositivo: ☒ dos puntos ☐ punto central**DATOS DEL HORMIGÓN**

Fecha de fabricación: 04-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 04-03-2014

Edad: 28 días.

Relación a/c: 0,56

Aspecto del hormigón ☒ Normal ☐ No normal**CONSERVACIÓN**☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:**

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐Húmeda ☒**APLICACIÓN DE LA CARGA**☒ 370 N/s☐ OTRA

Código probeta	Detalle del rectificado por pulido	Distancia entre los apoyos (mm) l	Longitud (mm) L	d ₁ mm	d ₂ mm	Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura N/mm ²	Situación de rotura dentro/fuera
H/10-F-22	-	450	600	150,52	150,35	36,23	4,83	dentro

Tensión de rotura: $f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_1^2}$

**Tabla ANEXO 4.24 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas
UNE-EN 12390-5:2009**

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 20 t

Categoría: CLASE 0,5

Dirección de la carga: perpendicular al hormigonado

Tipo de dispositivo: ☒ dos puntos ☐ punto central**DATOS DEL HORMIGÓN**

Fecha de fabricación: 04-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 04-03-2014

Edad: 28 días.

Relación a/c: 0,56

Aspecto del hormigón ☒ Normal ☐ No normal**CONSERVACIÓN**☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:**

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐Húmeda ☒**APLICACIÓN DE LA CARGA**☒ 370 N/s☐ OTRA

Código probeta	Detalle del rectificado por pulido	Distancia entre los apoyos (mm) l	Longitud (mm) L	d ₁ mm	d ₂ mm	Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura N/mm ²	Situación de rotura dentro/fuera
H/20-F-19	-	450	600	150,31	150,24	34,56	4,61	dentro

Tensión de rotura: $f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_1^2}$

Tabla ANEXO 4.24 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas
UNE-EN 12390-5:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 20 t

Categoría: CLASE 0,5

Dirección de la carga: perpendicular al hormigonado

Tipo de dispositivo: ☒ dos puntos ☐ punto central**DATOS DEL HORMIGÓN**

Fecha de fabricación: 04-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 04-03-2014

Edad: 28 días.

Relación a/c: 0,56

Aspecto del hormigón ☒ Normal ☐ No normal**CONSERVACIÓN**☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:**

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐Húmeda ☒**APLICACIÓN DE LA CARGA**☒ 370 N/s☐ OTRA

Código probeta	Detalle del rectificado por pulido	Distancia entre los apoyos (mm) l	Longitud (mm) L	d ₁ mm	d ₂ mm	Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura N/mm ²	Situación de rotura dentro/fuera
H/30-F-11	-	450	600	150,36	150,12	29,56	3,94	dentro

Tensión de rotura: $f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_1^2}$

Tabla ANEXO 4.25 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas UNE-EN 12390-6:2010

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 34 días.

Aspecto del hormigón: ☒ Normal ☐ No normal

FORMA

☒ Cilíndrica

☐ Cúbica

☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐

Húmeda ☒

CONSERVACIÓN

☒ Cámara húmeda

☐ Balsa de inmersión

APLICACIÓN DE LA CARGA

☒ 3500 N/s

☐ OTRA

Código probeta	Masa probeta (kg)	Longitud (mm) L			Dimensión transversal (mm) d				Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura (N/mm²)	Tipo de rotura normal /defectuosa
H/P-B-12	12,038	295,97	297,21	296,59	149,28	150,00	150,00	149,72	169,5	2,41	Normal
H/P-B-10	11,984	295,83	296,00	295,92	149,85	150,00	150,00	149,95	186,6	2,65	Normal
H/P-B-19	12,064	198,99	197,65	198,32	149,65	149,57	149,75	149,66	193,8	2,75	Normal

Tensión de rotura: $f_{ct} = \frac{2 \times F}{L \times d \times \pi}$

Tabla ANEXO 4.25 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas UNE-EN 12390-6:2010

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 12-03-2014

Edad: 35 días.

Aspecto del hormigón: ☒ Normal ☐ No normal

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐

Húmeda ☒

CONSERVACIÓN

☒ Cámara húmeda

☐ Balsa de inmersión

APLICACIÓN DE LA CARGA

☒ 3500 N/s

☐ OTRA

Código probeta	Masa probeta (kg)	Longitud (mm) L			Dimensión transversal (mm) d				Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tipo de rotura normal /defectuosa
H/10-B-12	11,759	296,17	296,86	296,51	149,58	149,86	150,00	149,81	189,5	2,69	Normal
H/10-B-19	11,766	297,88	297,66	297,77	149,89	150	150	149,96	170,8	2,43	Normal
H/10-B-11	11,656	295,6	296,2	295,9	149,84	150	150	149,94	196,5	2,79	Normal

Tensión de rotura: $f_{ct} = \frac{2 \times F}{L \times d \times \pi}$

Tabla ANEXO 4.25 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas UNE-EN 12390-6:2010

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 12-03-2014

Edad: 35 días.

Aspecto del hormigón: ☒ Normal

☐ No normal

FORMA

☒ Cilíndrica

☐ Cúbica

☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐

Húmeda ☒

CONSERVACIÓN

☒ Cámara húmeda

☐ Balsa de inmersión

APLICACIÓN DE LA CARGA

☒ 3500 N/s

☐ OTRA

Código probeta	Masa probeta (kg)	Longitud (mm) L			Dimensión transversal (mm) d				Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tipo de rotura normal /defectuosa
H/20-B-25	11,418	297,28	297,36	297,32	149,81	150,00	150,00	149,94	161,2	2,29	Normal
H/20-B-30	11,312	297,47	291,1	297,30	148,80	149,10	150,00	148,92	155,4	2,21	Normal
H/20-B-5	11,475	298,72	297,58	298,15	149,53	150,00	150,00	149,84	164,6	2,34	Normal

Tensión de rotura: $f_{ct} = \frac{2 \times F}{L \times d \times n}$

Tabla ANEXO 4.25 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas UNE-EN 12390-6:2010

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 10-02-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 17-03-2014

Edad: 34 días.

Aspecto del hormigón: ☒ Normal ☐ No normal

FORMA

☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

CONDICIONES DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS:

Condiciones de humedad de la superficie de las probetas

Saturada ☐

Húmeda ☒

CONSERVACIÓN

☒ Cámara húmeda

☐ Balsa de inmersión

APLICACIÓN DE LA CARGA

☒ 3500 N/s

☐ OTRA

Código probeta	Masa probeta (kg)	Longitud (mm) L			Dimensión transversal (mm) d				Carga de rotura (kN) F	Tensión de rotura (N/mm²)	Tipo de rotura normal /defectuosa
H/30-B-32	11,271	299,14	298,88	299,01	149,78	150,00	150,00	149,93	134,6	1,91	Normal
H/30-B-31	11,400	297,82	298,12	297,97	150,00	150,00	150,00	150,00	135,9	1,93	Normal
H/30-B-24	11,296	298,68	299,52	299,1	149,82	150,00	150,00	149,94	159,7	2,27	Normal

Tensión de rotura: $f_{ct} = \frac{2 \times F}{L \times d \times n}$

Tabla ANEXO 4.26 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE-EN 12390-8:2009

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Edad: 31 días.

Fecha de comienzo del ensayo: 28-02-2014

Fecha de final del ensayo: 03-03-2014

FORMA ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300mm

Relación a/c: 0,56

SALA DE ENSAYO

TEMPERATURA 19°C

HUMEDAD %

CONDICIONES DE SECADO PREVIO:☒ Secado en estufa 50 ± 5°C

Duración (72h)

AGUA UTILIZADA☒ De red☐ Destilada**DIRECCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL AGUA A PRESIÓN:** Dirección del hormigonado

Hora de aplicación de presión: 11:30 h

Hora de fin del ensayo: 11:30 h

CÁLCULO DE PROFUNDIDAD MEDIA

Código probeta	Peso cartulina 150*300 (P) g		Peso cartulina frente de penetración (p) g		Área (A) $A = \frac{p \times 45000}{P}$	Profundidad media (A/150) mm
H/P-B-12	6,10	6,10	0,35	0,35	2581,97	17,21
H/P-B-10	6,04	6,04	0,41	0,41	3054,63	20,36
H/P-B-19	6,08	6,08	0,42	0,42	3108,50	20,72

Código probeta	Profundidad máxima de penetración (mm)	Profundidad media de penetración (mm)	Media Prof. Máxima	Prof. Media	Filtraciones Si/No
H/P-B-12	34	17,21			NO
H/P-B-10	35	20,36	35	19,43	NO
H/P-B-19	36	20,72			NO

Observaciones: Cuando se procedió a desconectar la presión, se observó que la presión h en los manómetros había descendido a los 370 kPa.

Tabla ANEXO 4.26 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE-EN 12390-8:2009

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 05-02-2014

Edad: 32 días.

Fecha de comienzo del ensayo: 07-03-2014

Fecha de final del ensayo: 10-03-2014

FORMA ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300mm

Relación a/c: 0,56

SALA DE ENSAYO

TEMPERATURA 19°C

HUMEDAD %

CONDICIONES DE SECADO PREVIO:☒ Secado en estufa 50 ± 5°C

Duración (72h)

AGUA UTILIZADA☒ De red☐ Destilada**DIRECCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL AGUA A PRESIÓN:** Dirección del hormigonado

Hora de aplicación de presión: 11:00 h

Hora de fin del ensayo: 11:10 h

CÁLCULO DE PROFUNDIDAD MEDIA

Código probeta	Peso cartulina 150*300 (P) g		Peso cartulina frente de penetración (p) g		Área (A) $A = \frac{p \times 45000}{P}$	Profundidad media (A/150) mm
H/10-B-12	5,91	5,91	0,47	0,47	3578,68	23,86
H/10-B-19	5,99	5,99	0,43	0,43	3230,38	21,54
H/10-B-11	6,10	6,10	0,49	0,49	3614,75	24,10

Código probeta	Profundidad máxima de penetración (mm)	Profundidad media de penetración (mm)	Media		Filtraciones Si/No
			Prof. Máxima	Prof. Media	
H/10-B-12	38	23,86			NO
H/10-B-19	37	21,54	38	23,16	NO
H/10-B-11	39	24,10			NO

Tabla ANEXO 4.26 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE-EN 12390-8:2009

DATOS DEL HORMIGON

Fecha de fabricación: 05-02-2014

Edad: 32 días.

