UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
EDIFICACIÓN

Programa de Doctorado Innovación Tecnológica en Edificación

ESCAYOLA ADITIVADA CON RESIDUOS DE CÁSCARA DE ARROZ

Tesis Doctoral

M^a José Leiva Aguilera – Máster Oficial en Técnicas y Sistemas de Edificación
Directora: Mercedes del Río Merino - Doctora Arquitecta
Madrid, 2017

TESIS DOCTORAL

TITULO: "ESCAYOLA ADITIVADA CON RESIDUOS DE CÁSCARA DE ARROZ"

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. De la Universidad Politécnica de Madrid, el día..... de de 2017.

Presidente

D/Dª _____

Vocales

D/Dª _____

D/Dª _____

D/Dª _____

Secretario

D/Dª _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de en la Escuela Técnica Superior de Edificación, acuerda otorgarle la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mi Padre

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado durante la realización de esta Tesis, en especial:

A Mercedes del Río Merino, mi directora de Tesis, por creer en este trabajo desde el principio, por todos sus consejos, por su entusiasmo y sobre todo por su paciencia. Muchas gracias por no dejar que me rindiera.

A los miembros del tribunal de prelectura, por los consejos que han hecho mejorar este trabajo.

A todo el personal de laboratorio de la Escuela Técnica de Edificación, en especial a Emilia, Santiago y Javier.

A Evangelina Atanes de la E.T.S. de Ingeniería y Diseño Industrial, por todo su esfuerzo y su dedicación en mis ensayos.

A Xabier Arroyo de CAI de Técnicas Geológicas, por ayudarme a entender e interpretar imágenes SEM.

A Juan Caro Ramos, persona de contacto de la empresa Herba Ricemills, por su amable y constante colaboración.

A mis compañeros de doctorado César y Pablo, por sus aportaciones y comentarios a todas mis dudas y a mis compañeras Paola, Alicia y Sonia por compartir conmigo este camino, animarme y ayudarme en todo momento. En especial quiero agradecerle a Paola su apoyo incondicional.

A mis amigos, por aguantarme en este largo camino que ha sido tan complicado a veces. Gracias por estar siempre ahí.

A toda mi familia, por ayudarme en todo lo que he necesitado durante la elaboración de este trabajo, sin todos ellos, no hubiera sido posible.

A mi madre por confiar en mí y animarme todos los días.

Y por último quiero dedicar este trabajo a Jose, este proyecto no hubiera sido posible sin tu eterno apoyo y tu confianza en mí.

A mis niñas Lucía y Laura por el tiempo que no he podido dedicarles.

INDICE

RESUMEN.....	I
SUMMARY	II
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN.....	5
1.2. RESIDUOS AGRARIOS	7
1.3. PRODUCCIÓN DE ARROZ Y GENERACIÓN DE RESIDUOS.....	8
1.3.1. Características de la cáscara de arroz	12
1.3.2. Gestión actual de la cáscara de arroz.....	14
1.4. EL YESO	16
1.4.1. Proceso de fabricación del yeso.....	17
1.4.2. Características del yeso.....	19
1.4.3. Normativa	20
1.5. LOS REVESTIMIENTOS DE YESO	22
1.6. MATERIALES COMPUESTOS	23
1.6.1. Materiales compuestos con fibras.....	24
1.6.1.1. Fibras naturales.....	24
1.6.1.2. Fibras químicas: artificiales y sintéticas	28
1.6.1.3. Fibras utilizadas en construcción.....	29
1.7. CONSIDERACIONES DEL CAPITULO	30
2. ESTADO DE LA CUESTION	33
2.1. ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA ESCAYOLA	33
2.1.1. Mejora del comportamiento mecánico	33
2.1.1.1. Escayola reforzada con fibras	33
2.1.1.2. Escayola reforzada con otras adiciones	37
2.1.2. Reducción de la densidad.....	38
2.1.2.1. Oclusión de aire en masa	38
2.1.2.2. Incorporación de cargas ligeras.....	39
2.1.3. Mejoras térmico-acústicas.....	41
2.1.4. Otras mejoras.....	42
2.2. PATENTES DE ESCAYOLA-YESO	43
2.3. PRODUCTOS COMERCIALIZADOS EN LA ACTUALIDAD EN ESPAÑA	43
2.4. ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA CÁSCARA DE ARROZ	44
2.4.1. Mejora del comportamiento térmico	44
2.4.2. Mejora en el comportamiento acústico.....	45
2.4.3. Mejora del comportamiento ante la humedad.....	45
2.4.4. Mejora del comportamiento mecánico	45
2.4.5. Mejora medioambiental.....	47
2.4.6. Reducción de densidad.....	48
2.4.7. Aplicación de la cáscara como combustible.....	48

2.4.8. Aplicaciones de la cáscara en la industria	50
2.4.8.1. Obtención de silicio	50
2.4.8.2. Aplicación en cementos y hormigones	50
2.4.8.3. Otros estudios encontrados	51
2.5. CONSIDERACIONES DEL CAPÍTULO	52
3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	54
4. OBJETIVOS	56
5. METODOLOGÍA	58
5.1. ENSAYOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL RESIDUO PROCEDENTE DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ.....	58
5.1.1. Análisis granulométrico.....	59
5.1.2. Determinación del contenido de humedad de los materiales.....	59
5.1.3. Determinación de la densidad real por picnometría de helio	60
5.1.4. Determinación de la densidad de aparente de las partículas	61
5.1.5. Análisis termogravimétrico	62
5.1.6. Análisis aproximado de los residuos.....	63
5.1.7. Difracción de rayos x	63
5.1.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	64
5.2. PROBETAS DE RESIDUOS DE ARROZ Y CARGAS LIGERAS	65
5.2.1. Denominación de probetas	66
5.2.2. Caracterización de los compuestos de escayola y cargas.....	67
5.2.2.1. Ensayos del compuesto en estado fresco.....	67
5.2.2.2. Ensayos del compuesto en estado endurecido	68
5.3. ESCAYOLA CON ADICIÓN DE RESIDUOS DE ARROZ.....	69
5.3.1. Ensayos realizados en la FASE 1	72
5.3.1.1. Determinación de la capacidad de retención de agua	72
5.3.1.2. Determinación de absorción de agua por capilaridad	72
5.3.2. Ensayos realizados en la FASE 2.....	72
5.3.2.1. Determinación de la adherencia	73
5.3.2.2. Determinación de la conductividad térmica	75
5.3.2.3. Coeficiente de conductividad térmico C-Therm TCi.....	77
5.4. COMPUESTOS SELECCIONADOS: APLICACIONES	78
5.4.1. Caracterización de los compuestos.....	78
5.4.1.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	78
5.4.1.2. Determinación de la porosidad abierta y total	79
5.4.1.3. Determinación del principio de fraguado de las pastas	80
5.4.1.4. Determinación del módulo de Young estático.....	81
5.4.1.5. Determinación del módulo de Young dinámico por ultrasonidos	81
5.4.1.6. Ensayo de impacto.....	82
5.4.2. Comportamiento ante el agua y la humedad.....	82
5.4.2.1. Comportamiento a ciclos agua-estufa	82

5.4.2.2.	Determinación de la resistencia a la heladicidad	83
5.4.2.3.	Capacidad de absorción de la humedad	84
5.4.2.4.	Ensayos realizados sobre la aplicación de revestimiento	84
5.5.	ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE MATERIA PRIMA DE LOS COMPUESTOS	84
5.6.	MATERIALES Y CONFECCIÓN DE PROBETAS	84
5.6.1.	<i>Materiales</i>	84
5.6.2.	<i>Confección de probetas</i>	88
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	95
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS: CA, CT Y CE	95
6.1.1.	<i>Caracterización física</i>	95
6.1.1.1.	Análisis granulométrico	95
6.1.1.2.	Determinación de la humedad	97
6.1.1.3.	Determinación de la densidad real por picnometría de helio	97
6.1.1.4.	Densidad aparente de los residuos.....	98
6.1.2.	<i>Caracterización química y mineralógica</i>	98
6.1.2.1.	Análisis termogravimétrico	98
6.1.2.2.	Análisis aproximado de los residuos	101
6.1.2.3.	Difracción de rayos X	103
6.1.2.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	104
6.2.	ESCAYOLA CON ADICIÓN DE CARGAS LIGERAS, RESIDUOS DE ARROZ Y ESCAYOLA CON FIBRAS	111
6.2.1.	<i>Análisis de compuestos y cargas ligeras: corcho, perlita, arcilla expandida y poliestireno expandido</i>	111
6.2.1.1.	Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)	111
6.2.1.2.	Resultados: Densidad, Dureza Shore C y resistencias mecánicas.....	111
6.2.1.3.	Capacidad de retención de agua.....	113
6.2.2.	<i>Análisis de compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz CA, CT Y CE con A/E = 0,6.</i>	114
6.2.3.	<i>Escayola con adición de fibras</i>	118
6.3.	ESCAYOLA CON ADICIÓN DE RESIDUOS DE ARROZ	119
6.3.1.	<i>Resultados de los ensayos realizados en la FASE 1</i>	119
6.3.1.1.	Resultados del compuesto escayola con residuos de CA	119
6.3.1.2.	Resultados del compuesto escayola con residuos de CT.....	131
6.3.1.3.	Resultados del compuesto escayola con residuos de CE	139
6.3.1.4.	Influencia de la relación A/E	146
6.3.1.5.	Influencia del tipo y % de residuo	150
6.3.2.	<i>Resultados de los ensayos realizados en la FASE 2</i>	153
6.3.2.1.	Densidad vs Dureza Shore C.....	153
6.3.2.2.	Densidad vs Resistencia a flexotracción	153
6.3.2.3.	Densidad vs Resistencia a compresión.....	154
6.3.2.4.	Absorción de agua por capilaridad	156
6.3.2.5.	Adherencia superficial	157

6.3.2.6. Comportamiento térmico	158
6.3.3. Consideraciones sobre los compuestos.....	162
6.4. COMPUESTOS SELECCIONADOS: APLICACIONES	163
6.4.1. Caracterización de los compuestos en estado fresco	164
6.4.1.1. Consistencia de las pastas	164
6.4.1.2. Principio de fraguado	164
6.4.2. Caracterización de los compuestos en estado endurecido	165
6.4.2.1. Caracterización estructural.....	165
6.4.3. Caracterización física.....	170
6.4.3.1. Porosidad	170
6.4.3.2. Comportamiento ante el agua.....	172
6.4.4. Comportamiento mecánico	176
6.4.4.1. Dureza superficial Shore C.....	176
6.4.4.2. Ensayos mecánicos.....	176
6.4.4.3. Adherencia superficial	177
6.4.4.4. Módulo de Young	177
6.4.4.5. Comportamiento ante el impacto de un cuerpo duro.....	179
6.4.5. Conclusiones de los compuestos seleccionados	184
6.5. ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	186
7. CONCLUSIONES FINALES.....	188
8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	191
BIBLIOGRAFIA	192
BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA	192
BIBLIOGRAFÍA GENERADA.....	207
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	209
LISTADOS DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS.....	- 1 -
LISTADO DE TABLAS	- 1 -
LISTADO DE GRÁFICOS	- 3 -
LISTADO DE FIGURAS	- 5 -
LISTADO DE FOTOS	- 7 -
ANEXO 1. ANALISIS ESTADISTICO DE LAS MUESTRAS.....	- 1 -
1. ANOVA DE DENSIDAD APARENTE.....	- 1 -
2. ANOVA DUREZA SUPERFICIAL SHORE C.....	- 3 -
3. ANOVA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.....	- 5 -
4. ANOVA RESISTENCIA A COMPRESIÓN	- 7 -
5. RELACIÓN LINEAL O POLINÓMICA DE COMPUESTOS ESCAYOLA-RESIDUO	- 9 -
5.1. ANÁLISIS ESCAYOLA-CA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD	- 9 -
5.2. ANÁLISIS ESCAYOLA-CT.....	- 10 -
5.3. ANÁLISIS DE LOS COMPUESTOS CON CE	- 11 -
ANEXO 2. FICHA TÉCNICA “HEAT INSULATION HOUSE”	- 13 -

ANEXO 3. CARACTERÍSTICAS DE LA CÁSCARA DE ARROZ.....	- 14 -
---	---------------

RESUMEN

El impacto medioambiental generado por la actividad humana es un problema creciente. También es cierto que la humanidad está cada día más concienciada en el cuidado del medio ambiente, pero aún queda mucho por hacer. A pesar de la preocupación y de los protocolos y proyectos creados para reducir este impacto, todavía estamos lejos de conseguir evitarlo.

Uno de los impactos más negativos es la generación de residuos. Uno de estos residuos es la cáscara de arroz, generada en la producción de este cereal. Este residuo es muy abundante sobre todo en los países asiáticos, grandes productores y consumidores de arroz. En la Unión Europea, España es el segundo país productor de arroz y por tanto también uno de los países que generan más cantidad de residuo.

Este residuo tiene muchas aplicaciones, pero fundamentalmente se emplea como cama de animales y como combustible, originando otro residuo resultante de la combustión que es la ceniza, que a su vez se emplea en la fabricación de cementos y hormigones.

En base a lo anterior, se demuestra la viabilidad de la cáscara de arroz para ser empleada en la fabricación de materiales de construcción reduciendo el aporte de materia prima y por tanto del impacto medioambiental. Siguiendo en esta línea se plantea el objetivo fundamental de esta Tesis Doctoral, el estudio del comportamiento de un nuevo material de escayola aditivada con los residuos de arroz para valorizar este residuo y estudiar la viabilidad de un nuevo material de construcción "escayola-residuos cáscara de arroz", que reduciría el empleo de escayola, contribuyendo a la reducción del impacto medioambiental.

Para ello, se realizará un plan experimental analizando el compuesto de escayola con distintos porcentajes de residuo de cáscara de arroz, en tres formatos diferentes (Cáscara entera, cáscara triturada y ceniza de cáscara) y se realizarán ensayos físico y mecánicos para analizar por comparación su comportamiento con el material de referencia.

Se realizan también compuestos de yeso/escayola con incorporación de las cargas ligeras más utilizadas en la construcción de edificios como: Poliestireno expandido, arcilla expandida, corcho y perlita, para analizar los comportamientos según la carga adicionada y comparar los resultados con la escayola de referencia y con los compuestos realizados de escayola y residuos de arroz.

Los resultados finales muestran compuestos que presentan una densidad similar a la referencia pero que obtienen mejores resultados en resistencias mecánicas, adherencia superficial y evitan la rotura frágil. Además estos compuestos tienen un coeficiente de conductividad térmica inferior a la referencia, por lo que se podrían aplicar en prefabricados y revestimientos horizontales y verticales en interiores.

SUMMARY

The environmental impact generated by the human activity is a growing problem and needs to be tackled urgently. Currently, the humanity is increasingly aware of the environment, but much still remains to be done to protect our environment. Despite the concern and the protocols and the projects created to avoid climate change, we are still a long way from achieving great accomplishments.

Currently, large amounts of waste are generated worldwide, and in particular the rice husk, i.e. waste generated during the production of this cereal. This waste is very abundant mainly in Asian countries, which are great producers and consumers of rice. In the European Union, Spain is the second country to produce rice and therefore also a country that generates big quantities of this waste (215,000 tonnes of rice husk).

Nowadays, this waste is used for the manufacture of animals' beds or as fuel, generating another waste resulting from the combustion, i.e. rice ash, which is used in cements and concretes.

Based on the above, the rice husk can be used in the manufacture of alternative building materials to those currently commercialized. Therefore, the aim of this PhD Thesis is to analyze the behavior of a new gypsum material with the waste generated in the industry of rice production. For this, rice waste was added to the gypsum, in different percentages, in order to analyze the viability of a new construction material "gypsum-rice husk". This new material will definitely reduce the use of raw material, by replacing it with the waste, contributing to the reduction of the environmental impact.

To do this, an experimental plan was carried out analyzing several gypsum compounds with different percentages of rice husk waste. Samples were then tested and the results obtained were compared with the reference simple (gypsum without any additions).

Moreover, other gypsum compounds were also made incorporating the most frequently used lightweight loads in construction materials, such as: expanded polystyrene, expanded clay, cork and perlite. Results were then analyzed according to the % of added load and compared with the reference samples and with the samples containing rice waste.

The final results show that gypsum compounds with rice waste, increase the mechanical strength, improves surface adhesion and prevents fragile breakage, keeping similar densities to the gypsum reference. Results from the thermal conductivity test suggests the use of these compounds as thermal insulation.

Therefore, it is feasible to use the gypsum composite analyzed as a material for prefabricated constructions, prefabricated elements that require greater mechanical resistance and horizontal and vertical interior coatings.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la producción agrícola e industrial en el mundo ha generado entre otros problemas un incremento de residuos, haciendo cada vez más difícil, costoso y ambientalmente poco sostenible su tratamiento y destino final. De ahí el creciente interés en la reutilización o reciclaje de dichos residuos buscando obtener beneficios ambientales, y también económicos.

Según el Parlamento Europeo el uso que se hace y que se hizo en el pasado de los recursos se traduce en contaminación, degradación del medioambiente y agotamiento de los recursos naturales. Por tanto, si caminamos hacia una Europa eficiente esa tendencia debe cambiar, partiendo del concepto de la jerarquización de residuos (Figura 1). Esto es, la prevención como primera prioridad, reduciendo al mínimo la generación de los residuos y el uso de recursos naturales. Además se da preferencia a la reutilización y reciclaje del material, como mejor opción ecológica, que a la valorización energética de residuos.

Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos. (European Parliament, 2008)

Por otra parte, según la Directiva Marco de Residuos (DMR) 2008/98/CE (European Parliament, 2008) el residuo es *“cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”*. Los residuos pueden reutilizarse, reciclarse o ser depositados en vertederos o similar.

La Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE) define como:

- Reutilización: “cualquier operación mediante la cual productos o componentes que no sean residuos se utilizan de nuevo con la misma finalidad para la que fueron concebidos.”
- Reciclaje: “toda operación de valorización mediante la cual los 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”.
- Valorización: “cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad 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”.

El Real Decreto 1481/2001 define como **“Residuos biodegradables”** a todos los residuos que, en condiciones de vertido, pueden descomponerse de forma aerobia o anaerobia, tales como residuos de alimentos, de jardín, el papel y el cartón (Gobierno de España, 2001). En el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008- 2015, se utiliza la definición anterior pero se añaden otros muchos tipos de residuos que, con mayor o menor velocidad, también son susceptibles de degradación biológica en las condiciones de vertido como pueden ser los procedentes de la agricultura, la silvicultura, la industria agroalimentaria, la depuración de aguas residuales y otras fuentes (Gobierno de España, 2008a).

La Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables entiende por **“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. La biomasa es una fuente de energía renovable (European Parliament, 2009). Siguiendo la clasificación de sistemas de energías renovables que se definen en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020 (PANER) la biomasa de origen vegetal tiene dos orígenes, la procedente de la agricultura y la procedente de la silvicultura. Según el PANER hay dos sectores de aplicación: biocarburantes y biomasa (Gobierno de España, 2011). Los biocarburantes incluyen las instalaciones para la obtención de bioetanol y biodiesel. Mientras la biomasa incluye instalaciones de gasificación, combustión directa y co-combustión. La biomasa puede tener un origen agrícola o forestal. En la Unión Europea, y también en España, se está produciendo un resurgimiento del uso de la biomasa con fines energéticos (C. Hernández & Fuertes, 2011).

La generación de residuos no ha sido hasta el siglo XIX un problema significativo. Sin embargo, debido al crecimiento de las poblaciones y al desarrollo industrial, la generación de residuos ha ido en aumento, produciendo, entre otros, algunos residuos difíciles de eliminar y en algunos casos peligrosos que deben gestionarse de una forma especial.

En 1976, el arquitecto y economista Walter Stahel esbozó en su informe de investigación para la Comisión Europea *The Potential for Substituting Manpower for Energy* la visión de una economía en bucles (o economía circular) (Figura 2) y su impacto en la creación de empleo, competitividad económica, ahorro de recursos y prevención de residuos. Walter Stahel, acreditado por ser el inventor de la expresión «Cradle to Cradle» (de la cuna a la cuna) a finales de la década de los setenta, trabajó en el desarrollo de un enfoque de «bucle cerrado» para los procesos de producción y fundó el Product Life Institute en Ginebra (hace más de 25 años) (Stahel & Reday, 1976).

Años más tarde, el químico y visionario alemán Michael Braungart desarrolló, junto con el arquitecto estadounidense Bill McDonough, el concepto Cradle to Cradle™ y su proceso de certificación. Esta filosofía de diseño considera todos los materiales empleados en los procesos industriales y comerciales como nutrientes, de los cuales hay dos categorías principales: los técnicos y biológicos. El marco Cradle To Cradle se centra en el diseño de la eficacia en los productos con un impacto positivo y la reducción de los impactos negativos del comercio mediante la eficiencia.

El diseño Cradle to Cradle percibe los procesos seguros y productivos del «metabolismo biológico» de la naturaleza como modelo para desarrollar un flujo de «metabolismo técnico» de materiales industriales. Los componentes de los productos pueden diseñarse para su continua recuperación y reutilización como nutrientes biológicos y técnicos en esos metabolismos (MacArthur, 2013).

Figura 2. Economía circular (C. Hernández & Fuertes, 2011).

Países	Generación de residuos por sectores (x1000 toneladas)							
	Total	Agricultura, cultivos y pesca	Explotación de minas y canteras	Industria	Energía	Construcción	Otros	Residuos Municipales
EU (28 countries)	2502890	20180	704630	255210	93210	868060	353020	208580
Belgium	65573	313	62	14254	1361	26383	17554	5647
Bulgaria	179677	835	159280	:	9105	1340	3159	2683
Czech Republic	23395	135	234	4394	1012	9410	4948	3261
Denmark	20081	130	12	1281	1082	10572	3581	3424
Germany	387504	439	7432	61083	9975	206466	65222	36888
Estonia	21804	122	7905	4407	7110	671	1108	482
Ireland	15167	96	2707	:	321	1884	5166	1524
Greece	69759	11	47357	4894	10888	480	1620	4508
Spain	110518	5817	18641	14814	5272	20418	25397	20160
France	324463	1274	2346	21797	1588	227607	41477	28374
Croatia	3725	269	5	:	120	618	1065	1162
Italy	159107	333	982	26645	3195	51684	46608	29660
Cyprus	2051	20	:	:	:	635	212	414
Latvia	2621	36	5	245	727	454	445	709
Lithuania	6200	421	25	2609	101	435	1449	1162
Luxembourg	7073	3	130	286	3	5979	428	243
Hungary	16651	521	83	2699	2312	3440	4645	2951
Malta	1665	3	36	:	4	1241	202	154
Netherlands	133250	4770	132	13452	1671	90735	13966	8523
Austria	55868	128	43	5396	531	40266	5335	4170
Poland	179018	1899	75736	31592	21892	17010	22647	8240
Portugal	14587	49	278	2616	177	1513	5244	4710
Romania	175591	560	152784	:	7092	1050	3523	3823
Slovenia	4686	103	8	1315	633	815	1251	562
Slovakia	8863	574	289	:	544	1387	1723	1733
Finland	95970	4	62775	10293	1464	16297	3533	1603
Sweden	167027	655	138898	5726	1895	8867	6813	4173
United Kingdom	251037	658	26291	8167	3140	120394	64672	27715

Países	Generación de residuos por sectores (x1000 toneladas)							
	Total	Agricultura, cultivos y pesca	Explotación de minas y canteras	Industria	Energía	Construcción	Otros	Residuos Municipales
Iceland	:	:	:	:	:	:	:	:
Liechtenstein	556	0	9	11	0,3	0	2	533
Norway	11727	179	333	:	151	2694	3182	2379
Switzerland	:	:	:	:	:	:	:	:
Montenegro	1164	11	262	61	369	107	168	187
Former Yugoslav Republic of Macedonia, the	2187	84	75	1485	510	9	22,8	0
Albania	:	:	:	:	:	:	:	:
Serbia	49128	0	41505	869	4478	275	364,3	1637
Turkey	73075	:	3114	:	24014	:	373845	31230
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	:	:	:	:	:
Kosovo	1040	0	201	73	0,3	5	270,765	490

Tabla 1. Cantidad de residuos generados en cada sector en 2014 (European Commision, 2013).

Actualmente, los sectores que generan mayor volumen de residuos son la industria y la construcción, los cuales en conjunto representan el 45% de todos los residuos producidos en Europa (European Commision, 2013). Los datos recogidos en Junio de 2017 en la UE son los que se presentan en la Tabla 1.

El Programa Estatal de Prevención de Residuos 2016-2022, desarrolla la política de prevención de residuos, conforme a la normativa vigente para avanzar en el cumplimiento del objetivo de reducción de los residuos generados en 2020 en un 10 % respecto del peso de los residuos generados en 2010 (Gobierno de España, 2015). El programa estatal describe la situación actual de la prevención en España, realiza un análisis de las medidas de prevención existentes y valora la eficacia de las mismas. Este programa se configura en torno a cuatro líneas estratégicas destinadas a incidir en los elementos clave de la prevención de residuos:

- Reducción de la cantidad de residuos.
- Reutilización y alargamiento de la vida útil de los productos.
- Reducción del contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.
- Reducción de los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados.

1.1. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

Previo al movimiento verde que se desarrolla en los años 70 y que pone especial énfasis en la conservación de la energía y la eficiencia energética, no se han encontrado referencias sobre la gestión de los residuos o cualquier preocupación medioambiental. En los años 80 crece la preocupación acerca del impacto que produce la ejecución del edificio y la fabricación de los materiales de construcción sobre el medioambiente natural (Macías & Navarro, 2010).

El sector de la construcción produce contaminación, residuos y consumo de energía. El porcentaje de residuos generados en Europa según (European Commision, 2013). UE en el año 2017 (Tabla 1) fue de un 33%. La cuantificación y la composición de RCD varían significativamente de un país a otro. Estas diferencias se deben a los siguientes factores (Fischer et al., 2009; Monier et al., 2011):

- Las diferencias en la tradición constructiva de cada país.

- La mala calidad de los datos disponibles. Hay grandes variaciones en la calidad de los datos y los años de referencia.
- La falta de control y registro de los RCD generados en cada país.
- La falta de criterios específicos que permitan obtener un registro uniforme de RCD generado en cada país.
- La falta de homogeneización de las definiciones referentes a RCD.

En 2008, España produjo 47 millones de toneladas de RCD mientras que el reciclaje sólo fue del 13,60%, por lo que no se alcanzaron las metas establecidas por el Plan Nacional de Construcción y Demolición según Real Decreto 105/2008 (Gobierno de España, 2008b).

La Directiva exige a los Estados miembros adoptar medidas para garantizar un aumento del 70% en términos de tratamiento, reciclado y otras operaciones de recuperación de residuo no peligroso para el año 2020 (Morales Conde et al., 2016).

Según el informe *Producción y Gestión de RCD en España, 2011-2015* de la RCDA (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición), la valorización media realizada a los RCD fue del 39%, por lo que todavía se deben valorizar el 31% de los RCD que se producen antes del año 2020 (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017).

En cuanto a la aplicación de los residuos en el ámbito de la construcción se han encontrado sobretodo alternativas a los RCD, sin embargo la legislación que permite el uso de RCD en la producción de materiales y elementos para la construcción es limitada y restrictiva, y no ofrece recomendaciones sobre la valorización de RCD como materias primas para la fabricación de materiales reciclados. Por esta razón, uno de los principales problemas relativos a los materiales reciclados es que los fabricantes no consideran la reutilización de residuos como materias primas alternativas, así como el desconocimiento de las posibilidades de ejecución de las obras de construcción con este tipo de alternativas. (Morales Conde, et al., 2016).

Según el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), los residuos utilizables en construcción son (CEDEX, 2016):

- Fosfoyeso
- Residuos de construcción y demolición
- Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar
- Escorias de horno alto
- Estériles de carbón
- Cenizas de incineradora
- Escorias de acería LD
- Humo de sílice
- Reciclado de pavimentos asfálticos
- Reciclado de pavimentos de hormigón
- Residuos de hormigón preparado
- Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico
- Lodos de depuradoras
- Materiales de dragado
- Neumáticos fuera de uso
- Residuos plásticos

Además, existen varias experiencias piloto sobre la utilización de RCD como árido fino de hormigón para morteros y hormigones, así como proyectos de valorización de neumáticos fuera de uso (NFU), como material de construcción de rellenos en infraestructuras lineales y de rellenos de falsos túneles englobados en infraestructuras lineales (CEDEX, 2016).

Se han encontrado también algunas empresas que reutilizan plásticos para fabricar materiales de construcción (Smile Plastics, 2017) o azulejos a partir de vidrio reciclado (Azulejos Geoglass, 2017).

Por otro lado, el grupo de investigación Biomat de la UPV/EHU valoriza residuos y subproductos industriales de cara a obtener productos biodegradables/compostables con excelentes propiedades en servicio y procesables por las técnicas empleadas actualmente por la industria del plástico, cuantificando las cargas ambientales implicadas en cada uno de los procesos realizados. En relación con las etapas implicadas en la economía circular, Biomat centra sus trabajos de investigación en la mejora de los procesos de extracción, producción y tratamiento del producto tras desecho, con el objetivo de aumentar los rendimientos de estos procesos y reducir costes e impactos ambientales, permitiendo el desarrollo de materiales sostenibles y competitivos (Etxabide et al., 2016). Actualmente el grupo Biomat trabaja en un proyecto financiado por la Diputación Foral de Gipuzkoa en el que utiliza como materia prima residuos de la costa guipuzcoana (residuos de calamar, pescado, algas...) para la obtención de proteínas y polisacáridos (celulosa y quitina). El campo de aplicación de estos materiales va desde films para embalajes a hidrogeles para apósitos en medicina.

Se han encontrado trabajos e investigaciones recientes de valorización de residuos agrícolas que se resumen en el capítulo 2.4.

Sin embargo, a pesar de la búsqueda realizada el CEDEX no incorpora en el estudio residuos agrícolas para materiales de construcción, por tanto, a pesar de que hay un problema grave de residuos, el campo de aplicación de los nuevos materiales que se están investigando a partir de residuos se centra fundamentalmente en los RCD en base al hormigón. Es por todo esto por lo que se propone utilizar otro tipo de residuos como materia prima alternativa en el diseño de nuevos materiales de construcción.

1.2. RESIDUOS AGRARIOS

Según los últimos datos publicados, en el año 2014 los residuos generados por la agricultura, los cultivos y la pesca representaron un 1,6% en la Unión Europea (Figura 3).

Figura 3. Porcentaje que representan los residuos de cada sector sobre el total generado en UE-28 en el año 2014. (European Commission, 2013)

En España el porcentaje de los residuos generados en el sector de la agricultura, cultivo y pesca fue del 5% sobre el residuo total generado en el año 2014 (Figura 4).

Figura 4. Porcentaje que representan los residuos de cada sector sobre el total generado en España para el año 2014. (European Commision, 2013)

Como se observa en la Figura 5 entre los residuos generados por las cosechas agrícolas el de mayor producción corresponde a cereales de grano, seguido de los cultivos industriales (C. Hernández & Fuertes, 2011)

Figura 5. Residuos de las cosechas agrícolas (en materia seca) para los años 2005 a 2007 por grupos de cultivo (C. Hernández & Fuertes, 2011).

1.3. PRODUCCIÓN DE ARROZ Y GENERACIÓN DE RESIDUOS

La cáscara de arroz es el residuo resultante de la recolección de las cosechas de arroz y constituye aproximadamente el 18-25% de la producción de arroz (Sarchi & Eduardo, 2012).

Figura 6. Promedio de producción de arroz mundial (1994-2014) (FAOSTAT, 2017).

La cáscara de arroz es el residuo generado en la producción agrícola de granos, y su destino final es uno de los mayores problemas que tienen los países productores de arroz. Cada cuatro toneladas de arroz producidas genera una tonelada de cáscara (Behak & Peres Núñez, 2008) y por lo tanto los países asiáticos con mayores producciones de arroz como son China, India, Indonesia, Vietnam, Tailandia, Bangladesh y Myanmar (Figura 6 y Figura 7) (Tabla 2), tienen una difícil gestión en cuanto a esta gran cantidad de residuos generada.

Figura 7. Seguimiento de la producción de arroz en Asia (FAO, 2017).

Cada año se generan en el mundo más de 180 millones de toneladas de cáscara de arroz cuyo destino final es, por el momento, un problema sin solución definitiva ya que una gran proporción de esta fibra es incinerada infructuosamente o arrojada a cursos de agua, lo cual repercute negativamente en el ecosistema (Behak & Peres Núñez, 2008). Además, en la producción de arroz se emplean fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas, transformando la cáscara en un residuo altamente contaminado, por lo que la incineración no controlada de éste libera gases tóxicos que pueden provocar afecciones respiratorias.

Según las estadísticas publicadas en 2017 por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura División de Estadística (FAOSTAT, 2017) la producción mundial de arroz en el año 2014 fue de 742 millones de toneladas (496,6 millones de toneladas de arroz

elaborado), eso significa que la cantidad de cáscara generada fue de 186 millones de toneladas aproximadamente (Tabla 2).