Fecha de comienzo del ensayo: 07-03-2014

Fecha de final del ensayo: 10-03-2014

FORMA ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300mm

Relación a/c: 0,56

SALA DE ENSAYO

TEMPERATURA 19°C

HUMEDAD %

CONDICIONES DE SECADO PREVIO:☒ Secado en estufa 50 ± 5°C

Duración (72h)

AGUA UTILIZADA☒ De red☐ Destilada**DIRECCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL AGUA A PRESIÓN:** Dirección del hormigonado

Hora de aplicación de presión: 11:00 h

Hora de fin del ensayo: 11:10 h

CALCULO DE PROFUNDIDAD MEDIA

Código probeta	Peso cartulina 150*300 (P) g		Peso cartulina frente de penetración (p) g		Área (A) $A = \frac{p \times 45000}{P}$	Profundidad media (A/150) mm
H/20-B-25	6,08	6,8	0,50	0,50	3700,66	24,67
H/20-B-30	5,93	5,93	0,46	0,46	3490,72	23,27
H/20-B-5	6,06	6,06	0,42	0,42	3118,81	20,79

Código probeta	Profundidad máxima de penetración (mm)	Profundidad media de penetración (mm)	Media		Filtraciones Si/No
			Prof. Máxima	Prof. Media	
H/20-B-25	39	24,67			NO
H/20-B-30	40	23,27	38,67	22,91	NO
H/20-B-5	37	20,79			NO

Tabla ANEXO 4.26 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE-EN 12390-8:2009

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 10-02-2014

Edad: 31 días.

Fecha de comienzo del ensayo: 14-03-2014

Fecha de final del ensayo: 17-03-2014

FORMA ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300mm

Relación a/c: 0,56

SALA DE ENSAYO

TEMPERATURA 19°C

HUMEDAD %

CONDICIONES DE SECADO PREVIO:☒ Secado en estufa 50 ± 5°C

Duración (72h)

AGUA UTILIZADA☒ De red☐ Destilada**DIRECCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL AGUA A PRESIÓN:** Dirección del hormigonado

Hora de aplicación de presión: 12:00 h

Hora de fin del ensayo: 12:05 h

CÁLCULO DE PROFUNDIDAD MEDIA

Código probeta	Peso cartulina 150*300 (P) g		Peso cartulina frente de penetración (p) g		Área (A) $A = \frac{p \times 45000}{P}$	Profundidad media (A/150) mm
H/30-B-32	6,04	6,04	0,35	0,35	2607,61	17,38
H/30-B-31	6,09	6,09	0,44	0,44	3251,23	21,67
H/30-B-24	6,10	6,10	0,46	0,46	3393,44	22,62

Probeta Nº	Profundidad máxima de penetración (mm)	Profundidad media de penetración (mm)	Media		Filtraciones Si/No
			Prof. Máxima	Prof. Media	
H/30-B-32	34	17,38			NO
H/30-B-31	41	21,67	37,67	20,56	NO
H/30-B-24	38	22,62			NO

Observaciones: Cuando se procedió a desconectar la presión, se observó que la presión h en los manómetros había descendido a los 380 kPa.

Tabla ANEXO 4.27 a. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982:2008

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 36 días.

FORMA☒ Cilíndrica☐ Cúbica☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x variable mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión

	Código probeta		
	H/P-A-23-1	H/P-A-23-2	H/P-A-23-3
Tiempo transcurrido del ensayo	Masa inicial (g)		
	4040	3980	3708
5 min.	4044	3986	3712
10 min.	4045	3986	3714
15 min.	4045	3987	3714
30 min.	4047	3989	3716
1h	4049	3991	3717
2h	4050	3992	3719
3h	4052	3994	3721
4h	4052	3995	3721
6h	4054	3997	3723
24h	4062	4005	3731
48h	4067	4010	3737
72h	4071	4014	3741
144 h	4082	4024	3752
166 h	4082	4025	3753
Altura de las probetas (cm)	9,96	9,91	9,45
Coeficiente de absorción $K = \frac{\delta a * \epsilon \epsilon}{10 * \sqrt{m}}$ (kg/m ² /min ^{1/2})	0,0002376	0,00025452	0,00025452
Porosidad efectiva $\epsilon \epsilon = \frac{Q_n - Q_0}{A * h * \delta a}$ (cm ³ /cm ³)	0,0239459	0,02578573	0,02704091
Resistencia a la penetración del agua $m = \frac{t_n}{h^2}$ (min/cm ²)	101,61126	102,639192	112,87478

Tabla ANEXO 4.27 b. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982:2008

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 36 días.

FORMA☒ Cilíndrica☐ Cúbica☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x variable mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión

	Código probeta		
	H/10-A-14-1	H/10-A-14-2	H/10-A-14-3
Tiempo transcurrido del ensayo	Masa inicial (g)		
	3952	3875	3559
5 min.	3956	3884	3568
10 min.	3957	3886	3569
15 min.	3957	3886	3569
30 min.	3958	3890	3572
1h	3960	3892	3575
2h	3962	3895	3578
3h	3964	3897	3580
4h	3966	3899	3581
6h	3968	3901	3584
24h	3977	3911	3593
48h	3983	3917	3600
72h	3988	3922	3604
144 h	3999	3933	3616
166 h	4000	3935	3618
Altura de las probetas (cm)	9,92	9,95	9,26
Coeficiente de absorción $K = \frac{\delta a \cdot \epsilon e}{10 \cdot \sqrt{m}} \text{ (kg/m}^2\text{/min}^{1/2}\text{)}$	0,0002715	0,00033936	0,0003337
Porosidad efectiva $\epsilon e = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta a} \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$	0,0274771	0,03424276	0,03618109
Resistencia a la penetración del agua $m = \frac{tn}{h^2} \text{ (min/cm}^2\text{)}$	102,43236	101,815611	117,554311

Tabla ANEXO 4.27 c. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982:2008

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 36 días.

FORMA☒ Cilíndrica☐ Cúbica☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x variable mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión

		Código probeta		
		H/20-A-18-1	H/20-A-18-2	H/20-A-18-3
Tiempo transcurrido del ensayo		Masa inicial		
		3837	3785	3467
	5 min.	3840	3794	3475
	10 min.	3841	3796	3477
	15 min.	3841	3797	3477
	30 min.	3843	3800	3480
	1h	3845	3802	3482
	2h	3847	3805	3485
	3h	3849	3808	3487
	4h	3851	3809	3488
	6h	3853	3812	3491
	24h	3862	3823	3501
	48h	3870	3832	3508
	72h	3874	3838	3513
	144 h	3884	3851	3526
	166 h	3885	3853	3528
Altura de las probetas (cm)		9,8	9,81	9,35
Coeficiente de absorción $K = \frac{\delta a \cdot \epsilon \epsilon}{10 \cdot \sqrt{m}}$ (kg/m ² /min ^{1/2})		0,0002715	0,00038461	0,00034502
Porosidad efectiva $\epsilon \epsilon = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta a}$ (cm ³ /cm ³)		0,0278135	0,03936231	0,0370475
Resistencia a la penetración del agua $m = \frac{tn}{h^2}$ (min/cm ²)		104,95627	104,742399	115,302125

Tabla ANEXO 4.27 d. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982:2008

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 03-03-2014

Edad: 36 días.

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x variable mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión

		Código probeta		
		H/30-A-31-1	H/30-A-31-1	H/30-A-31-1
Tiempo transcurrido del ensayo		Masa inicial		
		4070	4037	3655
	5 min.	4074	4041	3658
	10 min.	4075	4043	3660
	15 min.	4075	4043	3660
	30 min.	4078	4048	3664
	1h	4080	4052	3667
	2h	4083	4055	3671
	3h	4086	4058	3674
	4h	4088	4060	3676
	6h	4090	4063	3679
	24h	4101	4077	3693
	48h	4110	4087	3703
	72h	4116	4094	3710
	144 h	4132	4111	3728
	166 h	4135	4114	3731
Altura de las probetas (cm)		9,96	9,95	9,00
Coeficiente de absorción $K = \frac{\delta a \cdot \epsilon \epsilon}{10 \cdot \sqrt{m}}$ (kg/m ² /min ^{1/2})		0,0003676	0,00043551	0,00042986
Porosidad efectiva $\epsilon \epsilon = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta a}$ (cm ³ /cm ³)		0,0370591	0,04394488	0,04795255
Resistencia a la penetración del agua $m = \frac{t_n}{h^2}$ (min/cm ²)		101,61126	101,815611	124,444444

Tabla ANEXO 4.28 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo.
Pérdida de masa superficial. UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 24-02-2014

Fecha de fin del ensayo: 27-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150 x 150 x 150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☒ Balsa de inmersión**MEDIO DE CONGELACIÓN**☐ 97% agua potable y 3% de NaCl☒ Agua desionizada

	Código probeta	
	H/P-H-20	H/P-H-8
Masa del cubo seco 27 días (g)	7,948	8,045
Masa del cubo saturado 28 días (g)	7,954	8,049
Absorción de líquido $L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} * 100 (\%)$	0,075	0,050

Mediciones ciclo de 12 horas	Código probeta					
	H/P-H-20			H/P-H-8		
	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$
Fin del 4 ciclo	0,19	0,19	0,002	0,25	0,25	0,003
Fin del 14 ciclo	0,98	1,17	0,012	1,01	1,26	0,013
Fin del 28 ciclo	1,17	2,15	0,015	1,39	2,4	0,017

ms,n : es la masa acumulada del material desprendido secado en estufa

mc+f+f : es la masa del material desprendido secado en estufa

Tabla ANEXO 4.28 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo.
Pérdida de masa superficial. UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 24-02-2014

Fecha de fin del ensayo: 27-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150 x 150 x 150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☒ Balsa de inmersión**MEDIO DE CONGELACIÓN**☐ 97% agua potable y 3% de NaCl☒ Agua desionizada

	Código probeta	
	H/10-H-1	H/10-H-6
Masa del cubo seco 27 días (g)	7,904	7,899
Masa del cubo saturado 28 días (g)	7,912	7,885
Absorción de líquido $L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} * 100 (\%)$	0,038	0,102

	Código probeta					
	H/10-H-1			H/10-H-6		
Mediciones ciclo de 12 horas	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$
Fin del 4 ciclo	0,39	0,39	0,005	0,48	0,48	0,006
Fin del 14 ciclo	3,55	3,94	0,050	3,36	3,84	0,046
Fin del 28 ciclo	3,99	7,39	0,093	3,57	6,93	0,069

ms,n : es la masa acumulada del material desprendido secado en estufa

mc+f+f : es la masa del material desprendido secado en estufa

Tabla ANEXO 4.28 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 24-02-2014

Fecha de fin del ensayo: 27-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150 x 150 x 150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☒ Balsa de inmersión**MEDIO DE CONGELACIÓN**☐ 97% agua potable y 3% de NaCl☒ Agua desionizada

	Código probeta	
	H/20-H-13	H/20-H-5
Masa del cubo seco 27 días (g)	7,680	7,647
Masa del cubo saturado 28 días (g)	7,688	7,653
Absorción de líquido $L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} * 100 (\%)$	0,104	0,078