País	Tn
China	206.507.400
India	157.200.000
Indonesia	70.846.465
Vietnam	44.974.206
Tailandia	32.620.160
Bangladesh	52.325.620
Myanmar	26.423.300
Bulgaria	54.155
España	861.103
Francia	835.300
Grecia	229.900
Hungría	7.910
Italia	1.386.100
Portugal	167.322
Rumania	45.159
UE	3.632.108

Tabla 2. Producción de arroz en 2014 (FAOSTAT, 2017).

A pesar de las malas cosechas en algunas zonas, la producción de arroz (Figura 8) sigue una tendencia de crecimiento a lo largo de los años y por tanto este incremento también genera más residuo de cáscara de arroz.

Figura 8. Producción Mundial de arroz 1994-2014 (FAOSTAT, 2017).

Además como se observa en la Figura 9 el SMA (Seguimiento del Mercado del arroz de la FAO) en un informe publicado en Abril de 2017 y a falta de los datos de los cultivos secundarios, afirma que la producción mundial de arroz en el año 2016 debería totalizar los 752 millones de toneladas, es decir 500 millones de toneladas de arroz elaborado. Estos datos provisionales confirman un aumento de la producción mundial de casi un 2% con respecto al año 2015.

Figura 9. Seguimiento del mercado del arroz de la FAO (FAO, 2017).

La producción de arroz comunitario es insignificante (menos del 1%), frente al 28% de China; 21% de India o el 9% de Indonesia. En los últimos datos recogidos de FAOSTAT que corresponden al año 2014, España fue el segundo productor de arroz después de Italia (Figura 10).

En Europa, la producción de arroz fue de 3,6 millones de toneladas de arroz en 2014, eso significa que la cantidad de cáscara generada fue de 1 millón de toneladas aproximadamente.

Figura 10. Producción de arroz en 2014 en UE (FAOSTAT, 2017).

En España el cultivo de arroz se concentra en las Comunidades Autónomas de Andalucía, Cataluña, Extremadura, Comunidad Valenciana y Aragón (Figura 12). Excepto por los problemas hídricos de Andalucía en los años 2006, 2007 y 2008 y el descenso de superficie sembrada en Aragón a causa de la sequía hidrológica en 2012, la producción de arroz en España ha ido en aumento (Figura 11). La producción de cáscara de arroz en el año 2014, según datos anuales de la FAOSTAT fue de 861.103 toneladas, lo que generó una cantidad de residuo de aproximadamente un 25% de la producción, es decir 215.275 toneladas.

Figura 11. Producción de arroz en t en España por CCAA (2002-2012) (S.G.T del MAGRAMA, 2017).

Figura 12. Producción de arroz en t en España por CCAA en 2016 (MAPAMA, 2017b)

1.3.1. Características de la cáscara de arroz

La cáscara de arroz es una fibra corta que recubre el grano para protegerlo del ambiente y que aparece en el proceso de molienda de este cultivo. La longitud de la fibra varía entre 5 y 11 mm en función de la especie considerada. Su densidad es baja, por lo que ocupa grandes volúmenes ya que su peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel (Varón Camargo, 2005). La cáscara de arroz es el subproducto obtenido directamente de la molienda y supone un 20-25% del peso de la producción total de arroz (Paredes et al., 2009).

Sus características físicas más significativas son las siguientes: peso específico 0,78 g/cm³; densidad aparente sin compactar 0,108 g/cm³; densidad aparente compactado 0,143 g/cm³ (M. S. Hernández et al., 2014). Su apariencia superficial es irregular y tiene una estructura ondulada y porosa con un 54% de cavidades que permanecerán cerradas hasta que se someta a un proceso de combustión.

En la Tabla 3 se muestran las durezas de Mohs de algunos minerales. La cáscara de arroz tiene una dureza de 6 en la escala de Mohs, por tanto es un material que tiene propiedades

altamente abrasivas, es decir, por su elevada dureza y estructura es capaz de producir por acción mecánica, un desgaste sobre materiales menos duros.

Mineral	Talco	Yeso	Calcita	Fluorita	Apatita	Ortoclasa	Cuarzo	Topacio	Corindón	Diamante
Dureza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 3. Tabla de dureza de Mohs.

Su bajo coeficiente de conductividad térmica permite suponer su utilidad como componente de sistemas de aislamiento térmico, tal y como se puede apreciar al comparar la conductividad térmica de la cascara de arroz y algunos aislantes comerciales. (Tabla 4)

Material	Conductividad Térmica " λ "(W/M*K)
Lana mineral	0.0303
Poliestireno expandido	0.0330
Cáscara de arroz	0.0360
Fibra de vidrio	0.0380
Corcho aglomerado	0.0450

Tabla 4. Conductividad térmica de algunos materiales (Cadena & Bula, 2002).

La composición química de la cáscara de arroz es celulosa, lignina y sílice cuyos porcentajes se modifican en función de la variedad que tratemos. En la Tabla 5 se muestran resultados obtenidos a partir de una variedad de arroz.

Componente	Fórmula	Composición
Celulosa: Polímero de glucosa	$C_5H_{10}O_5$	50%
Lignina: Polímero de fenol	$C_7H_{10}O_3$	30%
Sílice: componente primario de ceniza	SiO_2	20%

Tabla 5. Composición química de la cáscara de arroz (Mehta, 1989).

La cáscara de arroz no es comestible debido a su composición química ya que se encuentra constituido por fibras, celulosa, y principalmente minerales (96% por sílice, óxidos de potasio, magnesio y calcio). Debido a estas características su utilización no es aconsejable para la alimentación animal, pues su valor nutritivo es muy bajo, además el alto contenido de sílice irrita la mucosa del estómago de los animales. Tampoco es recomendable utilizarlo como abono ya que casi no posee elementos fertilizantes (Garcia & Mesias, 2016).

Uno de los usos apropiados para la cáscara de arroz es la quema e incineración de este subproducto agrícola ya que es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice (Tabla 6) y por ello tiene un buen rendimiento como combustible. La cáscara de arroz no inicia fácilmente la combustión y no produce llama mientras se quema. Es probable que este aspecto, así como su alta estabilidad bioquímica, se deba a que es la fibra vegetal con mayor contenido de minerales, así como también a su alta concentración de silicio (90 al 97% SiO). La transformación de las propiedades físico-químicas de la cáscara comienza por encima de los 750°C, lo cual le garantiza un amplio rango de estabilidad térmica (Cadena & Bula, 2002).

Componente	SiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cr	Zn
%	87,7	5,4	3,7	1,3	0,8	0,2	0,1	560ppm	603ppm

Tabla 6. Composición química de la ceniza de cáscara de arroz (Armesto et al., 2002).

La cáscara de arroz al quemarse genera 17.8 % de ceniza rica en Sílice (94.5 %), (Valverde et al., 2007; Varón Camargo, 2005). El uso de la cáscara de arroz como combustible para la construcción y el funcionamiento de hornos y hogares mecánicos, contribuye a la

preservación de los recursos naturales y constituye un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz.

La cáscara de arroz presenta una gran variedad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la cáscara son aspectos que hay que conocer.

En España este subproducto se gestiona en los molinos de arroz, situados principalmente en Andalucía, Levante y Cataluña, comunidades dedicadas a este cultivo y tiene las siguientes variedades en función de la demanda: cáscara entera, cáscara triturada y ceniza de cáscara de arroz. El excedente se elimina mediante un gestor de residuos.

La cantidad obtenida de este subproducto, en cualquiera de sus variedades, depende de la producción agrícola por año que varía según las condiciones meteorológicas. Por tanto no se pueden definir cantidades exactas de éste pero si nos basamos en la menor producción entre 2002 y 2012 el residuo mínimo obtenido ha sido de 162.500 T.

1.3.2. Gestión actual de la cáscara de arroz

Para que el arroz pueda consumirse se procesa en tres etapas: secado, descascarado y blanqueo. Estas técnicas eliminan las cáscaras o glumelas y las capas del pericarpio (Kaupp 1982).

La cáscara de arroz (CA) es una fibra que recubre al grano para protegerlo del ambiente y es el residuo del proceso de molienda de este cultivo.

Figura 13. El ciclo del arroz (Blogdelarroz, 2017).

Su longitud varía entre 5 y 11 mm según la especie considerada, es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular. Tiene propiedades altamente abrasivas y 6 en la escala Mohs en estado natural (Cadena & Bula, 2002). Su peso específico 0.78 g/cm³, la densidad aparente sin compactar es de 0.108 g/cm³ y la densidad aparente compactada 0.143 g/cm³ (González de la Cotera, 1982; Payá Bernabeu et al., 2012). Su estructura presenta un volumen poroso del 54%, cavidades que permanecerán cerradas en tanto no se someta a un proceso de combustión. En la Tabla 7 se muestra la composición química de la cáscara de arroz.

Compuesto	SiO ₂ (%)	CO ₂ (%)	AlO ₃ (%)
Superficie externa	55,25	44,77	0,00
Superficie interna	35,48	58,24	6,27

Tabla 7. Composición química de la cáscara de arroz (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006).

La cáscara de arroz posee propiedades no degradables significativas (Padhi & Patnaik, 1995). El alto contenido de silicio (cerca del 17 %) de la cáscara de arroz la convierte en un material

de muy baja degradabilidad. En trabajos prácticos se ha demostrado que muy pocos organismos vivos se nutren de ella (Cortes, 1999) y por tanto persiste y se acumula en el ambiente natural (Prada & Cortés, 2010).

En Ecuador según el MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca), el 35% de la cáscara de arroz se utiliza en la industria florícola y criaderos de animales, mientras que el resto se gestiona de la siguiente forma:

- 50% se quema dentro de piladoras.
- 15% se tira en los bordes de las carreteras.
- 15% se quema en terrenos aislados.
- 10% se quema en los bordes de las carreteras.
- 5% se tira en ríos.
- 5% se pierde a causa del viento.

La industria arrocería colombiana produce 400.000 toneladas de cáscara de arroz al año, de las cuales cerca de un 15% es aprovechado como combustible y otro tanto como elemento para esparcir en establos. El resto es incinerada infructuosamente o arrojada a cursos de agua, lo cual repercute negativamente en el ecosistema, dadas las exigentes condiciones que requiere su combustión completa y su elevada resistencia al ataque biótico, respectivamente (Sierra Aguilar, 2009).

En España se han encontrados datos de la actividad realizada con dichos residuos, que se basa principalmente en el uso de este residuo como abono orgánico, cama para ganado, para crear energía y aprovechar la ceniza para hacer ladrillos ya que es muy aislante (Universidad Politécnica de Valencia, 2017).

Además la cáscara es un residuo altamente contaminado, debiendo evitar la quema indiscriminada de éste ya que genera cantidades importantes de dióxido de carbono CO₂. Teóricamente por cada 1 kg de cáscara se obtienen 1,43 kg de dióxido de carbono, por lo que la combustión de la cáscara es un proceso que aporta cantidades importantes de este gas, razón por la que se debe evitar la quema de ésta a cielo abierto (J. L. Martín, 1938).

Los residuos de la cáscara de arroz se suelen incinerar de forma controlada con el objetivo de utilizarla como fuente energética, en calderas de secado para el propio arroz, como combustible para la producción de cemento Portland, para la generación de energía eléctrica, etc. Sin embargo según (Prada & Cortés, 2010) no es ventajoso utilizarla como fuente de energía ya que la capacidad calorífica de la cáscara es muy inferior a la de los materiales combustibles tradicionales (Tabla 8) y no es la más alta entre los materiales de deshecho (Tabla 9).

Sustancia	Alcohol	Antracita	Carbón de leña	Gas Natural	Gasóleo	Hulla	Lignito	Nafta (gasolina)	Queroseno
Capacidad calorífica Kcal/kg	6.700	8.500	7.500	11.000	10.000	8.000	4.500	11.000	10.500

Tabla 8. Capacidad Calorífica de algunas sustancias (HIRU, 2017).

Tipo de residuo	Cáscara de arroz	Bagazo	Palma Africana	Cáscara de café
Capacidad calorífica kcal/kg	3.281,6	1.823,4	3.558,5	4.245,8

Tabla 9. Capacidad Calorífica de algunos desechos vegetales (Prada & Cortés, 2010).

Por otro lado la incineración de la cáscara de arroz ocasiona un problema que es el destino final de la ceniza producida. Se estima que la constitución de la ceniza de cáscara de arroz es aproximadamente un 18% en peso de la cáscara quemada (J. L. Martín, 1938).

Se hace evidente que las cenizas, no en su mayoría, y el calor que se obtienen de la combustión de la cáscara de arroz son aprovechados y utilizados en procesos productivos y

sólo los gases no han recibido uso o aplicación (Prada & Cortés, 2010). En consecuencia estos gases se desechan a la atmósfera, generando problemas de contaminación ambiental, con las ampliamente conocidas consecuencias, aunque Armesto et al. afirma que no hay suficiente información sobre las emisiones contaminantes (Armesto, et al., 2002).

Por lo tanto en España y en el resto del mundo esta ceniza y la cáscara de arroz que por su bajo peso específico hace que el volumen sea de difícil manejo (Paredes, et al., 2009), suponen un residuo problemático que hay que gestionar.

Por todo esto se pretende valorizar el residuo generado por el cultivo del arroz y contribuir a la eliminación de este subproducto que a pesar de tener algunas aplicaciones como el uso como cama de animales, no son las más correctas ya que lo convierte en un residuo contaminado por los excrementos de los animales, además de su gran volumen debido a su poca densidad. Por otro lado, el uso de la ceniza después de utilizarla como fuente de energía está limitado por el tipo de combustión a la que ha sido sometida.

1.4. EL YESO

El yeso es uno de los materiales más antiguos empleado tanto en construcción, como en la medicina, la industria cerámica, la agricultura, la industria química y farmacéutica, la alimentación y la cosmética.

Se tiene constancia de la utilización del yeso desde el Neolítico. Hace 9.000 años, en Turquía, se encuentran frescos decorativos sobre yeso y en Jericó aparecen moldeados de yeso hace unos 6.000 años. En algunas pirámides egipcias como la de Keops, 2800 a.C. se revocaban con yeso los paramentos pétreos en tumbas y templos y se empleaba también como material de junta entre los sillares (de Villanueva Domínguez, 2004).

Se utilizaba también como revestimiento en paredes y suelos en el palacio de Knossos (Creta) entre 2200 y 1600 a.C. y el trono de Minos era de yeso (de Villanueva Domínguez, 2004).

Más adelante en la civilización griega el yeso es muy utilizado, como material de revestimiento, en estucos y guarnecidos (de Villanueva Domínguez & García Santos, 2001). En esta época Teofrasto (372-287 a.C.) se refiere al yeso y la cal con la palabra griega *gypsos*, que significa tierra más agua.

Los romanos utilizaron el yeso en aquellas zonas donde abundaba, hay referencias de yeso en la Roma clásica y en regiones como Villajoyosa. (de Villanueva Domínguez, 2004).

Donde se le dio un mayor uso al yeso fue en la Persia sasánida, heredera de las viejas tradiciones de la albañilería mesopotámica y que a través de los árabes transmitió el empleo del yeso en la España medieval. Se puede citar su empleo en los alcázares omeyas de Siria y en la ciudadela de Amman (Almagro & Arce, 1996), donde aparece un sistema de piezas prefabricadas de yeso para la construcción de arcos.

En la Península Ibérica se comienza a utilizar el yeso durante el período de la ocupación romana. Con la llegada de los musulmanes en el siglo VIII fue muy utilizado como elemento decorativo. Más tarde en los siglos XI, XII y XIII, en el periodo románico, el yeso se empleó para la elaboración de frescos en iglesias y capillas. En Europa también se utiliza el yeso en la época medieval, en revestimientos, forjados de pisos, en tabiquerías y chimeneas. Posteriormente, durante el renacimiento y el barroco además de ser empleado ampliamente en construcción en la decoración de interiores, es muy utilizado en la elaboración de esculturas.

La yasería es una de las técnicas más reconocidas de la arquitectura nazarí. En España, durante los siglos XIII al XV, se distinguen focos de gran interés, tanto en el reino musulmán nazarí de Granada, muy presente en los palacios de la Alhambra, como en la zona cristiana en Aragón, Toledo y Sevilla (de Villanueva Domínguez, 1996). La tradición medieval de las

yserías continuó durante la primera mitad del siglo XVI, con motivos decorativos renacentistas, en el denominado estilo plateresco, como sucede en el Paraninfo de la Universidad de Alcalá. También cabe destacar el *staff*, producto de yeso con fibras vegetales, muy empleado en Francia durante el Rococó para la decoración (de Villanueva Domínguez, 2004).

Junto a la ysería aparece el estuco, técnica en la que se utiliza el yeso para proporcionar superficies pulidas que imitan al mármol. También aparece la escayola en forma de planchas para utilizarla en la realización de falsos techos y en trabajos decorativos, donde es preciso reproducir molduras u otros motivos ornamentales con exactitud y precisión (de Villanueva Domínguez, 2004).

En el siglo XX y durante la Revolución Industrial se fueron desarrollando nuevos usos de este mineral industrial, siendo utilizados como material de construcción más refinado (tabiques y placas de yeso) (Sastre 07).

El yeso es un material de fácil explotación por encontrarse generalmente en la parte más superficial de la corteza terrestre, y no requiere de procesos de alto impacto ambiental, por ejemplo, el consumo energético para la obtención de cemento es de 2400 kW/h por tonelada mientras que para la fabricación de yesos es de 1200 kW/h por tonelada (de Villanueva Domínguez & García Santos, 2001).

Por todo esto se convierte en un material fácilmente explotable, no requiere grandes instalaciones, y es uno de los materiales que utilizados en construcción requiere menor consumo energético en su fabricación. Por tanto, el yeso se convierte en un producto básico en la construcción, utilizado como revestimiento o para la fabricación de elementos prefabricados.

1.4.1. Proceso de fabricación del yeso

El yeso como mineral se forma por evaporación de las sales disueltas en el agua del mar o en lagos salados que precipitan formando depósitos sedimentarios llamados evaporitas.

En estado natural el aljez, contiene 79,07% de sulfato de calcio anhidro y 20,93% de agua y es considerado una roca de origen sedimentario, de precipitación química y constituida por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio. Es incolora o blanca en estado puro, pudiendo presentar impurezas que le confieren variadas coloraciones, entre las que encontramos la arcilla, óxido de hierro, sílice, caliza, etc. (Peña Aguado & Orantes Garcia, 2009).

Según los documentos más elementales de mineralogía, el aljez es un sulfato de calcio que cristaliza con dos moléculas de agua. Es un mineral corriente, frecuente en las rocas sedimentarias donde aparece en forma de capas delgadas. Frecuentemente lo encontramos intercalado con calizas y pizarra, y generalmente se encuentra en capas bajo los depósitos de sal por ser uno de los primeros minerales que cristalizaron por la evaporación de aguas salinas. Se halla en regiones volcánicas y también aparece como ganga en algunos filones metálicos.

Se presenta en la naturaleza en distintas variedades: selenita, transparente e incolora, yeso alabastro, variedad en masa de grano fino, espato satinado, fibroso y con brillo satinado, punta de lanza, aglomerado de pequeños cristales, yeso sacaroides, espejuelo, rosa del desierto, etc. (Universidad de Málaga, 2016).

El aljez es un material muy abundante en España, en torno a un 11% de su superficie es yeso, más o menos puro, principalmente localizado en las depresiones de los ríos Ebro y Duero y la cuenca del río Guadalquivir, en las Islas Baleares muy poco, y nada en las Islas Canarias ni en la parte Oeste de la península.

Los depósitos de yesos más importantes se encuentran en Almería, Zaragoza, Madrid y Castellón. El destino de la producción es la fabricación de yesos, escayolas y de cementos. (Sastre 07).

En la naturaleza se encuentra otra variedad cristalina que es la anhidrita o karstenita, sulfato cálcico o sulfato de calcio anhidro, CaSO_4 , presentando una estructura compacta y sacaroidea, que cristaliza en el sistema ortorrómbico.

La anhidrita, muy abundante en la naturaleza, está formada por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio.

Su formación se data en las eras secundaria y terciaria. Se encuentra en los yacimientos de la misma forma que el yeso, aunque es menos abundante. Se presenta en forma de masas cristalinas con un brillo vítreo o perlado incoloro, azulado o violeta. Se distingue de la calcita por su mayor peso específico ya que absorbe agua rápidamente, ocasionando un incremento en su volumen hasta del 30% ó 50%, siendo el peso específico 2,9 y su dureza es de 2 en la escala de Mohs (Universidad de Málaga, 2016).

También se puede encontrar en estado natural la basanita, sulfato cálcico semihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, aunque raramente, por ser más inestable.

El proceso de fabricación del yeso tiene las siguientes fases:

1. Extracción: El aljez o sulfato de calcio de origen natural, se extrae de canteras a cielo abierto y de canteras subterráneas mediante voladura y perforación. Se obtienen así bloques con agua de cantera. Generalmente estos bloques se trituran mediante machacadoras de impacto, mandíbulas o conos y trituradoras de rodillos. El tamaño final obtenido dependerá del sistema de calcinación o el uso final del yeso (Blanco 2009).

2. Calcinación: El yeso natural, o sulfato cálcico dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, está compuesto por sulfato de calcio con dos moléculas de agua de hidratación, si se aumenta la temperatura en una primera fase, se elimina el agua débilmente combinada, que corresponde a molécula y media de agua, si se sigue aumentando la temperatura se logra el desprendimiento total de agua fuertemente combinada, que es media molécula de agua.

Durante el proceso se obtienen diferentes productos, que de acuerdo con las temperaturas crecientes de deshidratación, pueden ser:

- Temperatura ordinaria: aljez o piedra de yeso, o sulfato de calcio dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- 120°C - 180°C: formación de sulfato de calcio hemihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$.
- 180°C - 300°C: anhidrita soluble, CaSO_4 III (An III).
- 300°C - 700°C: anhidrita II artificial, CaSO_4 II (An II).
- ≈1000°C: anhidrita I, CaSO_4 I (An I).

La anhidrita tipo III soluble (An III), presenta gran avidez por el agua pasando rápidamente a hemihidrato. Este producto no presenta interés industrialmente.

La anhidrita tipo II artificial (An II), es insoluble y por tanto, se considera un producto prácticamente inerte. La anhidrita tipo I (An I), presenta la posibilidad de obtener un yeso hidráulico que fragua en el agua.

El hemihidrato presenta dos formas alotrópicas, hemihidrato α y hemihidrato β . El hemihidrato β se obtiene por calcinación en seco a temperaturas entre 120°C - 180°. El hemihidrato α se obtiene mediante procesos de calcinación en húmedo, bajo elevada presión o a presión atmosférica, en soluciones salinas ácidas o acuosas y a temperaturas algo más bajas.

La escayola suele estar formada por semihidratos α y β .

Se utilizan generalmente dos tipos de hornos, los que tienen contacto directo con los gases de combustión y los que no. Los más habituales son las marmitas, horno cilíndrico de fuego indirecto, de carga superior y descarga lateral inferior por encima del hogar, para la obtención de la escayola.

Los hornos rotatorios de fuego directo se utilizan para producir yeso, semihidrato β y anhidrita II.

Para obtener hemihidrato α se utilizan autoclaves, ya que se trata de un recipiente que una vez cerrado y con el aljéz en su interior, se cuece éste por inyección de vapor de agua a presión y por tanto en una atmósfera totalmente saturada.

1.4.2. Características del yeso

Por su excelente plasticidad el yeso es un material muy moldeable, se adapta fácilmente a cualquier molde obteniendo así diversas formas gracias a dos propiedades, su consistencia variable y su expansión durante el proceso de fraguado, utilizándose directamente en obras o en prefabricados.

La consistencia del yeso se puede regular durante su fabricación y también en su puesta en obra, variando la relación α/y . Esta variación de consistencia influye en la resistencia final, en la cantidad de producto a utilizar, en el tiempo de fraguado, la porosidad, la densidad y en las propiedades de habitabilidad y durabilidad. Su resistencia a agentes exteriores dependerá de la dureza superficial, la presencia de agua, la humedad y de la temperatura.

Los usos más frecuentes del yeso en la construcción son como recubrimiento, enlucido y material para la fabricación de paneles. En cualquiera de sus usos presenta dos problemas fundamentales: su baja resistencia a agentes exteriores y su corto tiempo de fraguado (Ochoa et al., 2013).

Para mejorar la durabilidad del yeso se emplean resinas epoxídicas, polímeros, cementos, escorias y otros productos resistentes al agua (Camarini & De Milito, 2011; Çolak, 2001). En cuanto al tiempo de fraguado, la consistencia y disminuir su retracción para se puede modificar utilizando retardantes, polímeros solubles en agua, agentes aireantes y superplastificantes mejoran la consistencia de la pasta (>150 mm) y el tiempo de fraguado (Çolak, 2001, 2006; Chindaprasirt et al., 2011).

El aislamiento térmico en el yeso se mejora obteniendo productos ligeros que pueden llegar a obtener valores que suponen un alto poder de aislamiento térmico, las burbujas de aire en el yeso de construcción buscan mejorar las prestaciones como aislamiento térmico aunque se disminuyen las resistencias mecánicas (García Santos, 2009), en yesos más densos se obtienen productos equiparables a otros materiales de construcción (Ochoa, et al., 2013).

El yeso es un material con capacidad de regulación higrotérmica, es decir, toma y cede humedad del ambiente actuando como "amortiguador" de la variación higrotérmica del ambiente. En cuanto al fuego, el yeso tiene un buen comportamiento, es un material incombustible, mal conductor del calor y no produce humos ni gases tóxicos.

El yeso empleado en la construcción es el yeso cocido, obtenido cuando se calienta yeso natural a 120° C. En esas condiciones se produce la deshidratación parcial, por tanto necesita temperaturas de cocción bajas para la obtención del sulfato cálcico semihidrato, es decir, se podría hacer uso de energías de sustitución para la deshidratación del dihidrato, como son por ejemplo residuos industriales (madera), vegetales o agrícolas.

Además el yeso es un material muy versátil. Empleando distintas proporciones y variando la cantidad y el tipo de adiciones se pueden obtener múltiples productos finales, que tienen distintas características y por tanto diversos usos.

1.4.3. Normativa

La clasificación de los yesos según la normativa vigente puede verse en la Tabla 10:

NORMA UNE EN 13279	NORMAS UNE 102-010 y 102-011
B1 YESO DE CONSTRUCCION	YG, YG/L; YPM
C6 YESO APLICACIÓN EN CAPA FINA	YF, YF/L
A CONGLOMERANTES A BASE DE YESO	YP
A CONGLOMERANTES A BASE DE YESO	E 30, E 30/L, E 35, E 35/L
B4 YESO CONSTRUCCION ALIGERADO	YA, YPM/A
B7 YESO CONSTRUCCION ALTA DUREZA	YD, YPM/D
C6 YESO APLICACIÓN EN CAPA FINA	YE/T

Tabla 10. Denominación de yesos según la norma europea UNE EN 13279-1 con referencia a la normativa anterior. (AENOR, 2009c)

A continuación se describen los usos y propiedades de los distintos tipos de yesos contemplados por la norma (AENOR, 2009a):

Yesos de construcción (A): son yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción: Escayolas E-30, E-30/L, E-35, E-35/L, y yeso de prefabricados YP.

Según el derogado Pliego RY-85 (Pliego de recepción de yesos y escayolas en obras de construcción) clasifica los tipos de yeso en:

- ESCAYOLA E 30: Conglomerante a base de yeso constituido fundamentalmente por sulfato de calcio semihidrato, de origen natural, que pueden llevar incorporados aditivos reguladores de fraguado y que se utiliza fundamentalmente en la ejecución de elementos prefabricados para techos y tabiques. Está caracterizada por los valores de pureza, granulometría y resistencia a flexión que se indican en la Tabla 11.

Su tiempo de inicio de fraguado será definido por el fabricante.

- ESCAYOLA E 30 LENTA E: Se puede considerar un subtipo del mismo, aquella E 35 que tenga un tiempo de inicio de fraguado superior a las especificaciones internas del fabricante y que se denomina E 35/L.

- ESCAYOLA E 35: Conglomerante a base de yeso constituido fundamentalmente por sulfato de calcio semihidrato, de origen natural, que pueden llevar incorporados aditivos reguladores de fraguado y que se utiliza fundamentalmente en trabajos de decoración, en la ejecución de elementos prefabricados para techos y en la puesta en obra de éstos elementos.. Está caracterizada por los valores de pureza, granulometría y resistencia a flexión que se indican en la Tabla 11.

- ESCAYOLA E 35 LENTA E: Se puede considerar un subtipo del mismo, aquella E 35 que tenga un tiempo de inicio de fraguado superior a las especificaciones internas del fabricante y que se denomina E 35/L.

- YESO DE PREFABRICADOS YP: Es un conglomerante a base de yeso, con un contenido en cal inferior al 5 % que puede llevar aditivos y/o agregados, caracterizado por los valores de pureza, granulometría y resistencia a flexión. Su utilización suele ser la ejecución de elementos prefabricados para tabiques y se aplica de forma manual.

ENSAYO	VALOR DE REFERENCIA
Relación agua/yeso	Dato del fabricante
Tiempo inicio y final de fraguado	Dato del fabricante
Agua combinada	YP≤6,2% Escayolas≤7%
Finura de molido	Retención en el tamiz 200μ
	E30 y E30L≤5%
	E35 y E35L≤1%
	YP≤30%
	Retención en tamiz 800μ 0% para todos los tipos
Dureza en probeta	≥65 unidades Shore C
pH	Dato del fabricante y siempre ≥6
Resistencia térmica	Dato del fabricante
Resistencia mecánica a flexión (N/mm ²)	E30 y E30L≥3
	E35 y E35L≥3,5
	YP≥3
Contenido en CaSO ₄	E30 y E30L≥83%
	E35 y E35L≥85%
	YP≥75%
Índice de pureza	E30 y E30L≥90%
	E35 y E35L≥92%
	YP≥85%
Peso en productos ensacados	Nominal ±5% en kg

Tabla 11. Valoración de los resultados de los ensayos (AENOR, 2009b).

Yesos de construcción (B): Incluye todos los tipos de yesos para la construcción, morteros de yeso y morteros de yeso y cal.

- *Yeso de construcción (B1)*: Conglomerante de yeso cuyo componente principal es el sulfato de calcio (50% mínimo), contiene además hidróxido de calcio (cal Ca(OH)₂ menor del 5%) y puede contener aditivos y agregados. Los aditivos son productos tales como cargas, fibras, pigmentos, cal (<5%), retardadores, aireantes, retenedores de agua y espesantes o plastificantes que se añaden al yeso para mejorar u obtener propiedades específicas. Los agregados son productos naturales, sintéticos o reciclados adecuados para utilizar en construcción: áridos ligeros (perlita y vermiculita) y áridos (arena silíceo o arena de río machacada).
- *Mortero de yeso (B2)*: Contiene sulfato de calcio como componente principal (<50%), contiene además cal (<5%), y puede contener aditivos y agregados.
- *Mortero de yeso y cal (B3)*: el contenido principal es sulfato de calcio en más o menos del 50% y cal (>5%). Puede contener aditivos y agregados.
- *Yeso de construcción aligerado (B4)*: Son B1, B2 y B3 que llevan incorporados agregados ligeros inorgánicos (perlita expandida o vermiculita) o agregados ligeros orgánicos. Puede contener aditivos y agregados.
- *Mortero aligerado de yeso (B5)*: El mismo contenido que tipo B2 y además lleva incorporados agregados ligeros inorgánicos (perlita expandida o vermiculita) o agregados ligeros orgánicos. Puede contener aditivos y agregados.
- *Mortero aligerado de yeso y cal (B6)*: Es el tipo B3 que además lleva incorporados agregados ligeros inorgánicos (perlita expandida o vermiculita) o agregados ligeros orgánicos. Puede contener aditivos y agregados.
- *Yeso de construcción de alta dureza (B7)*: Se fabrica para realizar revestimientos que requieren mayor dureza superficial.

Yeso para aplicaciones especiales (C):

- *Yeso fibroso (C1)*: yeso para staff. Para elementos prefabricados de yeso fibroso.
- *Yeso para morteros de agarre (C2)*: Para tabicar muros no portantes, tabiques y techos.
- *Yeso acústico (C3)*: Para trabajos en los que se requiere una mayor absorción acústica.

- *Yeso aislante térmico (C4)*: Para trabajos en los se requieren propiedades aislantes térmicas.
- *Yeso para protección frente al fuego (C5)*: Para utilización en situaciones de exposición al fuego.
- *Yeso para capa fina (C6)*: Para su aplicación en capa fina (espesores 3-6mm).

Otros:

- *Yeso de aplicación manual*: Aplicación manual amasado con agua.
- *Yeso de proyección mecánica*: Se mezclan con agua para obtener una consistencia adecuada para su proyección con máquina.
- *Sistema de yeso monocapa*: Para aplicar en una sola capa y comportarse como un guarnecido y un enlucido.
- *Sistema de yeso multicapa*: Para aplicar al menos en dos capas.
- *Guarnecido de yeso*: Capa de yeso sobre la que se aplica un enlucido.
- *Enlucido de yeso*: Capa de terminación en yeso.

1.5. LOS REVESTIMIENTOS DE YESO

Antiguamente los yesos se mezclaban en obra con otros materiales para modificar la duración de su fraguado y retrasarlo, endurecer o impermeabilizar el producto y así hacerlo más duradero en su utilización en exteriores (de Villanueva, 2009).