	Código probeta					
	H/20-H-13			H/20-H-5		
Mediciones ciclo de 12 horas	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$
Fin del 4 ciclo	0,78	0,78	0,010	0,56	0,56	0,009
Fin del 14 ciclo	4,59	5,37	0,060	4,38	4,94	0,059
Fin del 28 ciclo	5,58	10,17	0,073	5,96	10,34	0,075

ms,n : es la masa acumulada del material desprendido secado en estufa

mc+f+f : es la masa del material desprendido secado en estufa

Tabla ANEXO 4.28 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial. UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 24-02-2014

Fecha de fin del ensayo: 27-03-2014

Edad: 28 días

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150 x 150 x 150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACION☒ Cámara húmeda☒ Balsa de inmersión**MEDIO DE CONGELACIÓN**☐ 97% agua potable y 3% de NaCl☒ Agua desionizada

	Código probeta	
	H/30-H-3	H/30-H-5
Masa del cubo seco 27 días (g)	7,507	7,402
Masa del cubo saturado 28 días (g)	7,515	7,410
Absorción de líquido $L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} * 100 (\%)$	0,107	0,108

	Código probeta					
	H/30-H-3			H/30-H-5		
Mediciones ciclo de 12 horas	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$	mc+f+f	ms,n	$P = \frac{ms, n}{m_0} * 100\%$
Fin del 4 ciclo	0,75	0,75	0,010	0,85	0,85	0,011
Fin del 14 ciclo	5,10	5,85	0,068	4,86	5,71	0,067
Fin del 28 ciclo	6,06	11,16	0,081	6,54	11,4	0,085

ms,n : es la masa acumulada del material desprendido secado en estufa

mc+f+f : es la masa del material desprendido secado en estufa

Tabla ANEXO 4.29 a. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 27-03-2014

Edad: 61 días.

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150x150x150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/P-H-20	875,48	38,91	-	-	S	
H/P-H-8	851,62	37,85	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.29 b. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 27-03-2014

Edad: 61 días.

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150x150x150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/10-H-1	597,83	26,57	-	-	S	
H/10-H-6	590,18	26,23	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.29 c. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 27-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 27-03-2014

Edad: 61 días.

FORMA

- ☐ Cilíndrica
☒ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: 150x150x150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/20-H-13	473,85	21,06	-	-	S	
H/20-H-5	456,30	20,28	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.29 d. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009

DATOS DE MÁQUINA

Prensa: Máquina de ensayos hidráulica de 300 t

Categoría: CLASE 1

Dirección de la carga: perpendicular

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: 26-01-2014

Fecha de comienzo del ensayo: 27-03-2014

Edad: 61 días.

FORMA☐ Cilíndrica☒ Cúbica☐ Otra

Dimensiones: 150x150x150 mm

Relación a/c: 0,56

CONSERVACIÓN☒ Cámara húmeda☐ Balsa de inmersión**AJUSTE DE PROBETAS:**

Devastadora

APLICACIÓN DE LA CARGA☒ 8664 N/s☐ OTRA

Código probeta	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Factor de corrección	Tensión corregida (N/mm ²)	Tipo de rotura	Observaciones
H/30-H-3	391,73	17,41	-	-	S	
H/30-H-15	374,40	16,64	-	-	S	

Código de tipos de rotura no satisfactoria:

S: ROTURA SATISFACTORIA

Tabla ANEXO 4.30 a. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. UNE-EN 12504-4:2006

DATOS DEL EQUIPO**ULTRASONIDOS**

Dimensiones de los palpadores: 50 mm

Frecuencia del impulso: 1,5 kv

Colocación de los palpadores: bases de la probeta

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: Mirar ensayos de compresión

Edad: 28 días.

FORMA☒ Cilíndrica☐ Cúbica☐ OtraDimensiones: $\varnothing 150 \times 300$ mm

Relación a/c: 0,56

Código probeta	Nº de medida	Colocación de palpadores	Distancia entre palpadores (mm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (km/seg)
H/P-C-9	1	A	296,5	62,1	4,7746
	2	A	296,5	62,8	4,7213
	3	A	296,5	63,1	4,6989
H/P-C-31	1	A	295,5	63,8	4,6317
	2	A	295,5	63,2	4,6756
	3	A	295,5	63,4	4,6609
H/P-C-24	1	A	295	63,7	4,6311
	2	A	295	63,8	4,6238
	3	A	295	64,1	4,6022

Colocación de los palpadores:

Transmisión directa

Transmisión semidirecta

Transmisión indirecta

Tabla ANEXO 4.30 b. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. UNE-EN 12504-4:2006

DATOS DEL EQUIPO**ULTRASONIDOS**

Dimensiones de los palpadores: 50 mm

Frecuencia del impulso: 1,5 kv

Colocación de los palpadores: bases de la probeta

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: Mirar ensayos de compresión

Edad: 28 días.

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

Código probeta	Nº de medida	Colocación de palpadores	Distancia entre palpadores (mm)	Tiempo (µs)	Velocidad (km/seg)
H/P-C-9	1	A	296	68,7	4,3086
	2	A	296	68,9	4,2961
	3	A	296	68,5	4,3212
H/P-C-31	1	A	294	67,9	4,3299
	2	A	294	68,1	4,3172
	3	A	294	67,8	4,3363
H/P-C-24	1	A	295	68,9	4,2816
	2	A	295	68,2	4,3255
	3	A	295	68,5	4,3066

Colocación de los palpadores:

Transmisión directa

Transmisión semidirecta

Transmisión indirecta

Tabla ANEXO 4.30 c. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. UNE-EN 12504-4:2006

DATOS DEL EQUIPO**ULTRASONIDOS**

Dimensiones de los palpadores: 50 mm

Frecuencia del impulso: 1,5 kv

Colocación de los palpadores: bases de la probeta

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: Mirar ensayos de compresión

Edad: 28 días.

FORMA☒ Cilíndrica☐ Cúbica☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

Código probeta	Nº de medida	Colocación de palpadores	Distancia entre palpadores (mm)	Tiempo (µs)	Velocidad (km/seg)
H/P-C-9	1	A	295,5	71,3	4,1445
	2	A	295,5	74,8	3,9505
	3	A	295,5	73,3	4,0314
H/P-C-31	1	A	294	73,1	4,0219
	2	A	294	73,8	3,9837
	3	A	294	71,2	4,1292
H/P-C-24	1	A	294	73,1	4,0219
	2	A	294	73,4	4,0054
	3	A	294	72,7	4,0440

Colocación de los palpadores:

Transmisión directa

Transmisión semidirecta

Transmisión indirecta

Tabla ANEXO 4.30 d. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. UNE-EN 12504-4:2006

DATOS DEL EQUIPO**ULTRASONIDOS**

Dimensiones de los palpadores: 50mm

Frecuencia del impulso: 1,5 kv

Colocación de los palpadores: bases de la probeta

DATOS DEL HORMIGÓN

Fecha de fabricación: Mirar ensayos de compresión

Edad: 28 días.

FORMA

- ☒ Cilíndrica
☐ Cúbica
☐ Otra

Dimensiones: Ø150 x 300 mm

Relación a/c: 0,56

Código probeta	Nº de medida	Colocación de palpadores	Distancia entre palpadores (mm)	Tiempo (µs)	Velocidad (km/seg)
H/P-C-9	1	A	295	73,3	4,0246
	2	A	295	74,5	3,9597
	3	A	295	78,5	3,7580
H/P-C-31	1	A	295	77,2	3,8212
	2	A	295	74,2	3,9757
	3	A	295	73,3	4,0246
H/P-C-24	1	A	295	76,3	3,8663
	2	A	295	75,2	3,9229
	3	A	295	74,8	3,9439

Colocación de los palpadores:

Transmisión directa

Transmisión semidirecta

Transmisión indirecta

**Tabla ANEXO 4.31 a. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)**

Fecha ensayo: 22/04/2014 / Hora inicio: 09:00

Tiempo (min.)	CAJA		PP		Sust. 10%		Sust. 20%		Sust. 30%	
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
	<i>Temperaturas en °C</i>									
0	20,8	21,5	18,4	18,8	18,6	18,9	18,5	18,9	18,3	18,8
5	42,3	21,7	20,1	19	19,9	19	20,5	19	20,2	18,9
10	53,8	21,8	22,1	19,2	21,5	19,2	22,6	19,3	22,3	19,1
15	59,2	21,9	23,7	19,8	23	19,8	24,4	19,8	24,2	19,6
30	61,1	22,4	26,6	21,9	25,8	21,8	27,3	21,9	27,2	21,5
45	61,6	21,9	28,8	24	28,1	23,7	29,5	23,9	29,3	23,5
60	61,9	21,9	30,7	25,9	30,2	25,5	31,4	25,8	30,7	25,3
75	62,5	22,2	32,3	27,6	31,9	27,2	33	27,4	32,9	26,8
90	62,8	22,2	33,8	28,9	33,4	28,4	34,5	28,7	34,4	28,1
105	63,7	22,3	35	30,3	34,7	29,7	35,7	30	35,5	29,4
120	65,8	22,6	36,3	31,6	35,9	30,8	36,8	31,1	36,8	30,5
135	66,5	22,8	37,3	32,5	36,8	31,7	37,8	32,1	37,7	31,5
150	66,6	22,8	38,1	33,3	37,7	32,6	38,5	32,9	38,5	32,3
165	66,5	23,1	39	34,1	38,5	33,4	39,3	33,7	39,4	33
180	66,7	23	39,6	34,7	39,1	33,9	39,9	34,2	40,1	33,7
195	66,4	22,9	40,2	35,2	39,7	34,4	40,5	34,8	40,6	34,1
210	66,8	22,7	40,7	35,6	40,1	34,9	40,9	35,2	41,1	34,6
225	66,9	22,8	41,2	36,1	40,6	35,4	41,4	35,4	41,6	35,1
240	67,2	22,7	41,5	36,4	40,9	35,7	41,8	35,9	41,9	35,4
255	67,4	22,6	41,9	36,7	41,3	36	42,1	36,2	42,3	35,7
270	67,5	21,9	42,1	36,9	41,6	36,2	42,4	36,4	42,6	35,9
285	67,3	22,2	42,5	37,2	42	36,6	42,8	36,9	43	36,3
300	67,8	22,3	42,7	37,3	42,2	36,7	43	36,9	43,2	36,5
315	67,9	22,5	42,8	37,5	42,3	36,9	43,1	37,2	43,3	36,6
330	68,1	22,2	42,9	37,5	42,4	36,9	43,2	37,2	43,4	36,7
345	68,6	22,2	43	37,6	42,5	37,1	43,3	37,4	43,5	36,8
360	68,1	22,1	43,1	37,6	42,6	37,1	43,4	37,5	43,6	36,8
375	68,6	21,9	43,1	37,6	42,6	37,1	43,4	37,5	43,6	36,8

**Tabla ANEXO 4.31 b. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)**

Fecha ensayo: 23/04/2014 / Hora inicio: 09:00

Tiempo (min.)	CAJA		PP		Sust. 10%		Sust. 20%		Sust. 30%	
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
0	17,9	19,5	17	17,3	17,1	17,4	17	17,4	17	17,3
5	41,5	19,5	18,6	17,4	18,9	17,5	18,5	17,5	18,7	17,4
10	47,6	19,6	20,3	17,7	20,7	17,8	20,3	17,8	20,6	17,7
15	52,2	19,6	22,1	18,1	22,9	18,2	21,9	18,2	22,5	18
30	61,4	19,6	25,1	20,1	25,8	20	24,7	20	25,6	19,7
45	62,6	20,4	27,2	22,3	27,9	22	27	22,1	27,9	21,7
60	63,6	19,5	29,3	24,4	29,9	23,9	29	23,9	30	23,6
75	63,7	19,6	31,1	26	31,5	25,5	30,8	25,6	31,8	25,3
90	63,9	20,4	32,7	27,5	32,9	26,9	32,3	27,1	33,4	26,8
105	64,2	20,6	34	28,9	34,1	28,2	33,5	28,4	34,6	28,1
120	64,5	20,8	35,3	30,1	35,3	29,4	34,8	29,6	35,8	29,3
135	64,7	21,1	36,3	31,2	36,3	30,5	35,9	30,6	36,9	30,3
150	64,9	21,5	37,2	32,1	37,2	31,4	36,9	31,6	37,9	31,3
165	65,1	23,4	38,1	33	37,8	32,2	37,7	32,4	38,7	32,2
180	66,8	22,7	38,9	33,7	38,7	32,9	38,5	33,2	39,3	32,8
195	67,1	22,6	39,6	34,4	39,4	33,5	39,2	33,8	40	33,4
210	67,6	22,6	40,2	34,9	39,9	34,1	39,8	34,4	40,6	33,9
225	67,7	22,7	40,6	35,4	40,4	34,6	40,3	34,8	41	34,4
240	67,5	22,7	41,1	35,8	40,8	34,9	40,8	35,2	41,5	34,9
255	67,9	22,6	41,5	36,1	41,2	35,2	41,2	35,6	41,9	35,2
270	67,9	22,8	41,9	36,4	41,5	35,6	41,5	35,8	42,2	35,5
285	68,2	22,4	42,2	36,7	41,8	35,9	41,5	35,9	42,5	35,8
300	68,2	22,4	42,5	36,9	42	36,2	42	36,2	42,8	36
315	68,5	22,5	42,7	37,1	42,2	36,4	42,2	36,4	43	36,2
330	68,4	22,4	42,9	37,3	42,5	36,6	42,4	36,5	43,2	36,4
345	68,6	22,3	43,1	37,5	42,7	36,8	42,6	36,6	43,3	36,6
360	68,3	22,2	43,3	37,6	42,8	36,9	42,7	36,7	43,5	36,7
375	68,5	22,1	43,4	37,7	42,9	37	42,8	36,8	43,6	36,8
390	68,4	22	43,6	37,8	43	37,1	42,9	36,8	43,7	36,9
405	68,8	21,9	43,7	37,9	43,1	37,2	43	36,9	43,8	37
420	69,1	21,8	43,7	37,9	43,1	37,2	43	36,9	43,8	37

**Tabla ANEXO 4.31 c. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)**

Fecha ensayo: 24/04/2014 / Hora inicio: 09:00

Tiempo (min.)	CAJA		PP		Sust. 10%		Sust. 20%		Sust. 30%	
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
	<i>Temperaturas en °C</i>									
0	21,9	22,1	20,2	20,3	19,9	20,3	20,2	20,3	20,3	20,5
5	41,1	21,1	21,5	20,5	21,2	20,5	21,4	20,4	21,6	20,6
10	53	22,3	23,4	20,7	23,1	20,7	23,4	20,6	23,4	20,8
15	58,4	22,3	25,2	21,2	24,9	21,3	25,4	21,2	25,2	21,2
30	60,8	22,3	28,1	23,3	27,7	23,3	28,7	23,4	28	22,9
45	61	22,5	30,5	25,7	30	25,6	31,3	25,8	30,2	25
60	60,9	22,5	32,1	27,3	31,7	27,3	33	27,4	31,8	26,5
75	61,5	22,6	33,7	28,8	33,2	28,7	34,6	29	33,3	27,9
90	61,5	22,7	35	30,2	34,6	30,1	36	30,3	34,6	29,1
105	63	22,3	36,2	31,3	35,8	31,2	37,2	31,4	35,7	30,2
120	63,5	22,6	37,3	32,3	36,8	32,2	38,2	32,4	36,7	31,1
135	67,3	22,2	38,2	33,1	37,7	33	39,1	33,2	37,5	31,9
150	64,3	22,4	39	33,9	38,4	33,7	39,8	34	38,2	32,6
165	65,3	22,3	39,7	34,5	39	34,4	40,4	34,6	38,8	33,2
180	65,4	22,3	40,3	35	39,7	44,9	40,9	35,1	39,3	33,7
195	65,7	22,3	40,7	35,5	40,2	35,3	41,3	35,5	39,8	34,1
210	65,6	22,2	41,2	35,8	40,6	35,6	41,8	35,9	40,2	34,5
225	65,5	22	41,5	36,2	40,9	36	42,1	36,2	40,5	34,8
240	65,9	21,9	41,7	36,4	41,3	36,2	42,3	36,4	40,8	35
255	66,2	21,6	42	36,6	41,5	36,3	42,5	36,6	41,1	35,2
270	66,5	21,5	42,2	36,8	41,7	36,5	41,5	36,9	41,3	35,4
285	66,9	21,4	42,4	36,9	41,9	36,6	42,9	37	41,5	35,5
300	67,3	21,2	42,5	37	42,1	36,8	43,1	37,2	41,6	35,6
315	67,8	21,1	42,6	37,1	42,2	36,7	43,2	37,3	41,7	35,7
330	68,1	21	42,7	37,2	42,3	36,8	43,3	37,4	41,8	35,8
345	68,1	20,8	42,8	37,3	42,4	36,9	43,4	37,5	41,9	35,9
360	68,4	20,7	42,9	37,4	42,5	37	43,5	37,6	42	36
375	68,5	20,7	42,9	37,4	42,5	37	43,5	37,6	42	36

**Tabla ANEXO 4.31 d. Determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario.
Métodos de la caja caliente guardada y calibrada (UNE-EN ISO 8990:1997)**

Fecha ensayo: 25/04/2014 / Hora inicio: 09:00

Tiempo (min.)	CAJA		PP		Sust. 10%		Sust. 20%		Sust. 30%	
	TAE	TAC	CEM 1	CIM 1	CEM 2	CIM 2	CEM 3	CIM 3	CEM 4	CIM 4
0	19,8	21,3	18,6	18,8	18,4	18,5	18,4	18,9	18,6	18,5
5	39,5	21,3	19,7	18,9	19,6	18,7	19,7	19	19,9	19
10	55,3	21,3	21,3	19,1	21,5	19	21,6	19,3	21,5	19,3
15	62,6	21,3	22,6	19,5	22,9	19,4	22,9	19,7	23,6	19,7
30	63,8	21,4	25,3	21,6	25,9	21,6	25,8	21,7	26,9	21,7
45	64,2	21,4	27,5	23,6	28,2	23,8	27,9	23,8	29,3	24
60	66,2	21,6	29,3	25,4	30,1	25,7	29,8	25,7	31,2	25,9
75	66,5	21,8	31	26,9	31,7	27,2	31,4	27,2	32,9	27,5
90	66,4	22	32,7	28,5	33,3	28,8	33,1	28,9	34,5	29,1
105	67,3	22,2	33,7	29,6	34,3	29,8	34,1	29,9	35,5	30,1
120	66,5	22,7	34,8	30,7	35,3	30,8	35,3	31,1	36,6	31,2
135	66,7	23,1	35,8	31,6	36,3	31,8	36,2	32	37,5	32,2
150	66,8	22,9	36,9	32,6	37,1	32,6	37,2	32,7	38,5	33
165	66,5	22,7	37,5	33,2	37,8	33,2	37,9	33,4	39,1	33,6
180	66,8	22,5	38,2	33,8	38,3	33,8	38,5	33,9	39,7	34
195	67,8	22,7	38,7	34,3	38,8	34,2	39,8	34,2	38,1	34,5
210	67,7	22,7	39,3	34,8	39,3	34,7	39,4	34,8	40,6	35
225	67,9	22,6	39,7	35,1	37,7	35	39,8	35,1	41	35,3
240	68	22,6	40,1	35,5	39,9	35,2	40,2	35,4	41,3	35,6
255	68,4	22,5	40,4	35,9	40,3	35,6	40,5	35,8	41,6	36
270	68,2	22,5	40,7	36,2	40,6	35,9	40,7	36	41,8	36,1
285	68,4	22,4	41	36,3	40,8	36,1	41	36,2	42,1	36,3
300	68,1	22,4	41,2	36,6	41	36,3	41,1	36,4	42,3	36,6
315	68,1	22,4	41,4	36,8	41,2	36,5	41,3	36,5	42,4	36,7
330	67,9	22,3	41,6	36,9	41,4	36,6	41,4	36,6	42,5	36,8
345	68	22	41,8	37,1	41,5	36,7	41,6	36,7	42,7	36,9
360	67,9	21,8	41,9	37,2	41,6	36,9	41,7	36,8	42,8	37
375	68,3	21,8	42	37,3	41,7	37	41,8	36,9	42,9	37,1
390	68,5	21,7	42,1	37,4	41,8	37,1	41,8	36,9	42,9	37,1
405	68,7	21,6	42,1	37,4	41,8	37,1	41,8	36,9	42,9	37,1

Leyenda:

- TAC Temperatura ambiente de la cámara	- CEM 2 Temperatura cara externa del material 2
- TAE Temperatura ambiente exterior	- CIM 3 Temperatura cara interna del material 3
- CIM 1 Temperatura cara interna del material 1	- CEM 3 Temperatura cara externa del material 3
- CEM 1 Temperatura cara externa del material 1	- CIM 4 Temperatura cara interna del material 4
- CIM 2 Temperatura cara interna del material 2	- CEM 4 Temperatura cara externa del material 4