Tradicionalmente se utilizaban como conglomerantes la cal, el yeso o la mezcla de éstos. La cal se ha utilizado para la realización de enfoscados, revocos y estucos, pero es un material difícil de trabajar por su limitada elasticidad y lento fraguado. Por otro lado, el yeso se ha utilizado para la realización de revocos y estucos, pero tienen como inconveniente principal que fraguan demasiado rápido y no dan las resistencias que dan otros materiales. Es por ello, que la utilización de ambos materiales unidos ha sido tan extendida (Barahona Rodríguez 2000).

Las técnicas tradicionales para revestir se pueden resumir en:

- Revocos de yeso, cal, cemento y mixtos tendidos o proyectados.
Donde los tipos de acabados cuando se aplican tendidos son: A la madrileña, a la catalana (liso, lavado, bruñido, picado, rasqueta y martillina entre otros) y esgrafiados, excepto en el cemento. En el caso de ser proyectados los acabados se resumen en dos: tirolesa y rasqueta.
- Estucos de yeso, cal, y mixtos tendidos, cuyos acabados son: A la madrileña y a la catalana (liso, lavado y bruñido).
- Enjalbegados, blanqueos o encalados (con pasta de yeso o de cal y lechada de cal).
- Pinturas a la cal.

Posteriormente el yeso queda relegado a su utilización en interiores a partir de la aparición del cemento. El uso del yeso en revestimientos interiores y suelos comienza en la época de los romanos y los árabes lo usaban como material estructural y de recubrimiento (Abenza Ruiz, 2009).

De los yesos proyectados en interiores podemos enumerar los siguientes tipos (Rivero Fernández, 1997):

- Yesos aligerados con perlita (0,8 g/cm³)
- Yesos ignífugos con aditivos aislantes (perlita, vermiculita, etc).
- Yesos de alta dureza (Shore C superior a 80 ud).
- Yesos adhesivos para placas de yeso de Pladur.
- Yesos-revocos, mortero hidráulico de textura granulada.

Algunas técnicas usadas para la restauración de fachadas consisten en utilizar mallas de fibra de vidrio para mejorar la adherencia y flexibilidad del yeso haciendo que se adapte mejor al soporte y así impedir la fisuración. También, aplicar hidrofugantes a las superficies de yeso para mejorar su permeabilidad (Abenza Ruiz, 2009).

Generalmente los productos de yeso se aplican en revestimientos de interiores, enlucidos, acabados y prefabricados, y las escayolas se utilizan para prefabricados y decoración. Sin embargo las resistencias que se obtienen con la escayola no se obtienen con el yeso, además, se ha observado al recabar información de los productos de yeso existentes en el mercado, que las empresas ofrecen productos de escayola para revestimientos.

En todos los casos si se requieren propiedades que el yeso no tiene, como ya hemos comentado, el mercado ofrece productos de yeso mezclados con distintos aditivos que confieren al yeso las características exigidas.

1.6. MATERIALES COMPUESTOS

Material compuesto es aquél conformado por dos o más componentes que mejoran las propiedades de éstos por separado. Estos materiales se emplean desde la antigüedad, es el caso de los adobes (arcilla y paja), los yesos reforzados con crines de caballo, los cañizos, los morteros y hormigones, los materiales laminados (contrachapados), el hormigón armado, pretensado y los fibroplásticos (plásticos y polímeros reforzados con fibras) entre otros. (Mehta, 1979).

Algunos composites están formado por un elemento que se denomina matriz, cuya densidad generalmente no es alta, y es de naturaleza polimérica y sintética. El elemento refuerzo es el que está inmerso en la matriz o firmemente adherida a ésta y que en general son fibras con resistencias a tracción muy superiores a las de la matriz (Olivares Santiago et al., 2003).

La matriz sirve para unir los componentes y en el caso concreto de las fibras las protege en la fabricación y manipulación del compuesto, además debe transferir el esfuerzo a las fibras por adherencia o fricción cuando el compuesto está sometido a cargas. Debe ser química y térmicamente compatible con las fibras (del Rio Merino, 1999).

La matriz suele ser más tenaz, pero menos resistente y dura y el refuerzo tiene mayor resistencia, mayor módulo elástico pero más fragilidad. La combinación de estos esfuerzos hace que estos materiales respondan a distintas exigencias constructivas y que por tanto tengan muchas aplicaciones (Olivares Santiago, et al., 2003).

El refuerzo generalmente actúa mejorando el comportamiento físico-mecánico de la matriz. Se mejoran el comportamiento ante impactos, las resistencias a flexotracción y fuego y se aumenta la tenacidad (del Rio Merino, 1999).

Según la matriz estos materiales se pueden clasificar en:

- Compuestos de matrices orgánicas y poliméricas: donde matriz y fibras tienen propiedades mecánicas similares.
- Compuestos de matriz frágil: donde la matriz es cemento, hormigón o yeso. En estos casos se mejoran características como fragilidad, fisuración, desconchones por impacto, baja resistencia a flexión o tracción, etc, pero el comportamiento es similar al de la matriz.

Los biocompuestos son los materiales compuestos a base de fibra natural/bio y derivados del petróleo: polímeros no biodegradables (PP, PE) o polímeros biodegradables (PLA, PHA). Los compuestos se clasifican en: compuestos verdes, tales como: biofibras-compuestos plásticos, biofibras-compuestos a base de soya y biofibras-compuestos de elastómeros naturales, compuestos híbridos y compuestos de fibras tejidas (John & Thomas, 2008).

1.6.1. Materiales compuestos con fibras

Las fibras se han utilizado desde hace siglos en la construcción, tal es el caso del tapial y el adobe que se han utilizado para construir casas y otras edificaciones en el antiguo Egipto y como refuerzo de este barro se empleaban fibras naturales como la paja (Canchig & del Rocío, 2007).

Los principales objetivos de la adición de fibras en una matriz frágil son (Oteiza, 1993):

- Incrementar sus resistencias: tracción, flexión e impacto.
- Controlar las fisuras y la fractura de elementos constructivos y además conseguir un material más dúctil que la matriz.
- Mejorar el comportamiento reológico del material en estado seco.

Las fibras pueden ser naturales y químicas. A continuación se hace un estudio de ellas según la siguiente clasificación:

Fibras naturales:

- Fibras vegetales.
- Fibras minerales.
- Fibras animales.

Fibras químicas:

- Artificiales.
- Sintéticas.

Fibras utilizadas en construcción:

- Fibra de vidrio.
- Fibra de polipropileno.
- Fibra de acero.
- Fibra de carbono.

Como en este trabajo se van a reutilizan fibras vegetales obtenidas del cultivo y producción del arroz se hace un análisis más profundo de las fibras naturales, ya que el resto de ellas no son objeto de estudio de esta tesis.

1.6.1.1. Fibras naturales

Las fibras naturales son las que nos proporciona la naturaleza directamente en forma de fibras y pueden ser de origen vegetal, animal y mineral, siendo su longitud y diámetro aptos para su transformación en hilo.

A continuación se muestra un esquema (Figura 14) donde se clasifican los tipos de fibras naturales que existen.

Figura 14. Esquema de fibras naturales (Romaniega Piñeiro, 2016).

a) Fibras vegetales

Las fibras vegetales son materiales lignocelulósicos que se encuentran fácilmente en nuestro entorno en forma de árboles, plantas y cultivos. Algunas de estas fibras vegetales utilizadas en construcción son fibras de sisal, celulosa, serrín, esparto, madera, etc.

La composición de las fibras depende del tipo de fibra y de su procedencia, pero la composición general es común a todas ellas. Las fibras naturales se componen principalmente de celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina. Según R. M. Rowell et al. (Mahlberg et al., 1998) la composición de esta fibra se encuentra dentro de los siguientes rangos; a- celulosa (58-63%), es la que confiere las buenas propiedades mecánicas a las fibras; hemicelulosa (21-24%), es la responsable de la biodegradabilidad, de la absorción de humedad y de la degradación térmica de las fibras; lignina (12-14%), es térmicamente estable pero es la responsable de la degradación por UV. Además el contenido en humedad de las fibras naturales puede llegar hasta un porcentaje del 20% en peso (F. Martí, 2015)

Las fibras naturales tienen un bajo coste y una baja densidad lo que les confiere una elevada resistencia específica o resistividad (a mayor longitud y menor área transversal del elemento, más resistencia). Son biodegradables y no presentan efectos abrasivos como las fibras de vidrio (Amigó et al., 2008).

El uso de las fibras vegetales (residuos de pulpa de eucalipto, fibras de sisal, y coco) en materiales de construcción está muy extendido a pesar del bajo rendimiento en cuanto a durabilidad que tienen las fibras. Sin embargo debido a las propiedades mecánicas de éstas cuando están inmersas en una matriz se pueden llegar a desarrollar materiales que mejoren tanto las propiedades del material como las de la fibra (Agopyan et al., 2005).

La condición de refuerzo de las fibras naturales se debe a la resistencia, su dureza, la compatibilidad con la matriz que supone una transmisión de esfuerzos adecuada y la cantidad de fibra en el compuesto final, que viene condicionada por la orientación y ordenamiento de las fibras en la matriz (Yeoh et al., 1979)

Sin embargo la producción de composites con propiedades constantes utilizando fibras naturales es de gran complejidad debido a la variabilidad de propiedades de las fibras y de los problemas de dosificación. Los inconvenientes que se encuentran en el desarrollo de **materiales compuestos** reforzados con fibras naturales son:

- Variabilidad de propiedades de las fibras de unas partidas a otras o según su procedencia
- Baja relación de forma
- Baja densidad aparente, lo que impide la buena alimentación de las mismas al proceso de compounding
- Problemas de dispersión
- Mala adhesión interfacial fibra-matriz debido a la diferente naturaleza de las fases (fibra altamente polar y matriz apolar), formación de aglomerados debido a enlaces covalentes entre fibras que impiden su separación en fibras individuales.

Estos factores limitan enormemente la transmisión de esfuerzos desde la matriz a la fibra, por lo que no se consigue una gran mejora en las propiedades mecánicas del compuesto con respecto a otros refuerzos como son la fibras de vidrio y cargas minerales (F. Martí, 2015).

Para la utilización de las fibras naturales en materiales compuestos es necesario mejorar sus propiedades, mecánicas y químicas. Por tal motivo se les puede realizar pre-tratamientos químicos que también contribuyen a mejorar su adhesión con la matriz del compuesto o biocompuesto (Barreto et al., 2011).

Las fibras vegetales tienen diferentes contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina como compuestos principales, así como otros compuestos tales como pectinas y ceras (Tabla 12) (Francucci et al., 2011). Además, las propiedades mecánicas de las fibras naturales dependen de su cristalinidad, que se ve afectada por la orientación de las microfibras de celulosa dentro de cada fibra elemental (Bhattacharya et al., 1994). Otros autores han considerado también Introducir algunos grupos reactivos y proporcionar a la fibras mayor extensibilidad mediante eliminación parcial de lignina y hemicelulosas (Xiao et al., 2001).

Fibra	Celulosa	Lignina	Hemicelulosa	Pectina	Ceras	Humedad
Yute	61,0-71,5	12,0-13,0	13,6-20,4	0,2	0,5	12,6
Lino	71,0	2,2	18,6-20,6	2,3	1,7	10,00
Cáñamo	70,2-74,4	3,7-5,7	17,9-22,4	0,9	0,8	10,8
Kenaf	31,0-39,0	15,0-19,0	21,5	-	-	-
Sisal	67,0-78,0	8,0-11,0	10,0-14,2	10,0	2,0	11,0

Tabla 12. Composición química de algunas fibras vegetales (Francucci, et al., 2011).

Se han encontrado numerosos trabajos que utilizan las fibras naturales vegetales como refuerzo. Amigó et al. (2007) analiza fibras procedentes de residuos textiles de algodón y lino con los residuos de la fabricación de cuerdas como sisal, cáñamo, fique y kenaf utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticos (Amigó, et al., 2008). Otro de sus trabajos fibras de algodón, cáñamo y sisal como refuerzo de materiales poliméricos (Amigó, et al., 2008), fibras de agave lechuguilla para reforzar el hormigón (Juárez Alvarado, 2002) y otras que incorporan **yute** (Mohanty et al., 2000; E. Rodríguez & Francucci, 2016; Stocchi et al., 2007; Vinayagamoorthy & Rajeswari, 2014), **cáñamo** (Dhakal et al., 2007; Joshi et al., 2004; Keller, 2003; Pracella et al., 2006; Vignon et al., 1996), **sisal** (Joseph et al., 1999; Luyt & Malunka, 2005), **plátano** (Ajiwe et al., 2000; Cook, 1986), **algodón** (Satyanarayana et al., 1990), **lino** (Aranberri-Askargorta et al., 2003; Zhang et al., 1996), **kenaf** (Givi et al., 2010; Zucco & Beraldo, 2008), **coco**, **bambú** (Mejía et al., 2013).

Se han encontrado también investigaciones que utilizan fibras naturales para su uso en construcción entre otras, la fibra de coco en ladrillos de adobe (Robayo et al., 2013), fibras de

rastrajo de piña sin tratamiento, en una matriz de resina poliéster no saturado de uso comercial (Singh & Rai, 2001).

Sathishkumar et al. (2013) realizan un estudio bibliográfico (Tabla 13) en el que presentan algunas propiedades físicas, como la densidad y el diámetro de las distintas fibras naturales recopiladas por los autores (Sathishkumar et al., 2013).

Propiedades físicas de varias fibras naturales		
Tipo de fibra	Densidad(g/cm³)	Diámetro (mm)
Kenaf	0.25	70-250
Cáscara de arroz	0.50	70-250
Fibra de hoja de sisal	0.76	122-135
Fibra de hoja de abacá	0.83	114-130
Fibra de cáscara de coco	0.87	117-125
Bambú	0.91,0.6-1.1	240-330
Agave	1.20	126-344
Bagazo	1.25	200-400
Plátano	1.35	60-80 50-250
Fibra de hoja de piña	1.32	53-62
	1.44	20-80
Yute	1.3-1.46	40-350
Piassava	1.45	-
Paja de trigo	1.45	-
Sisal	1.45	50-300
Algodón	1.5-1.6	-

Tabla 13. Propiedades físicas de varias fibras naturales (Sathishkumar, et al., 2013).

Las fibras pueden ser modificadas químicamente, debido principalmente a la presencia de grupos hidroxilo que pueden ser activados para introducir nuevas moléculas que forman enlaces eficaces dentro del sistema (del Aguila Montilla, 2001). Algunas investigaciones han realizado tratamientos químicos a fibras naturales como el yute, sisal y piña para mejorar el comportamiento mecánico (Mehta, 1989; Smith & Kamwanja, 1986). La mayoría han concluido que los tratamientos alcalinos pueden mejorar las propiedades superficiales (Farias & Recena, 1990).

b) Fibras minerales

Las fibras minerales son fibras de origen inorgánico generadas a partir de minerales y rocas.

Antiguamente se utilizaba la fibra de amianto en aislamientos y protecciones ignífugas, pero está fuera de uso por su carácter cancerígeno (Sugita & Shoya, 1992).

Las fibras de vidrio son las más utilizadas en cuanto a la fabricación de materiales compuestos por su variedad y su precio ya que son las más baratas. Las más utilizadas en aplicaciones estructurales son la fibra de vidrio S en estructuras que necesitan alta resistencia a tensión, módulo de elasticidad y estabilidad a temperaturas extremas y ambientes corrosivos, y la fibra de vidrio E en materiales que requieren resistencia a tensión y alta resistencia eléctrica (Idalberto Águila, 2016).

Entre las fibras minerales las fibras de vidrio son las fibras que más se utilizan como refuerzo en los prefabricados de escayola. En general, la fibra de vidrio en la actualidad, se añade en pequeñas cantidades en placas de escayola con aplicaciones en falsos techos para evitar, mediante el cosido por la fibra, que los fragmentos en que queda rota la placa, por efecto de un impacto se desprendan (del Rio Merino, 1999).

c) Fibras animales

Las fibras naturales de origen animal son las extraídas directamente de animales, generalmente de folículos pilosos de diversas especies (lana de oveja, cachemir de cabra, crin de caballo, etc), secreciones (seda, seda salvaje, tejido de araña, etc) y cueros (Sugita & Shoya, 1992).

Desde el punto de vista químico son proteínas resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos. También resisten, en unas condiciones determinadas, la acción de ciertos ácidos minerales como el ácido sulfúrico. Por el contrario, las bases o álcalis poco agresivos pueden dañar las fibras proteínicas y los álcalis fuertes como el hidróxido de sodio pueden disolverlas por completo. Los blanqueadores que contienen cloro también pueden dañarlas e incluso disolverlas si se usan sin diluir (Sánchez Henao 2003).