Coefficiente de conductividad térmica

$$\lambda = \frac{e \cdot ((TAC - TAE) - (CIM - CEM))}{((CIM - CEM) - (R_{si} - R_{se}))}$$

λ	Coefficiente de conductividad térmica (W/m °C)
e	Espesor de la capa (en metros)
$(CIM - CEM)$	Incremento de temperatura entre las caras de la probeta (en °C)
$(TAC - TAE)$	Incremento de temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la caja
R_{se}	Resistencia térmica superficial exterior (m ² °C/W)
R_{si}	Resistencia térmica superficial interior (m ² °C/W)

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ESTADO DEL ARTE

Tabla EA.1 Tipos de fibras y países de origen	30
Tabla EA.2 Mayores cultivos agrícolas y sus residuos	43
Tabla EA.3 Desglose de los resultados de la literatura técnica encontrada	49

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

Tabla 1.1 Clasificación técnica de dureza. Escala USA	71
Tabla 1.2 Producción mundial de almendra en grano (t)	73
Tabla 1.3 Histórico de producción de almendra en grano en España (t)	76
Tabla 1.4 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades	87
Tabla 1.5 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades (media aritmética del resto)	88
Tabla 1.6 Rendimiento al descascarado de las distintas variedades (media aritmética del resto)	88
Tabla 1.7 Tipos de mortero según el conglomerante	93
Tabla 1.8 Designación de los cementos comunes	97
Tabla 1.9 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación	98
Tabla 1.10 Prescripciones químicas de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación	98
Tabla 1.11 Proporciones en masa de los componentes de los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación, según su clasificación por tipo, denominación y designación	99
Tabla 1.12 Clasificación de los áridos por tipo de roca	102
Tabla 1.13 Clasificación de los morteros	106
Tabla 1.14: Tipos de mortero de albañilería según su aplicación	107
Tabla 1.15: Tipos de mortero de albañilería según el concepto	108
Tabla 1.16 Propiedades del mortero en estado fresco	108
Tabla 1.17 Propiedades del mortero en estado endurecido	110
Tabla 1.18 Clases de mortero endurecido de acuerdo a los valores de resistencia a compresión	111
Tabla 1.19 Clases de mortero de albañilería para formación de fábricas	112
Tabla 1.20 Clases de mortero de albañilería para solados	113
Tabla 1.21 Morteros de revoco / enlucido. Rangos de resistencia a compresión. Designación	113
Tabla 1.22 Morteros de revoco / enlucido. Rangos de absorción de agua por capilaridad. Conductividad térmica. Designación	114

Tabla 1.23 Clases de mortero de revoco / enlucido. Aplicación	114
Tabla 1.24 Tipos de cemento utilizables	118
Tabla 1.25 Designación de los áridos	120
Tabla 1.26 Requisitos generales de los tamaños máximo D y mínimo d	121
Tabla 1.27 Distintas consistencias y valores límite del asentamiento del cono	137
Tabla 1.28 Clasificación de los hormigones según su uso	140
Tabla 1.29 Clases de resistencia normalizada a compresión	149
 CAPÍTULO 2. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA Y ROCCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS	
Tabla 2.1 Componentes del cemento CEM I 42,5 R	154
Tabla 2.2 Certificado de características técnicas CEM I 42,5 R	154
Tabla 2.3 Características químicas del clinker empleado en este cemento	155
Tabla 2.4 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN	156
Tabla 2.5 Masa mínima de las porciones de ensayo	174
Tabla 2.6 Codificación de las probetas de mortero	202
Tabla 2.7 Dosificaciones según amasadas	203
Tabla 2.8 Número de probetas fabricadas. Tipos de ensayos a las que son sometidas	205
Tabla 2.9 Potencias del regulador de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00	271
Tabla 2.10 Determinación del poder calorífico de los ROCA	285
Tabla 2.11 Códigos empleados para las distintas dosificaciones para la fabricación de los morteros. Porcentajes de sustitución en peso	287
Tabla 2.12 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra en estado natural (ROCA)	288
Tabla 2.13 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra calcinada C20 (ROCCA)	290
Tabla 2.14 Demanda de agua para fabricar probetas de mortero con cáscara de almendra calcinada C30 (ROCCA)	290
Tabla 2.15 Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido según dosificaciones	291
Tabla 2.16 Resultado de los ensayos de absorción por capilaridad de los morteros endurecidos	293
Tabla 2.17 Resistencias mecánicas a flexión a 7 días	299
Tabla 2.18 Resistencias mecánicas a flexión a 15 días	300
Tabla 2.19 Resistencias mecánicas a flexión a 28 días	301
Tabla 2.20 Resistencias mecánicas a flexión a 60 días	302

Tabla 2.21 Resistencias mecánicas a flexión a 90 días	302
Tabla 2.22 Resistencias mecánicas a compresión a 7 días	305
Tabla 2.23 Resistencias mecánicas a compresión a 15 días	306
Tabla 2.24 Resistencias mecánicas a compresión a 28 días	307
Tabla 2.25 Resistencias mecánicas a compresión a 60 días	308
Tabla 2.26 Resistencias mecánicas a compresión a 90 días	308
Tabla 2.27 Variaciones de peso entre el inicio y fin del ensayo a resistencia a la cristalización en NaCl	315
Tabla 2.28 Variaciones de peso entre el inicio y fin del ensayo a resistencia a la cristalización en Na ₂ SO ₄	319
Tabla 2.29 Resultados de los ensayos para la determinación de la conductividad térmica probetas PP, A10, A20, A30	326
Tabla 2.30 Valores de densidades y conductividades térmicas λ de las probetas ensayadas PP, A10, A20, A30	327
Tabla 2.31 Requisitos recogidos en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE para morteros de cemento para albañilería y para revoco o enlucido	329
Tabla 2.32 Relación de muestras analizadas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	330
Tabla 2.33. Relación de muestras analizadas mediante microscopia óptica de polarización (MOP)	341
CAPÍTULO 3. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES	
Tabla 3.1 Naturaleza de los áridos suministrados para ensayos	355
Tabla 3.2 Tamaño mínimo de las muestras de ensayo	361
Tabla 3.3 Tamaño mínimo de las muestras de ensayo	393
Tabla 3.4 Tamices de barras	421
Tabla 3.5 Masa de las muestras de ensayo	426
Tabla 3.6 Tamices de ensayo	433
Tabla 3.7 Masa mínima de las porciones de ensayo (método de la balanza hidrostática)	445
Tabla 3.8 Dosificación de referencia	449
Tabla 3.9 Dosificaciones según amasada	450
Tabla 3.10 Codificación de referencia	457
Tabla 3.11 Codificación según tipo de ensayo	457
Tabla 3.12 Codificación según tipo de mezcla, ensayo, periodo e identificación del molde utilizado	458
Tabla 3.13 Distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono	462
Tabla 3.14 Tratamiento de las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo	490

Tabla 3.15 Índice de lajas y coeficiente de forma de la grava y de la cáscara de almendra	502
Tabla 3.16 Índice de lajas de lajas con diferentes sustituciones	502
Tabla 3.17 Coeficientes de resistencia al desgaste (Micro-Deval) y a la fragmentación (Los Ángeles)	506
Tabla 3.18 Coeficiente de friabilidad de las arenas	506
Tabla 3.19 Densidades de los áridos empleados	507
Tabla 3.20 Porosidad de conjunto y absorción de agua de los áridos empleados	507
Tabla 3.21 Humedad (%) de los áridos empleados	510
Tabla 3.22 Contenido en finos (%) y Equivalente de arena (SE)	512
Tabla 3.23 Asentamiento de las diferentes amasadas	514
Tabla 3.24 Distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono	515
Tabla 3.25 Densidad de cada una de las probetas de ensayo en “condiciones de recepción”	517
Tabla 3.26 Carga de rotura y tensión de rotura a compresión (a 28 días)	519
Tabla 3.27 Tensiones de rotura a compresión a 7, 21, 28 y 90 días	523
Tabla 3.28 Carga de rotura y tensión de rotura a flexión (a 28 días)	524
Tabla 3.29 Carga de rotura y tensión de rotura a tracción indirecta	527
Tabla 3.30 Profundidad media y máxima de penetración de agua bajo presión	530
Tabla 3.31 Incremento de masa medio, por absorción capilar (g/cm^2)	532
Tabla 3.32 Coeficiente de absorción capilar, porosidad efectiva y resistencia a la penetración de agua por absorción capilar	534
Tabla 3.33 Pérdida media de masa (%), por ciclos	537
Tabla 3.34 Carga de rotura y tensión de rotura a compresión, de probetas ensayadas a ciclos de hielo-deshielo	539
Tabla 3.35 Correlación entre la velocidad de impulsos ultrasónicos y la tensión de rotura a compresión, a 28 días	541
Tabla 3.36 Resultados del ensayo de la caja caliente para determinar el coeficiente de conductividad térmica (λ)	545
Tabla 3.37 Valores medios de la densidad y la conductividad térmica	546

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN

Fig. INT.1 Diferentes formas de gestión de los residuos en varios países de la UE en 2013	11
Fig. INT.2 Porcentaje de residuos destinados a vertedero en 2013. Fuente: Eurostat 2015	13

ESTADO DEL ARTE

Fig. EA.1 El sisal	33
Fig. EA.2 El coco	34
Fig. EA.3 Bagazo de caña de azúcar	35
Fig. EA.4 Bambú. Sistema constructivo ecológico: Cimentación de hormigón ciclópeo armado con bambú, refuerzo con hormigón armado	36
Fig. EA.5 Detalle de las hojas, pecioladas, con limbo triangular de 10 a 15 cm de largo por 5 cm de ancho	37
Fig. EA.6 Utilización del tejido de yute como arpillera húmeda para el curado del hormigón	37
Fig. EA.7 Línea de molturación	38
Fig. EA.8 Probeta de composite formado por cemento, arena y cascarilla de arroz	39
Fig. EA.9 Cáscara de cacahuete como agregado	40
Fig. EA.10 Cáscara de almendra como agregado	41

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

Fig. 1.1 Esquema del fruto del almendro	70
Fig. 1.2 Producción mundial de almendra	74
Fig. 1.3 Evolución de la producción nacional de almendra	74
Fig. 1.4 Zonas de distribución de plantaciones regulares de almendra en España	75
Fig. 1.5 Histórico de producciones de almendra en grano en España (t)	77
Fig. 1.6 Distribución media nacional de la producción de almendra en grano en %, periodo 2005-2014	77
Fig. 1.7 Mapa de concentración de la industria descascaradora de frutos secos (provincial)	79
Fig. 1.8 Diagrama del proceso industrial de la almendra	81
Fig. 1.9 Recepción, pesaje y toma de muestras. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	82
Fig. 1.10 Prelimpia. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	82
Fig. 1.11 Silos de almacenamiento. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	83
Fig. 1.12 Cadena de lavado. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	83
Fig. 1.13 Calibrador rompedor. Separador. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	84
Fig. 1.14 Calibración electrónica. Secado. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	85

Fig. 1.15 Envasado y etiquetado. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	85
Fig. 1.16 Conservación. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	86
Fig. 1.17 Apilado de la cáscara. Planta de tratamiento. Empresa ALMENDRAS DE LA MANCHA, S.A.	86
Fig. 1.18 Componentes de los morteros	92
Fig. 1.19 Componentes de los cementos	96
Fig. 1.20 Componentes de los hormigones	117
Fig. 1.21 Esquema del proceso de dosificación del hormigón	138
Fig. 1.22 Componentes de los BTC	148

CAPÍTULO 2. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA Y ROCCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS

Fig. 2.1 Recepción y conservación del cemento CEM I 42,5 R	153
Fig. 2.2 Arena normalizada CEN utilizada	157
Fig. 2.3 Microscopio electrónico Hitachi S-570 y sus partes componentes	158
Fig. 2.4 Equipos de grafitación de las pastillas “BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply” y el “Polaron SEM Coating System”	158
Fig. 2.5 Ubicación de la barra de grafito en los bornes de la cámara de alto vacío	159
Fig. 2.6 Portamuestras del microscopio electrónico; a) en plena extracción, b) visualización del portamuestras	159
Fig. 2.7 Panel de control para las operaciones con el microscopio electrónico	160
Fig. 2.8 Depósito de almacenamiento de agua purificada de polietileno de 100 litros, marca Merck MILLIPORE modelo TANKPE100	162
Mapa conceptual 1. MORTEROS. Caracterización de los componentes	164
Mapa conceptual 2. MORTEROS. Desarrollo experimental	165
Fig. 2.9 Proceso de molienda y cribado de los ROCA	166
Fig. 2.10 Recepción y conservación de los ROCA	167
Fig. 2.11 Horno de leña marca J. LLOPIS, de plataforma de cocción giratoria con superficie en material acumulativo	167
Fig. 2.12 Cuadro de control con autómatas y pantalla táctil	168
Fig. 2.13 Estadísticas de trabajo y consumos del quemador	169
Fig. 2.14 Tres (3) tipos de biomasa diferentes posibles de alimentación del horno	170
Fig. 2.15 Quemador. Detalle entrada del horno donde se inserta dicho quemador	171
Fig. 2.16 Recogida de la ceniza producto de la calcinación de la cáscara de almendra por la zona inferior del quemador, a través de un compartimento con bandeja extraíble que posteriormente es depositado en recipiente metálico	171
Fig. 2.17 Secado y tamizado de los ROCCA	172
Fig. 2.18 Recepción y conservación de los ROCCA	172
Fig. 2.19 Preparación de la muestra de cáscara de almendra para el ensayo en balanza hidrostática	175

Fig. 2.20 Balanza hidrostática. Porción de ensayo introducida en una especie de bolsa hecha con malla de plástico, pesada y colocada en la cesta de tela metálica, sumergida en el tanque que contiene agua y enfriada a temperatura ambiente después de haber sido calentada en estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante	177
Fig. 2.21 Preparación de la muestra de cáscara de almendra en el molino de bolas planetario	179
Fig. 2.22 Pesada del picnómetro relleno con agua destilada; porción de muestra a ensayar; picnómetro relleno con la porción de muestra más el agua destilada	180
Fig. 2.23 Volumenómetro de Le Chatelier	182
Fig. 2.24 Espectrómetro PHILIPS Magix Pro	184
Fig. 2.25 Microscopio electrónico Hitachi S-570 y sus partes componentes	185
Fig. 2.26 Equipos de grafitación de las pastillas "BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply" y el "Polaron SEM Coating System"	186
Fig. 2.27 Ubicación de la barra de grafito en los bornes de la cámara de alto vacío	187
Fig. 2.28 Portamuestras del microscopio electrónico; a) en plena extracción, b) visualización del portamuestras	187
Fig. 2.29 Panel de control para las operaciones con el microscopio electrónico	188
Fig. 2.30 Equipo Bruker, modelo Vector 22	188
Fig. 2.31 Equipo de vacío empleado para el filtrado	194
Fig. 2.32 Agitador magnético "Bunsen"	194
Fig. 2.33 Tonalidad rosada clara después de valorar con ácido clorhídrico	195
Fig. 2.34 Diagrama para la representación gráfica de los resultados de la puzolanicidad para diferentes edades	197
Fig. 2.35 Bomba calorimétrica para la determinación del poder calorífico (marca PARR modelo 6200)	201
Fig. 2.36 Esquema de bomba de combustión calorimétrica de tipo clásico con termostato	201
Fig. 2.37 Probeta con cáscara saturada (izquierda) y probeta con la cáscara seca (derecha)	204
Fig. 2.38 Preparación de material para amasado: Amasadora; Colocación de recipiente con el agua y el cemento y accionamiento del inicio de amasado	207
Fig. 2.39 Molde engrasado; Compactadora con molde; Vertido del mortero por capas	208
Fig. 2.40 Extendido con espátula; Vertido de la segunda capa; Aspecto de la superficie después del compactado	208
Fig. 2.41 Probeta sacada de cámara húmeda; Desmoldado de probetas; Identificación	209
Fig. 2.42 Colocación de probetas en cubetas de inmersión rellenas con agua desionizada	210
Fig. 2.43 Molde de $\varnothing 100$ mm listo para su llenado	212
Fig. 2.44 Llenado de probetas cilíndricas de $\varnothing 100$ mm	212
Fig. 2.45 Llenado de probetas cilíndricas de $\varnothing 29$ mm	213

Fig. 2.46 Probetas cilíndricas de Ø100mm y Ø29 mm en proceso de fraguado	214
Fig. 2.47 Desmoldado de probetas cilíndricas de Ø100 mm y Ø29 mm	214
Fig. 2.48 Probetas cilíndricas de Ø100 mm y Ø29 mm en cubetas de curado	214
Fig. 2.49 Molde para fabricación de probetas para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente	215
Fig. 2.50 Elaboración de probetas 250x240x30 mm para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente. Engrasado del molde; Extendido de la masa; Compactado de la probeta	216
Fig. 2.51 Fraguado de probetas de 250x240x30 mm a temperatura ambiente en laboratorio	217
Fig. 2.52 Desmoldado de probetas de 250x240x30 mm e identificación de las mismas	217
Fig. 2.53 Curado de probetas de 250x240x30 mm en cámara húmeda	218
Fig. 2.54 Molde y placa engrasados para ensayo de consistencia normal	219
Fig. 2.55 Ensayo de consistencia con el aparato de Vicat	221
Fig. 2.56 Realización de pesadas sucesivas de probetas sacadas de estufa	223
Fig. 2.57 Sellado de probetas; probetas secadas partidas; sellado de las caras con parafina; probetas selladas listas para ensayar	225
Fig. 2.58 Secado de probetas en una estufa con ventilación a la temperatura de (60±5)°C	226
Fig. 2.59 Comprobación del nivel de agua. Disposición de las probetas	226
Fig. 2.60 Bandeja cubierta para evitar la evaporación en la superficie de las probetas sumergidas mientras es cronometrado el tiempo	227
Fig. 2.61 Probetas después del ensayo de absorción de agua	228
Fig. 2.62 Restos de probetas ensayadas previamente a compresión; Secado de muestras en estufa de desecación; Muestras listas para ensayar en porosímetro de mercurio	231
Fig. 2.63 Resistencia a flexión medida mediante un dispositivo apropiado en la máquina de ensayo a compresión	236
Fig. 2.64 Resistencia a compresión en la máquina de ensayo a compresión	238
Fig. 2.65 Tubo de impedancia Brüel & Kjaer tipo 4206	243
Fig. 2.66 Instrumentación: amplificador de potencia; generador de ruido; calibrador de micrófono	243
Fig. 2.67 Fabricación de las probetas y desmoldado	245
Fig. 2.68 Fabricación de muestras de calibración para el tubo de impedancia Brüel & Kjaer Tipo 4206; muestras de estudio preparadas para ensayo en el tubo de impedancia acústica	245
Fig. 2.69 Colocación de muestra de calibración en tubo de impedancia acústica	246
Fig. 2.70 Configuración para el tubo de impedancia en la medición de impedancias específicas y los coeficientes de absorción de sonido	246
Fig. 2.71 Equipo para la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos CONTROLS E46	249
Fig. 2.72 Colocación de los palpadores en la probeta a ensayar	250

Fig. 2.73 Secado de probetas en un horno ventilado a una temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Probetas preparadas para ser sumergidas en la disolución respectiva (NaCl o Na_2SO_4)	254
Fig. 2.74 Probetas secas colocadas en los contenedores de la disolución saturada de NaCl ($35,7\text{g NaCl}/100\text{cc H}_2\text{O}$)	255
Fig. 2.75 Ensayos de resistencias mecánicas a flexión y a compresión de las probetas	256
Fig. 2.76 Probetas secas colocadas en los contenedores de la disolución saturada de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	256
Fig. 2.77 Probetas prismáticas secas colocadas separadamente en el porta rejilla e introducidas en el arcón congelador manteniéndolas un periodo de 24 h, a temperatura constante de -15°C	259
Fig. 2.78 Probetas que han sido sacadas de la cámara frigorífica son colocadas en una bandeja, separadas entre sí y cubiertas en todas sus caras y aristas con agua desionizada. La bandeja se deja en la cámara húmeda durante 24 h. Estos ciclos (hielo/deshielo) se repiten 25 veces	260
Fig. 2.79 Terminados los ciclos hielo/deshielo las probetas se vuelven a pesar para comprobar su variación de peso. A continuación son sometidas a ensayos de resistencias a flexión y a compresión	261
Fig. 2.80 Equipamiento de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00	266
Fig. 2.81 Molde para fabricación de probetas para ensayo de transmitancia térmica por el método de caja caliente	267
Fig. 2.82 Tratamiento de las probetas previo el ensayo de transmitancia térmica por el método de la caja caliente	268
Fig. 2.83a Aberturas de las que dispone la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00	269
Fig. 2.83b Las probetas de ensayo están siendo ensayadas. En cada abertura están conectados los termopares con cinco termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas	270
Fig. 2.84 Esquema de funcionamiento de la caja caliente PHYWE Systeme GmbH & Co. KG conduction 3.6.03-00	271
Fig. 2.85 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en mK^2/W	273
Fig. 2.86 (a, b y c). Microfotografías de una muestra del árido natural empleado en la presente investigación, obtenidas a 69x, 300x y 1.000x aumentos	277
Fig. 2.87 (a, b y c). Microfotografías obtenidas de las facetas exteriores e interiores de una muestra de residuo orgánico (ROCA) a diferentes aumentos (350x, 500x y 1.300x). Son visibles los abundantes microporos naturales (P)	278
Fig. 2.88 Composición orgánica de una muestra de residuo tipo ROCA en estado natural, obtenida mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)	278
Fig. 2.89 Composición orgánica de una muestra de residuo tipo ROCA en estado calcinado (ROCCA), obtenida mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)	279
Fig. 2.90 Composición química de ROCA obtenida del espectrómetro de fluorescencia de Rayos X (FRX) Philips, Magix Pro	282
Fig. 2.91 Composición química de ROCCA obtenida del espectrómetro de fluorescencia de Rayos X (FRX) Philips, Magix Pro	283
Fig. 2.92 Resultados del ensayo de consistencia método sonda de Vicat para mortero C10	289