1.6.1.2. Fibras químicas: artificiales y sintéticas

A partir de la segunda mitad del siglo XX y el siglo XXI aparecen los productos sintéticos, es decir, los plásticos, las fibras artificiales, los cauchos sintéticos, los materiales compuestos y los adhesivos sintéticos (I Águila, 2001).

Las fibras artificiales son aquellas que se consiguen a partir de polímeros procedentes de la naturaleza. A continuación se muestra un esquema (Figura 15) donde se clasifican los tipos de fibras que existen.

Figura 15. Esquema de fibras artificiales (Romaniega Piñeiro, 2016).

La mayoría de las fibras sintéticas se fabrican a partir de derivados petroquímicos y están formados por polímeros muy largos parecidos a los plásticos en su estructura (Sánchez Henao, 2003). A continuación se muestra un esquema (Figura 16) donde se clasifican los tipos de fibras que existen.

Figura 16. Esquema de fibras artificiales (Romaniega Piñeiro, 2016).

1.6.1.3. Fibras utilizadas en construcción

Generalmente las fibras en construcción que se utilizan para refuerzo son las siguientes:

- Fibra de vidrio.
- Fibra de polipropileno.
- Fibra de acero.
- Fibra de carbono.

d) Fibra de vidrio

Por su naturaleza, características técnicas y prestaciones, la fibra de vidrio permite:

- Acondicionar y aislar acústicamente locales.
- Proteger a las personas de las agresiones acústicas.
- Seguridad frente al fuego.

Las fibras de vidrio pueden ser de cinco tipos (Romaniega Piñeiro, 2016).

- TIPO E: El más empleado. Tiene propiedades dieléctricas y representa el 90% de refuerzo en composites.
- TIPO R: Tiene muy buenas prestaciones mecánicas y por ello se utiliza en sectores de aviación, espacial y armamento.
- TIPO D: Tiene un excelente poder dieléctrico y se utiliza en radares, ventanas electromagnéticas...
- TIPO AR: Tiene un alto contenido de óxido de circonio lo que le confiere buena resistencia a los álcalis.
- TIPO C: Alta resistencia a agentes químicos.

e) Fibra de polipropileno

Las fibras de polipropileno son las obtenidas por polimerización a partir de los hidrocarburos del polipropileno. Generalmente estas fibras se mezclan con morteros y hormigones para aumentar su durabilidad y evitar su fisuración, ya que son inertes a los álcalis del cemento y a los ácidos en general y tienen alta resistencia a los rayos ultravioletas (Romaniega Piñeiro, 2016).

f) Fibra de acero

Las fibras de acero están fabricadas con alambre trefilado en frío, garantizando una alta resistencia a la tracción y ductilidad en rotura.

Se utilizan para reforzar el hormigón y el hormigón proyectado, para pavimentos y soleras industriales e incluso como refuerzo estructural.

g) Fibra de carbono

Las fibras de carbono son materiales compuestos basados en carbono con un reducido peso, excelente relación resistencia/peso, elevada capacidad de carga, excelente resistencia química, adherencia y elevada durabilidad en contacto con sustancias alcalinas.

Se utilizan como refuerzo del hormigón y el hormigón proyectado, para pavimentos y soleras industriales e incluso como refuerzo estructural.

Pese a que su precio es superior a las fibras de acero sus propiedades también lo son.

1.7. CONSIDERACIONES DEL CAPITULO

Los edificios consumen entre el 20% y el 50% de recursos naturales como madera, minerales, agua y combustibles fósiles. Además, una vez construidos, producen emisiones, residuos y consumen agua y energía. Durante su construcción se produce un impacto ambiental por la utilización de materiales que provienen de recursos naturales y el uso de grandes cantidades de energía para su fabricación, costes ecológicos que suponen la extracción de recursos minerales (canteras, minas) y la generación de residuos en su fabricación e instalación (Ramírez, 2002).

La construcción sostenible pretende conceptualmente construir edificios con un consumo racional de la energía y del agua a lo largo de su ciclo de vida, utilizar materiales no dañinos con el medio ambiente y materiales que cumplan las tres "R" (reciclar, recuperar, re-usar), minimizar residuos durante la construcción y el resto del ciclo de vida, usar de forma racional el suelo e integrar en el entorno el edificio, así como satisfacer las necesidades presentes y futuras de los usuarios / propietarios (flexible, adaptable y con calidad intrínseca) (Ramírez, 2002).

Por otro lado, los residuos procedentes de la agricultura son un problema creciente para el medioambiente, por lo tanto el uso de estos residuos representa ventajas para el medioambiente y reduce el problema de acumulación de estos.

En países grandes productores de arroz y en menor escala en España, la producción de este cereal genera una cantidad de residuo que supone un gran problema para los productores. Cada año se generan en el mundo más de 180 millones de toneladas de cáscara de arroz cuyo destino final es, por el momento, un problema sin solución definitiva.

El problema de estos residuos es que están altamente contaminados ya que contienen fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas, por lo que la incineración no controlada libera gases tóxicos que pueden provocar afecciones respiratorias. Por ello es necesario buscar otras formas de reciclaje alternativas a su incineración. Además la cáscara de arroz, como se ha comentado anteriormente es una fibra con baja degradabilidad y por lo tanto supone un problema medioambiental.

En definitiva, los residuos agroindustriales, por su volumen y los problemas derivados de su gestión final, constituyen uno de los principales objetos de investigación, dirigidos a la búsqueda de usos alternativos que permitan su valorización para la elaboración de materiales para la industria de la construcción (Gemma Rodríguez de Sensale, 2010).

Por otra parte el yeso es un material muy utilizado, de bajo costo desde el punto de vista económico y de bajo impacto medioambiental y a pesar de que en España es muy abundante, su fabricación produce un importante impacto ambiental paisajístico por las canteras.

Además, el yeso tiene muy buenas propiedades pero para competir con otros materiales de construcción debe potenciar algunas de ellas como el aislamiento térmico, la tenacidad, sus propiedades mecánicas, la durabilidad en el exterior y su reducido tiempo de fraguado.

En esta tesis se sugiere la sustitución de la materia prima escayola por el residuo de cáscara de arroz en sus tres formatos para la fabricación de compuestos que mejoren algunas de las propiedades mencionadas y conseguir así reducir la acumulación de residuo, la utilización de materia prima y por tanto colaborar en la reducción del impacto medioambiental del material de yeso así como del residuo generado en el cultivo y producción del arroz.

CAPITULO 2

ESTADO DE LA CUESTIÓN

2. ESTADO DE LA CUESTION

En este capítulo se realiza un profundo análisis bibliográfico y documental sobre las investigaciones realizadas acerca del yeso así como de los productos que se comercializan en la actualidad en España en base yeso y de las aplicaciones y usos que se le están dando a la cáscara de arroz. El capítulo se ha dividido en los siguientes apartados:

- Estudios y aplicaciones de la escayola.
- Estudios y aplicaciones de la cáscara de arroz.

2.1. ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA ESCAYOLA

En el ámbito de la construcción es una práctica habitual la fabricación de materiales con varios componentes para mejorar algunas de sus propiedades, un ejemplo es el yeso con fibras vegetales, producto denominado *staff* que fue muy empleado en Francia para la realización de elementos decorativos en el rococó.

También, antiguamente los yesos se mezclaban en obra con otros materiales para modificar la duración de su fraguado y retrasarlo, endurecer o impermeabilizar el producto y así hacerlo más duradero en su utilización en exteriores. A partir del siglo XVIII con la industrialización, se modifican los yesos en fábrica por medio de aditivos, sobretodo, retardadores de fraguado, mejorando así los resultados del producto final y consiguiendo unas características más o menos definidas (de Villanueva Domínguez, 2004).

En el siglo XX aparecen en Estados Unidos las placas de yeso laminado (yeso + celulosa) muy utilizadas en nuestros días. Después de la II Guerra Mundial se empieza a investigar en el empleo de otros aditivos en el yeso y se fabrican productos aligerados con *perlita* y *vermiculita*, que consiguen ocluir aire en su interior y por tanto mejorar el aislamiento térmico y también yesos de proyección mecánica, con aditivos modificadores del fraguado como los espesantes y retenedores de agua.

En el caso concreto de la escayola la mayoría de las investigaciones y estudios realizados se basan en:

- Mejora del comportamiento mecánico.
- Reducción de la densidad.
- Mejora del aislamiento térmico-acústico del compuesto.
- Otras mejoras.

A continuación se analizan algunas de las investigaciones más recientes encontradas tras una búsqueda bibliográfica y documental pormenorizada.

2.1.1. Mejora del comportamiento mecánico

En cuanto a la mejora del comportamiento mecánico de la escayola se han encontrado dos tipos de investigaciones, aquellas que introducen en su masa fibras y otras que utilizan aditivos. Algunas de estas adiciones son materiales reductores de agua, porque eliminar el agua es fundamental para aumentar la resistencia.

2.1.1.1. Escayola reforzada con fibras

Al introducir en la escayola fibras se genera lo que se denomina "material compuesto", ya que es un material resultado de dos o más materiales en el que la matriz, escayola, envuelve a las fibras dándoles forma y protegiéndolas.

Las fibras naturales fueron los primeros materiales utilizados para el refuerzo de una matriz, ejemplo de esto es el adobe. Posteriormente con la aparición del yeso laminado, se presentan las primeras patentes con celulosa en los años 70. Aparecen también patentes con

fibras artificiales, como la fibra de vidrio, material denominado "Glass Reinforced Gypsum – GRG" yeso reforzado con fibra de vidrio, composite que aprovecha la sinergia de una escayola de altas prestaciones, en combinación íntima con la fibra de vidrio y que ofrece una solución innovadora para elaborar decoraciones ligeras, resistentes y duraderas.

En los estudios analizados encontrados, las fibras utilizadas son las siguientes:

- Fibras naturales: sisal, esparto, celulosa, papel, serrín, cáscara de arroz.
- Fibras artificiales: vidrio E y AR, polipropileno, polietileno, polímeros sintéticos y fibras metálicas.

a) Escayola reforzada con fibras naturales

Como se ha comentado en el capítulo anterior han sido muchos los investigadores que han estudiado el refuerzo a base de incorporar fibras en los otros materiales.

Oteiza San José I. en su tesis doctoral (Oteiza, 1993) realiza un estudio sobre la escayola reforzada con diversas fibras cortas para facilitar la utilización de este material en la fabricación de elementos constructivos para viviendas de bajo coste. Para ello utiliza como matriz escayola tipo E35 y fibras de sisal obtenidas de la agave sisalana, además hace un estudio experimental previo con otras fibras y aditivos, entre ellos cenizas volantes, cáscara de arroz, serrín, fibras de papel y fibras de esparto. En su estudio incorpora **cáscara de arroz** utilizando relaciones A/E de 0,6 y adiciones de 1% y 2% de fibra sobre el peso seco de la escayola. Los resultados y conclusiones del autor sobre la incorporación de esta fibra son buena trabajabilidad, disminución de la resistencia a flexotracción en un 25% con respecto a la referencia, densidades similares a las de la escayola sin adiciones y un aumento de la resistencia a compresión en un 12% con respecto a la referencia. Por tanto concluye que esta fibra con los porcentajes empleados en su estudio no aporta mejoras significativas en relación con la escayola sin adiciones.

Con adiciones de **fibra de serrín** en un 1% y 2% sobre el peso de la escayola y con relaciones A/E de 0,8 y 0,6 sus resultados son buena trabajabilidad del compuesto con incrementos de resistencias a flexotracción de hasta un 12% y a compresión hasta un 25% y densidades similares a la escayola sin adiciones. Concluye que se logran mejoras pero que el compuesto que se obtiene sigue siendo frágil.

Al adicionar **fibras de papel** en tiras de 10 cm de ancho en agua durante 24 horas, el autor habla de la buena trabajabilidad frente a la mala distribución de las fibras en la sección de la probeta, la disminución de las resistencias a flexotracción en 27%-38% y a compresión también (tiras de 150 mm de longitud disminuyen un 15%), y en cuanto a las densidades con disminuciones de un 5% con 2% de fibra el autor comenta lo interesante de este material para elaborar elementos constructivos fácilmente manejables.

Con adiciones de **fibras de esparto** ya utilizadas tradicionalmente en la confección de cielorrasos, juntas, elementos de grandes luces y staff, el autor incorpora un 1% de fibras con longitudes entre 10 mm y 20 mm y de sus resultados se concluye que hasta un 1% la trabajabilidad es buena, que disminuye el módulo de rotura a flexión en un 12% y la resistencia a compresión aumenta en un 25%.

Por último, el autor utiliza **fibras de sisal** con un diámetro medio de 0,19 mm, y se incorporan a la matriz en un 1%, 1,5%, 2%, 2,5% y un 3% sobre el peso de la escayola. Los mejores resultados se obtienen en la resistencia a flexotracción, con incrementos del 30% cuando se incorpora un 2% de fibra de 40 mm de longitud como máximo, la resistencia a compresión no mejora, la trabajabilidad empeora con el aumento de la fibra, siendo su límite un 2,5% con una relación A/E de 0,6 y la energía de impacto que absorbe el material reforzado es 40 veces superior al de la matriz sin reforzar. Desde el punto de vista tecnológico el autor concluye que "es posible utilizar el compuesto de escayola reforzada con fibras de sisal, en la elaboración de

componentes constructivos para viviendas, dado el buen comportamiento de este material ante acciones de impacto, su mayor tenacidad a flexotracción y resistencia ante el fuego.

Haselein et al. (2002). fabrica paneles de yeso que adiciona con **partículas de madera** y paneles a los que incorpora **papel reciclado de periódico y de imprenta**. Los paneles obtienen buena resistencia mecánica, buena resistencia al fuego y requieren de herramientas comunes para su puesta en obra. El autor concluye que la inclusión de fibras produce una mejora en las propiedades de las placas de yeso en comparación con las placas fabricadas con yeso puro (Haselein et al., 2002).

También, Ochoa et al. (2012) estudia algunas propiedades físicas y mecánicas de pastas de yeso de construcción adicionadas con un aditivo de origen orgánico, producto de las **hojas de la planta Agave americana**. Los resultados del estudio muestran que, para una misma consistencia, se mejoran las resistencias mecánicas. Los tiempos de fraguado de la pasta se aumentaron lo que ayudaría a mejorar los tiempos de aplicación del yeso y a disminuir las retracciones plásticas. Las modificaciones de estas propiedades físicas no afectan considerablemente las resistencias mecánicas finales (Ochoa, et al., 2013)

Sánchez Henao añade **fibras de polipropileno y fibras de enea** a la escayola, obteniendo mejores resultados en las placas con incorporaciones de fibra de polipropileno que con las hechas con fibra de enea, que eran demasiado frágiles. También tienen mejor tenacidad y mayores durezas (Sánchez Henao, 2003).

b) Escayola reforzada con fibras artificiales

Las fibras artificiales aparecen en el mercado como opción a las desventajas mecánicas, y geométricas de las fibras naturales y para evitar las posibles impurezas que pueden contener las fibras naturales. Estas fibras artificiales pueden ser poliméricas y sintéticas.

Con respecto a las investigaciones realizadas para refuerzo del yeso merece destacarse los trabajos de:

Del Río Merino (1999) realiza un estudio en su Tesis en base a la posible combinación de una escayola aligerada y un refuerzo que debe ofrecer al compuesto trabajabilidad, poca variación de densidad y aumento de las resistencias mecánicas. Para ello incorpora a la escayola **fibras de vidrio E y AR**, aditivos superfluidificantes, fluidificantes y plastificantes. La consecuencia de su estudio es un compuesto que se define en el apartado "Escayola aligerada y reforzada" (del Río Merino, 1999).

Del Río Merino (2004) en otro estudio concluye que el mejor comportamiento del yeso/escayola con adiciones de fibra de vidrio E es el que incorpora la fibra corta de 25 mm y un 2% de fibras sobre el peso del conglomerante, ya que se obtienen incrementos importantes de resistencia a flexión (50%) y buena trabajabilidad (Mercedes del Río Merino et al., 2004).

Otros trabajos encontrados con **fibras de vidrio** en el yeso son los de Sánchez (1991) que incorpora al yeso fibra de vidrio en distintos porcentajes (Sánchez, 1991), otros incorporan fibra de vidrio y fluidificante al yeso (Alcaide, 1992) y por último se han encontrado trabajos que refuerzan el yeso con tejidos y velos de fibra de vidrio E (Baoid & Remedios, 1989).

García Santos (2004) en su Tesis Doctoral presenta un estudio de la resistencia mecánica del yeso reforzado con polímeros sintéticos en forma de fibras y dispersiones acuosas. El autor realiza un estudio experimental en el que comprueba el comportamiento conjunto de cada una de las adiciones y selecciona la fibra y la dispersión adecuadas para su estudio, así como el porcentaje correspondiente de cada una de ellas. El resultado de este estudio previo es la definición de un compuesto de yeso con un 2% de **fibras cortadas de polipropileno** (25 mm de longitud, diámetros de 6 a 10 deniers) **combinadas con dispersiones de melanina-**

formaldehído en un 0,5% (Melment F-10 o Melment L-10) y relación agua/yeso de 0,7. (García Santos, 2004b).

El profesor García obtiene una importante mejora en la resistencia mecánica, sobretudo en probetas de sección prismática y no tan significativas cuando se trata de placas. Si la incorporación de fibras es igual o superior al 2% el material obtenido cambia de la rotura frágil a la ductilidad, hay buena adherencia entre matriz y fibras, la dureza superficial aumenta y se produce un incremento muy considerable de resistencia al impacto, de un 900% de resistencia con respecto a la escayola sin aditivos. García Santos, considera que la adición combinada de fibra de polipropileno con dispersión de policondensado de melanina-formaldehído es la más idónea para reforzar el yeso, así como especialmente indicada para absorber las tensiones internas generadas por choques o impactos producidos en su superficie. La patente 2001-02532 "Placas de escayola o yeso reforzadas con adiciones binarias de fibras de polipropileno y dispersiones de melanina-formaldehído", define el material compuesto investigado por el autor.

Romaniega (2016) en su Tesis Doctoral hace un estudio sobre el refuerzo de la escayola mediante **fibras de lana mineral procedente del reciclaje de RCD**. Sus resultados mejoran el comportamiento mecánico de los compuestos con respecto a prefabricados de yeso o escayola ya comercializados. En su Tesis incorpora fibras de lana mineral, fibras de polipropileno y fibras de vidrio hasta un 10 % sobre el peso de la escayola. Las adiciones de fibra de vidrio mejoran el comportamiento a flexión de los compuestos hasta un 43%, pero obtienen disminuciones de las resistencias a compresión hasta un 13% (Romaniega Piñeiro, 2016).

En la Tabla 14 se presenta un resumen de los trabajos encontrados de yeso con adiciones de fibras. En ella se hace referencia al tipo y porcentaje de adición y las propiedades que mejoran con la incorporación de éste. Además de las aplicaciones definidas por los distintos autores.

Autor	Adición	Matriz	% de adición	Relación agua/matriz	Propiedades del compuesto obtenido	Aplicaciones
Oteiza (1993)	Sisal	Escayola E-35	1%, 1.5%, 2% y 3%		Resistencias a flexotracción mejoradas en un 30% y a compresión similares.	Componentes constructivos
Gutiérrez González (2012)	Residuo de poliuretano y fibra de polipropileno y celulosa	Yeso	RESIDUO: 50%, 100%, 200%, 300% y 400% * FIBRA: 1-3% ADITIVOS	0.46-1.70	Adición de fibra: Evita rotura frágil del yeso aligerado. Adición de fibra y aditivo: Mejoras en resistencias a flexión y a compresión. Aditivo: Incrementos de dureza y resistencias a flexión y compresión	Prefabricados Revestimientos
	Residuo de poliamida y fibra de polipropileno y celulosa	Yeso		0.43-0.50	Adición de fibra y aditivo: Buen comportamiento reológico	Prefabricados y revestimientos
Santos (2004)	Fibra de polipropileno	E-35 L	1%, 1.5%, 2%, 2.5% y 3%	0.8	Buenas resistencias a flexión, disminuciones de resistencia a compresión.	Prefabricados
Ramírez, Santos, & Neila (2010)	Polipropileno	E-30	2%, 2.5%, 3%, 3.5% y 4%	0.7, 0.8 y 0.9	Aumentos de dureza superficial. Mejoras del comportamiento físico-mecánico de la matriz.	

Autor	Adición	Matriz	% de adición	Relación agua/matriz	Propiedades del compuesto obtenido	Aplicaciones
del Río Merino & Comino Almenara (2002)	Vidrio E	E-35	0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% y 2% Longitudes 12, 25, 32 y 50mm.	0.6	Disminuye la trabajabilidad. Aumento de la resistencia a flexión.	
Romaniega Piñeiro, del Río Merino, & Pérez García (2015)	Lana mineral reciclada y fibras de vidrio recicladas	E-35	1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, 3.5%, 4%, 5%, 6%, 8% y 10%	0.6-0.8	Incrementos en dureza superficial (10%) y en resistencias a flexotracción 27% y 35%.	Prefabricados

Tabla 14. Resultados encontrados de escayola adicionada con fibras. (M del Río Merino & Comino Almenara, 2002; García Santos, 2004a; Sara Gutiérrez González, 2012; Oliver Ramírez et al., 2010; Oteiza, 1993; Romaniega Piñeiro et al., 2015)

2.1.1.2. Escayola reforzada con otras adiciones

Oteiza San José (1993) realiza un estudio en su Tesis con cenizas volantes (Oteiza, 1993). Sus resultados y conclusiones son los siguientes: al incorporar a la escayola **cenizas volantes** en un 10% y un 20% disminuye la trabajabilidad del compuesto, la resistencia a flexotracción es inferior a la escayola sin adiciones entre un 25%-54%, la resistencia a compresión también disminuye en un 10% con adiciones del 20% de cenizas sobre el peso de la escayola, por tanto el autor afirma que las cenizas volantes no mejoran las características mecánicas.

El estudio presentado por Flores Medina et al. (2016) incorpora al yeso **el residuo en polvo de grafito** generado durante su producción. El yeso fue sustituido por grafito en cinco fracciones diferentes, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 40 y 50%, en peso. El autor concluye que, el aumento progresivo de la cantidad de grafito influye en la pastas, incrementando su densidad y sus resistencias mecánicas y reduciendo su porosidad. Mejora el entrelazado del grano, densifica la interfase grafito / yeso y reduce el tamaño de grano de los cristales. Además las propiedades mecánicas aumentan hasta un 275%. También reduce la porosidad y la absorción de agua, aumentando la vida útil del compuesto. El relleno de grafito EDM (Electrical Discharge Machining) al 15%, presenta las mejores características mecánicas y por tanto el compuesto es adecuado para prefabricados de yeso (Medina et al., 2016).

Algunos de los compuestos estudiados por Medina et al. (2016) aumentan su densidad y por tanto la resistencia al reducir el agua de amasado, excepto las que incorporan aireantes. El autor comenta que sólo la escoria de alto horno, el polvo de humo del alto horno y los Nanotubos presentaron una mejora en la resistencia a la compresión. Se presenta a continuación Tabla 15 resumen de compuestos de yeso adicionados con distintos materiales en la que se relaciona la densidad del compuesto con la resistencia a compresión (Medina, et al., 2016).

Autor	Adición/Aditivo	Wt%	A/G%	Densidad (kg/m ³)	Resistencia compresión MPa
Arikan & Sobolev (2002)	Aditivo retardante	0.5-0.15	0.45	1.86-1.92	8.2-11.3
	Polímero soluble en agua	0.10-0.20	0.45	1.80-1.69	7.4-14.7
	Air-entraining admixture	0.013-0.033	0.45	1.68-1.40	7.2-4.8
	Superplastificante	0.025-0.15	0.45	1.65-1.62	6.5-5.7
Khalil et al. (2014)	Cáscara de arroz	0-0.03	-	1.16-1.12	14.5-7.2
	Escoria de alto horno	0-0.1	-	1.15-1.07	14.5-19.5
	Carbonato de calcio	0-0.1	-	1.15-1.12	14.5-12.4
	PVA polímero	0-0.5	-	1.15-1.10	14.5-16.2
Khalil et al. (2013)	Humo de sílice	0-0.1	-	1.15-1.03	15.00-11.00
	Gel de sílice	0-0.1	-	1.15-0.95	15.00-8.00
Yakovlev et al. (2015)	Óxido de hierro	0-3.00	0.5	-	11.2-3.8

Autor	Adición/Aditivo	Wt%	A/G%	Densidad (kg/m³)	Resistencia compresión MPa
Yakovlev et al. (2014)	Polvo de chimenea de alto horno	0.1–0.6	0.6	-	10.4–13.3
	Nanotube	0.0–0.01	0.6	-	10.7–14.8
Vimmrova et al. (2011)	Cal y metacaolín	0.07–0.22/0–0.16	0.75–0.8	0.93–1.171	4.99–16.11
Genciz (2009)	Cenizas volantes + cal hidratada	0–0.58	0.6	-	0.28–0.45
	Escoria de alto horno + cal hidratada	0–0.58	0.6	-	0.28–3.15
Kuryatnyk et al. (2010)	Clinker de sulfato de calcio	0–0.70	0.85	-	17–32
Singh & Middendorf (2007)	Cemento Portland + retardador orgánico	-	-	1.10–1.54	13.30–35.00
Gutiérrez-González et al. (2012)	Residuos de espuma de poliuretano	0–4.00	0.40–1.70	1.477–0.516	15.64–0.15
	Residuos de polvo de poliamida	0–4.00	0.4–0.5	1.477–0.751	15.64–1.47
Vimmrova et al. (2011)	Perlita expandida + microsilica	0–0.15	-	0.28–0.425	0.31–0.78
	Perlita expandida + carbonato de calcio	0–0.5	-	0.28–0.39	0.31–0.57
	Perlita expandida + CEM I 42,5	0–0.1	-	0.28–0.335	0.31–0.38
Başpınar & Kahraman (2011)	Gránulos de sílice macroporosos expandidos	0–15	0.5	1.31–0.89	3.21–2.38
Gencel et al. (2014)	Vermiculita	0–0.20	0.65	0.95–0.89	3.56–1.98
Borreguero et al. (2014)	Microcápsulas de PCM (77,2 lm)	0–15	0.45	1.28–1.10	13.00–5.00

Tabla 15. Resumen de densidad y resistencia a la compresión de otros compuestos de yeso obtenidos por otros investigadores con otras adiciones. (Arikan & Sobolev, 2002; Başpınar & Kahraman, 2011; Borreguero et al., 2014; Gencel et al., 2014; Genciz, 2009; S Gutiérrez González et al., 2012; Gutiérrez Gonzalez et al., 2012; Khalil et al., 2013, 2014; Kuryatnyk et al., 2010; Medina, et al., 2016; Singh & Middendorf, 2007; Vimmrova et al., 2011; Yakovlev et al., 2014; Yakovlev et al., 2015).

2.1.2. Reducción de la densidad

Para reducir la densidad en el yeso los investigadores han recurrido, entre otros métodos, a aumentar la proporción de agua o a incorporar áridos ligeros como vermiculita, perlita o EPS. También se incorpora al yeso aire para aumentar su porosidad. Los métodos comúnmente utilizados son la formación de burbujas de gas mediante aditivos químicos y otra es la formación de aire en la pasta de yeso húmedo mediante el batido de la masa y la incorporación de aditivos que reducen las tensiones interiores en la superficie del yeso.

Por ello se presentan distintas investigaciones sobre:

- La oclusión de aire en la masa.
- La incorporación de cargas ligeras

2.1.2.1. Oclusión de aire en masa

Del Río Merino, en su Tesis Doctoral, consigue reducir la densidad del yeso (del Río Merino, 1999):

1. Aumentando la relación A/E, concluyendo que con una **relación A/E=2**, disminuye el peso de la muestra un 50% con respecto a la referencia, pero como consecuencia las resistencias mecánicas bajan, un 80% en el caso de la resistencia a flexión, y un 85% en resistencia a compresión. La dureza Shore C también disminuye.
2. Mediante la adición de **aireantes** como el aireante-plastificante Sikamor G que incorpora en proporciones 0,5% y 1%, no influyendo en el peso, pero sí en la mejora de la trabajabilidad y el aumento de la dureza.

3. Añadiendo un **espumante** lo que genera la oclusión de pequeñas burbujas de aire distribuidas en toda la matriz homogéneamente, se consigue así una estructura alveolar que disminuye el peso y en consecuencia mejora su puesta en obra y el aislamiento térmico. El efecto negativo de este tipo de aditivos es la disminución de la resistencia mecánica. Utiliza dos tipos de espumantes de la casa Bettor, uno de base resina SKW2 que no da buenos resultados porque no reduce el peso de forma significativa, además de reducir bastante la resistencia mecánica, el otro espumante es de base proteína Espumogen, con el que se consiguen reducciones de peso del 40% con adiciones del 2% de espumante, pero las reducciones de resistencia mecánica también son muy importantes.

2.1.2.2. Incorporación de cargas ligeras

Se consideran agregados ligeros a los agregados cuya densidad aparente es inferior a 800kg/cm^3 (AENOR, 2009c) y pueden ser naturales o artificiales:

- Naturales, inorgánicos, no elaborados: Son rocas desintegradas por fenómenos erosivos. Son puzolanas, travertinos, piedra pómez, escorias, tobas volcánicas, diatomitas, lapilli, conchas machacadas.
- Naturales, inorgánicos, elaborados: Son áridos obtenidos a través de un proceso industrial de incineración o evaporación del agua de cristalización. Son arcillas expandidas, vermiculita, perlita expandida, diatomita expandida, pizarra expandida, obsidiana expandida, arcilla sinterizada, esquistos sinterizados.
- Naturales orgánicos, no elaborados: Se consideran los granulados de los desechos de corcho, cáscaras de cereales, virutas de madera.
- Industriales no elaborados: Son desechos de la industria reciclados. Entre ellos escoria de alto horno, cenizas volantes.
- Industriales elaborados: Escoria expandida, espuma de escoria, cenizas expandidas, cenizas sinterizadas.
- Orgánicos: Partículas de plástico, poliestireno expandido.

Las cargas más utilizadas en las investigaciones para aligerar el yeso o la escayola han sido:

- Arcilla expandida
- Perlita
- Vermiculita
- Poliestireno expandido (EPS) y residuos de EPS
- Corcho natural
- Vidrio celular

A continuación se relacionan las conclusiones de algunos de los estudios encontrados en la búsqueda bibliográfica.

Del Río Merino M. en su Tesis realiza un estudio sobre la adición en el yeso de diferentes cargas ligeras (del Río Merino, 1999):

1. Realiza muestras a las que incorpora **arcilla expandida** tipo F-3 (grano 3-8 mm y densidad aparente de 350 kg/m^3) y A-8 (grano 0-3 mm y densidad aparente de 800 kg/m^3) en porcentajes de 20% con cada uno de los tipos, 10% de cada uno de los tipos y en la misma probeta, 40% y 50% del tipo A-8 y 60% de cada uno de los tipos. Su estudio concluye que no se obtienen disminuciones de peso considerables y en el caso más favorable, la resistencia a flexión se reduce casi un 46%.
2. Otra de las cargas que se utilizan en esta tesis es la **perlita expandida** en los tipos B-6 (0-1,5 mm de diámetro y $60/70\text{ kg/m}^3$), B-10 (0-3 mm de diámetro y $105/125\text{ kg/m}^3$) y B-12 (0-5 mm de diámetro y $100/120\text{ kg/m}^3$), se incorporan en porcentajes de 10% B-6 y 20% de B-10 y B-12 sobre el peso de la escayola. Los resultados que obtiene Río Merino M. son para el caso más favorable, las probetas realizadas con perlita B-10 en un 20% sobre el peso seco de la escayola, el peso disminuye un 24% con respecto a la

referencia, también lo hace la resistencia a flexión, pero la dureza se mantiene y la resistencia a compresión aumenta.