Fig. 2.93 Densidad aparente en seco del mortero endurecido	292
Fig. 2.94 Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido	294
Fig. 2.95 Aumento de peso de las probetas de mortero endurecido por absorción de agua por capilaridad ...	295
Fig. 2.96 Relación entre el volumen aparente y la porosidad efectiva, de los diferentes morteros	297
Fig. 2.97a Resistencias mecánicas a flexión del mortero endurecido según la edad	303
Fig. 2.97b Resistencias mecánicas a flexión del mortero endurecido según la edad	304
Fig. 2.98a Resistencias mecánicas a compresión del mortero endurecido según la edad	309
Fig. 2.98b Resistencias mecánicas a compresión del mortero endurecido según la edad	310
Fig. 2.99 Espectro de absorción acústica para rangos de frecuencias de entre 50 Hz a 1600 Hz. Las líneas muestran los valores medios de cada tipo de muestra (en cada caso n=10)	311
Fig. 2.100 Espectro de absorción acústica para rangos de frecuencias de entre 500 Hz a 6400 Hz. Las líneas muestran los valores medios de cada tipo de muestra (en cada caso n=10)	312
Fig. 2.101 Velocidad media de los impulsos ultrasónicos en probetas secas/saturadas	314
Fig. 2.102 Variaciones de peso de cada probeta a través de los ciclos a las que han estado sometidas	316
Fig. 2.103 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en NaCl	317
Fig. 2.104 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en NaCl	318
Fig. 2.105 Variaciones de peso de cada probeta a través de los ciclos a las que han estado sometidas	320
Fig. 2.106 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en Na ₂ SO ₄	320
Fig. 2.107 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de recristalización en Na ₂ SO ₄	321
Fig. 2.108 Resistencia a flexión de las distintas probetas sometidas al ensayo de heladicidad	323
Fig. 2.109 Resistencia a compresión de las distintas probetas sometidas al ensayo de heladicidad	324
Fig. 2.110 Resultados de los ensayos para la determinación de la conductividad térmica probetas PP, A10, A20, A30	327
Fig. 2.111 Densidades medias de las probetas PP, A10, A20, A30	328
Fig. 2.112 (a, b y c): secuencias de microfotografías en las que se observa un fragmento de ROCA a diferentes aumentos reaccionando con la pasta	331
Figura 2.113 (a, b y c): microfotografías tomadas a diferentes aumentos para mostrar el proceso de reacción de los residuos con la pasta, así como el desarrollo de productos de reacción neoformados	331
Fig. 2.114 (a y b): microfotografías que muestran el desarrollo de fases minerales secundarias como productos de reacción hidráulica en la interfase árido-pasta	332
Fig. 2.115 (a, b y c): microfotografías con diferentes aumentos mostrando el desarrollo de especies mineralógicas cristalinas de portlandita y etringita en un mortero sin residuos orgánicos	333

Fig. 2.116 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 10%	334
Fig. 2.117 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural (A) ha sido sustituido por residuo orgánico (R) en un 20%	335
Fig. 2.118 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural (A) ha sido sustituido por residuo orgánico (R) en un 30%	335
Fig. 2.119 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en un 10%	336
Fig. 2.120 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en un 20%	337
Fig. 2.121 (a, b y c): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en un 20%	338
Fig. 2.122 (a y b): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en un 30%	339
Fig. 2.123 Polarización de la luz con polarizador y analizador (nícoles)	340
Fig. 2.124 Microscopio petrográfico de luz polarizada Kyowa modelo KLP-2N	342
Fig. 2.125 Sección de un microscopio polarizante de investigación y esquema de la trayectoria de la luz	342
Fig. 2.126 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero normalizado formado por cemento CEM I 42,5 R y árido normalizado CEN. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, Ps: Pasta, Pt: portlandita	343
Fig. 2.127 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 10%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos	345
Fig. 2.128 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 20%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos	346
Fig. 2.129 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el árido natural ha sido sustituido por residuo orgánico en proporción del 30%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nícoles paralelos y a-d con nícoles cruzados. A: Árido natural, R: Residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita, P: Microporos en los residuos	347

Fig. 2.130 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en proporción del 10%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nicoles paralelos y a-d con nicoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita	348
--	-----

Fig. 2.131 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en proporción del 20%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nicoles paralelos y a-d con nicoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita	349
--	-----

Fig. 2.132 (a, b, c y d): secuencias de microfotografías mostrando la relación de las interfases árido-residuo-pasta a 28 días de fraguado, en un mortero donde el cemento ha sido sustituido por ceniza (R) en proporción del 30%. Las figuras a-b tomadas a 10x y figuras c-d aumentadas a 25x. a-c microfotografías tomadas mediante nicoles paralelos y a-d con nicoles cruzados. A: Árido natural, C: Ceniza de residuo orgánico, Ps: Pasta, Pt: portlandita	350
--	-----

CAPÍTULO 3. LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ROCA COMO AGREGADOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES

Fig. 3.1 Almacenamiento de la mezcla de áridos en sacos de polipropileno	355
Mapa conceptual 1. MORTEROS. Caracterización de los componentes	357
Mapa conceptual 2. MORTEROS. Desarrollo experimental	358
Fig. 3.2 Preparación de las porciones de ensayo	361
Fig. 3.3 Lavado de las porciones de ensayo	362
Fig. 3.4 Tamizado de las porciones de ensayo	363
Fig. 3.5 Pesado de las porciones de ensayo tamizadas	364
Fig. 3.6 Tamizado con tamices de ensayo. Cribado con tamices de barras. Pesado de las fracciones granulométricas	367
Fig. 3.7 Procedimiento operatorio. Determinación de la forma de las partículas	369
Fig. 3.8 Preparación de la porción de ensayo	372
Fig. 3.9 Máquina de Los Ángeles. Introducción de la muestra y vertido del árido sobre la bandeja	373
Fig. 3.10 Tamizado del material de la bandeja con un tamiz de 1,6 mm. Pesado de la parte seca retenida	373
Fig. 3.11 Preparación de las submuestras de ensayo	375
Fig. 3.12 Pesado del recipiente vacío y conteniendo la muestra	376
Fig. 3.13 Pesado y secado de la muestra hasta obtener masa constante	379
Fig. 3.14 Colocación de picnómetro y probetas en baño de agua. Pesado del picnómetro	382
Fig. 3.15 Pesado del picnómetro con la muestra de ensayo. Secado de la muestra. Pesado de la muestra	383
Fig. 3.16 Molino planetario de bolas marca RETSCH modelo PM 100. Bolas de acero en recipiente junto con la muestra. Muestra triturada	386
Fig. 3.17 Tamizado de la muestra por el tamiz de 0,063mm. Secado de la muestra. Pesado de la muestra	386
Fig. 3.18 Pesado del picnómetro con muestra más agua. Pesado del picnómetro con agua	387

Fig. 3.19 Procedimiento de reducción de la muestra con un cuarteador; a. División a $\frac{1}{2}$ de la muestra. b. División a $\frac{1}{4}$ de la muestra	391
Fig. 3.20 Preparación de las porciones de ensayo	393
Fig. 3.21 Lavado de la muestra. a) Agitado de la muestra en el cubo con agua. b) Lavado de la muestra bajo el grifo. c) Secado de la muestra	394
Fig. 3.22 Tamizado. a) Preparación de la muestra y los tamices. b) Tamizado	395
Fig. 3.23 Pesado de las porciones de ensayo tamizadas	396
Fig. 3.24 Muestra de laboratorio reducida de acuerdo con la Norma EN 932-2 obteniendo dos submuestras	399
Fig. 3.25 Llenado de probetas. a) Llenado hasta la marca con la disolución. b) Vertido de la muestra dentro de la probeta	400
Fig. 3.26 Agitación de la probeta por medio del aparato de agitación CONTROLS	400
Fig. 3.27 Proceso de lavado de las probetas cilíndricas graduadas	401
Fig. 3.28 Mediciones. a) Medición de la altura h_1 del nivel superior de la suspensión con relación a la base de la probeta cilíndrica. b) Medición de la altura del sedimento h_2	402
Fig. 3.29 Secado de las submuestras a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta obtener la masa constante	404
Fig. 3.30 Pesado. a) Pesado del recipiente vacío. b) Pesado del recipiente una vez lleno	405
Fig. 3.31 Procedimiento de determinación del contenido de agua por secado en estufa de la arena. a) Pesado de la bandeja limpia y seca. b) Extendido de la muestra de ensayo sobre la bandeja y pesado. C) Colocación de la bandeja en la estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante	408
Fig. 3.32 Lavado de la muestra sobre el tamiz de 4 mm y el tamiz de 0,063 mm para eliminar las partículas más finas	411
Fig. 3.33 Procedimiento de ensayo método del picnómetro. a) Picnómetros inmersos en baño de agua. b) Secado del exterior del picnómetro y pesado	412
Fig. 3.34 a) Esparcido de la porción de ensayo sumergida en una sola capa uniforme sobre la parte inferior de la bandeja exponiendo al árido a una corriente de aire templada. b) Llenado del picnómetro con agua, secado del exterior del picnómetro y pesado	413
Fig. 3.35 Evaluación de secado de la superficie de la muestra. a) Compactación de la muestra mediante el pisón. b) Primera comprobación de secado de la superficie. c) Última comprobación de secado de la superficie	413
Fig. 3.36 a) Secado del árido en una estufa ventilada a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que se alcance una masa constante. b) Enfriado a temperatura ambiente y pesado	414
Fig. 3.37 a) Preparación de la muestra. a) Pesado inicial de la muestra. b) Tamizado de la muestra por los tamices 0,1 y 2 mm	417
Fig. 3.38 Pesado de la carga de bolas de acero. a) Bolas de 30 mm de diámetro. b) Bolas de 18 mm de diámetro. c) Bolas de 10 mm de diámetro	418
Fig. 3.39 a) Pesado de la muestra. b) Introducción de la muestra, el agua y las bolas en el cilindro. c) Puesta en marcha del aparato de Micro-Deval	418
Fig. 3.40 a) Lavado de la muestra resultante sobre los tamices de 8, 0,2 y 0,05 mm de diámetro. b) Pesado de la muestra final una vez seca	419

Fig. 3.41 Equipo de tamices de aberturas cuadradas y de barras cilíndricas paralelas	422
Fig. 3.42 Secado de la porción de ensayo a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante	422
Fig. 3.43 a) Tamizado con los tamices de ensayo. b) Cribado con tamices de barras. C) Pesado de la muestra	423
Fig. 3.44 Preparación de la muestra de ensayo	426
Fig. 3.45 a) Tamizado de la muestra con los tamices de ensayo. b) Evaluación de la longitud L y el espesor E de cada partícula utilizando un pie de rey. C) Pesado de las partículas no cúbicas	427
Fig. 3.46 a) Lavado de cada fracción por separado, y se secan en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. b) Pesado de las fracciones una vez secas	430
Fig. 3.47 a) Introducción de cada muestra en un cilindro distinto. Se añaden (5000 ± 5) g de bolas de acero a cada cilindro y $(2,5 \pm 0,05)$ l de agua. b) Giro de los cilindros a una velocidad de (100 ± 5) r/min durante (12000 ± 10) revoluciones	430
Fig. 3.48 a) Lavado de la muestra resultante sobre el tamiz de 8 y 1,6 mm. b) Pesado de la muestra secada .	431
Fig. 3.49 a) Muestra inicial antes de ser sometida a cuarteo. b) Pesado de la muestra	434
Fig. 3.50 a) Introducción de la muestra en la máquina para el ensayo de Los Ángeles. b) Aspecto de la muestra finalizado el ensayo	435
Fig. 3.51 a) Tamizado de la muestra con un tamiz de 1,6 mm. b) Pesado de la parte retenida en el tamiz de 1,6 mm que ha sido secada a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante	435
Fig. 3.52 Secado del árido a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener la masa constante	437
Fig. 3.53 a) Pesado del recipiente vacío. b) Pesado del recipiente conteniendo la muestra	438
Fig. 3.54 a) Pesado de la bandeja vacía. b) Pesado de la bandeja conteniendo la muestra. c) Colocación de la bandeja en la estufa a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante	442
Fig. 3.55 a) Pesado de la muestra contenida en la cesta metálica. b) Pesado de la cesta metálica	446
Fig. 3.56 a) Secado de la muestra sobre uno de los paños secos. b) Pesado del árido secado superficialmente. c) Pesado del árido, después de ser secado en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ y enfriado a temperatura ambiente hasta que ha alcanzado masa constante	447
Fig. 3.57 Inmersión de la cáscara de almendra en cubo con agua para su saturación y posterior extensión de la misma sobre bandeja para su secado superficial a temperatura ambiente	451
Fig. 3.58 Hormigonera WISKEHRS modelo MK-130, con capacidad de 130 litros para el amasado	451
Fig. 3.59 Moldes utilizados. a) Moldes cilíndricos BAUER SÜDLOHN utilizados para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia a compresión de probetas; Determinación de la resistencia a tracción indirecta de probetas; Profundidad de penetración de agua bajo presión; Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. b) Moldes prismáticos BAUER SÜDLOHN utilizados para la para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia a flexión de probetas. c) Moldes cúbicos BAUER SÜDLOHN utilizados para la fabricación de probetas de hormigón empleadas en los ensayos de: Determinación de la resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial	452
Fig. 3.60 Vibrador eléctrico portátil para compactación del hormigón en probetas prismáticas	454
Fig. 3.61 a) Compactación por vibración mecánica mediante vibrador interno. b) Compactación manual mediante barra de compactar	455

Fig. 3.62 Superficie expuesta de las probetas cubierta con una arpillera húmeda inmediatamente después de la fabricación. Además, durante el periodo de permanencia de las probetas en los moldes, estos se conservaron dentro de una bolsa sellada	456
Fig. 3.63 Retirada de las probetas de los moldes. a) Probetas cilíndricas. b) Probetas prismáticas. c) Probetas cúbicas	456
Fig. 3.64 Curado de las probetas hasta inmediatamente antes del ensayo, en una cámara a $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa $\geq 95\%$	456
Fig. 3.65 Procedimiento de ensayo de asentamiento mediante el cono Abrams	461
Fig. 3.66 a) Sujeción del molde firmemente contra la bandeja base pisando en las dos piezas de pie. Llenado del molde en tres capas, de modo que cada una ocupe aproximadamente un tercio de la altura del molde una vez compactado. b) Compactado de cada capa con 25 golpes con la barra compactadora. c) Retirado del molde, medición y registro del asentamiento h, determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada	462
Fig. 3.67 Reducción de las dimensiones de las probetas (rectificación) mediante el método de pulido introduciéndolas en la devastadora	464
Fig. 3.68 Colocación de la probeta cilíndrica en la prensa hidráulica de 300 t	465
Fig. 3.69 Registro de la carga máxima indicada en kN	465
Fig. 3.70 Roturas satisfactorias en probetas cilíndricas	466
Fig. 3.71 Roturas no satisfactorias en probetas cilíndricas	466
Fig. 3.72 Roturas de probetas cilíndricas	468
Fig. 3.73 Comprobación de las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey	470
Fig. 3.74 Preparación del dispositivo de ensayo, prensa multiensayo de 20 t, para la colocación de la probeta correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores	471
Fig. 3.75 Registro de la carga máxima alcanzada	472
Fig. 3.76 Rotura de probetas a flexión	473
Fig. 3.77 Comprobación de las dimensiones de las probetas mediante la utilización de un pie de rey	474
Fig. 3.78 Colocación de la probeta centrada en la prensa situando con cuidado las bandas de apoyo a lo largo de la parte superior e inferior del plano de carga de la probeta	475
Fig. 3.79 Rotura de probetas a tracción indirecta	478
Fig. 3.80 a) Secado de probetas en estufa ventilada. b) Colocación de las probetas en el equipo de presión .	480
Fig. 3.81 a) Pesada de la cartulina de dimensiones 150x300 mm. b) Pesada de la cartulina del frente de penetración. c) Medida de la profundidad de penetración máxima	481
Fig. 3.82 Probetas para el ensayo de absorción de agua por capilaridad. Método Fagerlund	483
Fig. 3.83 a) Medición de la lámina de agua. b) Recipientes de ensayo tapados herméticamente	484
Fig. 3.84 a) Secado de las caras de la probeta. b) Pesada de la probeta de ensayo	485

Fig. 3.85 a) Probetas en el recipiente junto con el medio de congelación. b) Probetas en el arcón congelador	488
Fig. 3.86 a) Cepillado de los cubos de hormigón con cepillo de púas. b) Secado de las muestras desprendidas de las probetas	489
Fig. 3.87 Rotura de probetas a compresión	493
Fig. 3.88 a) Medición de la longitud de la probeta. b) Colocación de los palpadores electroacústicos sobre la probeta	494
Fig. 3.89 Diseño de probetas para ser sometidas al ensayo de transmisión térmica en régimen estacionario por medio del método de la caja caliente	496
Fig. 3.90 a) Componentes de la caja caliente. b) Aberturas de las que dispone la caja PHYWE Systeme GmbH & Co. KG tipo conduction 3.6.03-00. Las probetas de ensayo han sido dispuestas en las mismas y cada abertura está conectada a su vez mediante termopares con cuatro termómetros que miden la temperatura de las caras interiores y exteriores de las probetas. A su vez se utiliza otro termómetro para medir la temperatura exterior e interior de la caja	496
Fig. 3.91 Curva granulométrica de la mezcla de los áridos empleados (curva de referencia-patrón) comparada con las curvas granulométricas teóricas	499
Fig. 3.92 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 10%	499
Fig. 3.93 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 20%	500
Fig. 3.94 Comparación de curvas granulométricas, patrón y sustitución del 30%	500
Fig. 3.95 Índice de lajas	502
Fig. 3.96 Índice de lajas con diferentes porcentajes de sustitución (10, 20 y 30)	503
Fig. 3.97 Coeficiente de forma	504
Fig. 3.98 Densidades de los áridos empleados	508
Fig. 3.99 Porosidad de conjunto y absorción de agua	508
Fig. 3.100 Absorción de agua según el tiempo transcurrido	509
Fig. 3.101 % de humedad de los áridos empleados	511
Fig. 3.102 Contenido en finos (%) y Equivalente de arena (SE)	513
Fig. 3.103 Asentamiento medio de las diferentes amasadas	515
Fig. 3.104 Densidades medias en "condiciones de recepción"	518
Fig. 3.105 Carga de rotura a compresión (a 28 días)	520
Fig. 3.106 Tensión media de rotura a compresión (a 28 días)	520
Fig. 3.107 (a, b, c, d y e): Secuencias de microfotografías mostrando el proceso de reacción hidráulica entre los componentes del hormigón, tomadas a diferentes aumentos	522
Fig. 3.108 Resistencias mecánicas a compresión del hormigón a 7, 21, 28 y 90 días	523
Fig. 3.109 Carga de rotura a flexión (a 28 días)	525

Fig. 3.110 Tensión de rotura a flexión (a 28 días)	525
Fig. 3.111 Carga de rotura a tracción indirecta (a 28 días)	528
Fig. 3.112 Tensión media de rotura a tracción indirecta (a 28 días)	528
Fig. 3.113 Profundidad media y máxima de penetración de agua bajo presión	531
Fig. 3.114 Incremento medio de masa, por absorción capilar (g/cm ²)	533
Fig. 3.115 Coeficiente de absorción capilar	534
Fig. 3.116 Porosidad efectiva (cm ³ /cm ³) para las distintas sustituciones	535
Fig. 3.117 Resistencia a la penetración de agua (min/cm ²)	536
Fig. 3.118 Pérdida media de masa (%), por ciclos	537
Fig. 3.119 Pérdida de masa total (%), por porcentaje de sustitución	538
Fig. 3.120 Comparación de tensiones de rotura, a 28 días y después del ensayo de ciclos hielo-deshielo	540
Fig. 3.121 Velocidad media de los impulsos ultrasónicos en relación a la tensión de rotura a compresión (a 28 días)	542
Fig. 3.122 Temperaturas obtenidas mediante el uso de la caja caliente	543
Fig. 3.123 Valores de conductividad térmica reflejados en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, epígrafe 3.4.1 Hormigones	546
Fig. 3.124 Comparación de la conductividad térmica de los hormigones con el Catálogo Técnico de Elementos Constructivos del CTE	547