3. En los ensayos que realiza con **Vermiculita** (E1: 0,5-2 mm y densidad 100/120 kg/m³) incorporada en un 20% sobre el peso seco de la escayola, los pesos disminuyen un 15%, la resistencia a flexión un 26,8%, a compresión un 33,8% y la dureza también disminuye. Como conclusión, este tipo de aligerante no consigue una reducción de peso considerable y reduce las resistencias mecánicas del compuesto.
4. También se incorpora al yeso perlas de **poliestireno expandido** de granulometría 4-8 mm de diámetro y densidad 35 kg/m³, incorporando un 3% sobre el peso de escayola seca, la reducción de peso es considerable, pero lo son también las pérdidas de resistencia mecánica por la falta de adherencia del granulado con la escayola.
5. En el estudio que realiza con la incorporación de **vidrio celular** concluye que se pierde resistencia mecánica en todas las series realizadas (1, 4, 10, 20, 30% de vidrio celular con respecto al peso seco de la escayola) sobre todo en resistencias a compresión. El peso se reduce en el mejor de los casos (30% de carga) en un 16% con respecto a las probetas de referencia.
6. Realiza también un estudio con **corcho** granulado y procedente de restos de poda, de granulometría comprendida entre 2,8 y 0,25 mm con densidad de 47 kg/m³, que incorpora a la escayola en un 20%. Según el tipo de carga los resultados que obtiene varían bastante. En todos los casos los compuestos de yeso-corcho tienen resistencias mecánicas inferiores a las de referencia pero una mejora de la tenacidad y reducciones de peso hasta un 44% pero con disminuciones del 63% en resistencias a flexión y similares a compresión, el material compuesto es de gran solidez y estabilidad, por la íntima unión entre el corcho el yeso o la escayola, ya que éste último cristaliza en parte dentro de las celdillas perimetrales de los granos de corcho. Destaca además la facilidad de fabricación y el mínimo costo para la fabricación de este producto, que al tener una densidad muy baja podría aplicarse en la realización de productos prefabricados de yeso/escayola, que si además requieren de una absorción acústica se conseguiría modificando la relación agua yeso/escayola. Puntualiza en la utilización del material añadiendo poca cantidad de corcho en la pasta para que este flote y sea apto para la fabricación de placas tipo "carreaux", con estructura de sándwich con núcleo de corcho aglomerado con yeso y pieles gruesas de escayola. Los resultados también se plasman en un artículo que presenta elementos prefabricados de escayola aligerada para uso en particiones y trasdosados (M del Río Merino & Comino, 2002).
7. Dentro de este apartado de escayola aligerada Del Río Merino, M., hace un estudio final con yeso o escayola aligerada con **corcho y fibras de vidrio E**, para caracterizar un composite que consiga en la medida de lo posible, ser ligero y no perder resistencia mecánica como consecuencia. De sus ensayos y resultados sobre compuestos que mezclan adiciones utilizadas para escayola reforzada y para escayola aligerada, la autora define como mejor compuesto los fabricados con desechos de corcho bornizo de invierno en un 20% con respecto al peso de la escayola (15% grano medio y 5% grano fino) y refuerzo con fibras de vidrio E de 25 mm de longitud en un 2% y superfluidificante Melment L10 en un 0,5% ó Sikament FF en un 1%. La autora concluye que según los resultados obtenidos, se puede afirmar que el yeso-corcho cumple las siguientes propiedades que caracterizan a los materiales aligerados: densidad inferior a la escayola, gran capacidad de deformación, mejora del aislamiento térmico y acústico, así como ante la absorción de impactos. Este material diseñado por la autora es la patente ES2170612A1 en la que define el compuesto con las siguientes proporciones (del Río Merino et al., 1999):
 - Yeso o escayola para prefabricados E30 o E35.
 - Desechos de corcho granulado en un 20% y 25% o 3% de perlas de EPS de diámetros 3-5 mm, al que denomina corcho artificial.
 - Fibra de vidrio E en un 2%, fluidificante en un 0,5% - 1%.

El producto que se obtiene es un material sólido y estable de baja densidad, 55 kg/m³ y 60 kg/m³ cuya aplicación inmediata sería la sustitución de prefabricados para particiones

interiores y trasdosados que ya existen en el mercado pero con un peso mayor. La patente define el diseño de los productos.

Por otra parte, Morales-Conde et al. (2016) incorpora al yeso virutas de madera y serrín procedentes de **residuos de la madera** y compara los resultados con probetas realizadas con fibras comercializadas en la actualidad. Los resultados mostraron que el aumento de la cantidad de residuos de madera reduce la densidad (38-40%) y dureza Shore C de los compuestos. También se observó que un aumento en el porcentaje de residuos de madera reduce la conductividad térmica, caída más pronunciada en los compuestos que contienen virutas de madera que en las que contienen serrín en la misma proporción. Además, las propiedades mecánicas del compuesto fueron menores que en las muestras de referencia. Una adición al 40% produjo una disminución en la flexión (61%) para muestras con serrín y 65% para muestras con virutas de madera. Respecto a la resistencia mecánica a la compresión, el compuesto con desechos de serrín al 40% vio una reducción de 71% y 78% para el compuesto con virutas de madera al 40% (Morales Conde, et al., 2016).

Se han encontrado otros trabajos que estudian aligerar la escayola con residuos como los estudios de González Madariaga (2008) que incorpora cargas procedentes del reciclaje de los **residuos de EPS** aprovechando las propiedades que mantiene la espuma antes de llegar al flujo de residuos municipales, de esta manera recuperando los EPS colabora en la mejora medioambiental. A través de su parte experimental confirma la posibilidad de utilizar estos residuos conglomerados con un material conocido, abundante y económico como el yeso o la escayola. Su trabajo define placas de yeso aligeradas con residuos EPS y paneles de residuos EPS conglomerados con escayola. En base a los ensayos afirma que las placas y los paneles con estos residuos pueden cumplir con los usos de placa de yeso laminada y paneles de EPS comerciales para la construcción pero con solicitaciones menores para algunas de sus características. Son adecuados para uso en interiores o para ser instalados en zonas protegidas de la lluvia o de la humedad medioambiental. Tanto para la placa como para el panel la relación agua-conglomerante ha sido 0,8 y para la placa el porcentaje de residuo añadido sobre el peso de conglomerante en seco ha sido de 1,6% de residuo EPS molido grueso y en el panel 8,1% (Francisco Javier González Madariaga, 2008).

Jiménez Rivero et al. (2014) incorpora al yeso **residuos de caucho sintético** que proviene de coquillas aislantes de tuberías. El compuesto de yeso y caucho obtenido es un compuesto ligero ya que se alcanza hasta un 49% de reducción de densidad comparado con las muestras de referencia. De las granulometrías estudiadas (1-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm y 20-25 mm) el tamaño 4-6 mm resultó el más adecuado para ser utilizado como adición (Jiménez Rivero et al., 2014).

Khalil et al. (2013) incorpora al yeso **sílice de arena natural, gel o humo**. Sus investigaciones concluyen que son apropiados para las aplicaciones en las que se necesitan o recomiendan elementos de alta porosidad y bajo peso, concretamente en las edificaciones bajas (Khalil, et al., 2013).

Por otra parte, las investigaciones de (Alameda et al., 2015) se basan en la fabricación de placas de yeso a partir de la reutilización de **residuos poliméricos** de origen industrial (espuma de poliuretano) y reforzadas con fibras de polipropileno. Los resultados obtenidos indican que es posible reciclar este tipo de prefabricados de una manera sencilla. De la misma forma se ha demostrado que las nuevas placas fabricadas con el residuo recuperado, presentan un buen comportamiento mecánico y se reduce su capacidad de absorción de agua, aumentando su dureza superficial.

2.1.3. Mejoras térmico-acústicas

En general los compuestos aligerados suelen tener mejores propiedades térmicas, posibilitando un ahorro de energía en la climatización de los edificios y por tanto una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂.

Entre otros se ha comentado ya las mejoras térmicas y acústicas obtenidas por Río Merino (1999) en su Tesis con un compuesto de yeso-corcho y fibras de vidrio E (del Río Merino, 1999).

También se consigue una mejora del comportamiento térmico del yeso con la adición de **materiales de cambio de fase**. Estos materiales almacenan energía en forma de calor latente y poseen una elevada densidad de almacenamiento térmico.(Borreguero et al., 2011).

Romaniega (2016) en su tesis doctoral sobre el refuerzo de la escayola mediante **fibras de lana mineral procedente del reciclaje de RCD**, elabora compuestos que mejoran el aislamiento acústico y la conductividad térmica de las placas de yeso laminado, escayola o los guarnecidos comercializados. La incorporación de lanas minerales mejora el comportamiento térmico del compuesto con respecto a la referencia reduciendo en un 33% la conductividad térmica y mejora el comportamiento acústico con diferencias de 2 dB con respecto a la serie de referencia.

Además, Romaniega incorpora **fibras de polipropileno** que mejoran el comportamiento térmico, reduciendo un 45% la conductividad térmica respecto a la referencia y acústicamente se llega hasta 3dB de diferencia con la serie de referencia. Por otro lado elabora compuestos con adición de **fibra de vidrio** en un 10% y obtiene mejoras en el comportamiento térmico y el comportamiento acústico supera en 4 dB la referencia (Romaniega Piñeiro, 2016).

Gutiérrez-González et al. (2012) obtiene materiales de yeso ligeros con **residuos de espuma de poliuretano** que aumentan su resistencia térmica proporcionalmente a la reducción de densidad (la conductividad térmica disminuye un 66%). Estos resultados sugieren que el uso del yeso que contiene residuos de espuma de poliuretano es comparable al de yeso aligerado con materiales convencionales. La misma autora realiza otro estudio con residuos de polvo de poliamida concluyendo que, el aumento de la cantidad de poliamida afecta las propiedades del yeso, disminuyendo su densidad (hasta 50%) y sus propiedades mecánicas. Sin embargo aumenta la permeabilidad y la resistencia térmica (reducciones de conductividad térmica hasta un 54%) de los compuestos. Estos resultados confirman que los yesos producidos con poliamida reciclada son comparables a los yesos ligeros hechos con materiales tradicionales (Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012).

Otros estudios incorporan las espumas rígidas de poliuretano como sustitutivo del árido en morteros (Junco Petrement, 2012).

Gutiérrez González et al. (2013) en otra de sus investigaciones estudia las propiedades reológicas del yeso con residuos de polvo de poliamida y confirma que cambian significativamente sus propiedades con respecto a su aplicación in situ concluyendo que mayores cantidades de residuo conducen a una mayor viscosidad (S Gutiérrez González et al., 2013).

Santos Jiménez et al. 2015, incorpora al yeso **residuos de ladrillo y XPS**, los resultados muestran que con la adición de XPS, se obtiene una reducción del 26% de la densidad y una mejora del 37% de la conductividad térmica (Santos Jiménez et al., 2015).

2.1.4. Otras mejoras

También se han encontrado otros estudios que analizan la adición de **impermeabilizantes** al yeso y los efectos que causan los sobre el crecimiento de los cristales de yeso (Li et al., 2007) y otros que analizan las posibles variaciones en las consistencias de la pasta de yeso, tiempo de fraguado y resistencia a compresión que aportan las **adiciones de retardantes, aireantes y espumantes** (Arikan & Sobolev, 2002).

González & Lloveras (2005) presentan placas y paneles con **residuos de EPS** cuyos ensayos confirman las buenas características de reacción al fuego de los materiales propuestos, lo que ofrece una opción válida y atractiva para aplicaciones de construcción interior con

mayor riesgo de incendio y donde la placa de yeso estándar puede resultar excesivamente pesada (F.J González Madariaga & Lloveras Macia 2005).

2.2. PATENTES DE ESCAYOLA-YESO

Se ha realizado una búsqueda en la página oficial de patentes. De las patentes encontradas se destacan las mejoras que se consiguen:

- Productos de yeso aligerado.
- Productos de yeso mejorado térmicamente.

La patente presentada por Roman Aleman y Torres Zacarías "Mortero de yeso con **vermiculita expandida** y aditivado, y procedimiento para su obtención" se basa en una alternativa a los conocidos morteros con distintos tipos de vermiculita que se caracterizan por falta de resistencia mecánica, mantenimiento periódico y necesidad de placas aislantes, lana de roca o similares para aislamiento acústico o térmico. El tipo de vermiculita que se obtiene mediante la propuesta de esta invención, consigue en el mortero final mejores propiedades de adherencia, maleabilidad y control de fraguado. La composición del mortero que la invención propone es la siguiente: Sulfato cálcico 40% al 70% y vermiculita expandida laminada 40% al 70%, ácido cítrico 0,05% al 0,3%, ácido tartárico 0,05% al 1%, sulfato de cobre 0,01% al 0,5%, citrato potásico o sódico 0,01% al 0,5% (Roman Aleman & Torres Zacarías, 2009).

La patente ES 2 178 407 T3 Jobbins en la que propone un material alternativo a la adición de vermiculita expandida, perlita y más recientemente partículas termoplásticas, para aligerar los paneles de yeso. El material no necesita añadir partículas a la masa yeso-agua y disminuye la densidad aparente del cuerpo fraguado hasta 640 kg/m³ sin disminuir su resistencia. La mejora se debe a la incorporación de un **látex natural o sintético** a la masa del yeso en combinación de un tensioactivo no iónico (Jobbins R, 2001).

San Antonio et al. (2015) realiza estudios de yeso a los que le incorpora residuos de poliestireno extruido. Sus conclusiones son mejora de la absorción capilar y la resistencia térmica del compuesto de yeso y disminución de la densidad y la resistencia mecánica. La autora tiene una patente producto de estos estudios en los que incorpora al yeso **residuos de XPS**. La invención consiste en mezclar yeso con residuos de poliestireno extruido y agua, siendo incorporado previamente el residuo de poliestireno extruido de forma triturada y tamizada al agua y a continuación el yeso (de San Antonio González et al., 2015)

La patente N° P 201630096 de Romaniega y del Río Merino con **fibras recicladas** donde se consigue un yeso térmicamente aislante (Romaniega Piñeiro & del Río Merino, 2016).

Otra patente es la N° P 201100886 de Gutiérrez González et al. (2013) que se basa en la obtención de un material aligerado obtenido a partir del reciclado de polvo de poliamida, mejorando algunas de las propiedades básicas del yeso como son la trabajabilidad, la permeabilidad y la capacidad de aislamiento debido a la inclusión de aire (Sara Gutiérrez González et al., 2013).

La patente N° P201001011 de Gadea Sáinz et al. (2013) consiste en la obtención de un nuevo material de yeso aligerado para su uso en la construcción, en el que se incorporan residuos industriales de espumas rígidas de poliuretano, obteniéndose peso reducido y un coeficiente de aislamiento tanto térmico como acústico elevado (Gadea Sainz et al., 2013)

2.3. PRODUCTOS COMERCIALIZADOS EN LA ACTUALIDAD EN ESPAÑA

Se han encontrado productos comerciales de yeso con perlita o vermiculita para revestimientos o para prefabricados (Tabla 16). No se han encontrado productos con otro tipo de cargas. El problema de la perlita y la vermiculita es que son costosas económicamente hablando y también generan un importante impacto medioambiental

pues su fabricación consume una importante cantidad de energía (A San Antonio Gonzalez et al., 2014).

Composición	Empresa	Peso (g)	Dureza (Shore C)	R. Flexión (MPa)	R. Compresión (MPa)
Yeso de proyección con perlita ($\alpha/y=0.55$)	Yesamsa	171.52	56.00	-	1.43
ALYPROMECC	Yesos Guillen	-	>45	>1	>2
Prolite ($\alpha/y \leq 0.7$ y perlita)	Placo	-	>45	>1	>2
Proyal XXI YPM/A ($\alpha/y \leq 0.7$ & perlita)	Placo	-	>45	>1	>2
Yeso de proyección con perlita ($\alpha/y=0.55$)	Yesos Juarez	-	>45	-	>2

Tabla 16. Características de yesos aligerados que se comercializan en la actualidad.

2.4. ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA CÁSCARA DE ARROZ

Considerando las ventajas que tiene la cáscara de arroz: baja densidad, buen aislante acústico, no inflamable y facilidad para ser cortado, este material ha sido motivo de distintos estudios aplicado para mejorar los materiales de construcción.

En el caso de la cáscara de arroz los estudios encontrados se basan en:

- Mejoras del comportamiento térmico.
- Mejoras del comportamiento acústico.
- Mejoras del comportamiento ante la humedad.
- Mejoras del comportamiento mecánico.
- Reducción de densidad.
- Aplicaciones de la cáscara como combustible.
- Aplicaciones de la cáscara en la industria.

2.4.1. Mejora del comportamiento térmico

Las propiedades termoaislantes de la cascarilla de arroz se utilizan de manera artesanal desde hace tiempo (Serrano et al., 2012) (Moshtaghioun & Monshi, 2007; Sisman et al., 2011).

Serrano (2012) realiza un estudio donde se obtienen morteros ligeros con densidades en el intervalo de 1,1-1,3 g/cm³, que presentan resistencias mecánicas entre 2 y 4 MPa. Como cabía esperar, los materiales resultantes no presentan las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones tradicionales, sin embargo son interesantes para ser aplicados en componentes de construcción livianos y de uso no portante (aislamientos térmicos/acústicos o rellenos) (Serrano, et al., 2012).

Gutiérrez et al. (2014) hace un estudio de un aislamiento térmico producido a partir de cáscara de arroz aglomerada utilizando almidón producido con *saccharomyces cerevisiae* (levadura industrial). Del análisis de los resultados el autor concluye que el material compuesto desarrollado a partir de cáscara de arroz presenta valores de conductividad térmica que se encuentran en el mismo orden de magnitud de materiales históricamente utilizados para tal fin como son el poliestireno expandido y el corcho. Se encontró también, que el material compuesto tiene una resistencia a la flexión mucho mayor que el poliestireno expandido y el corcho, superando al primero por un orden de magnitud y teniendo valores similares al segundo. Además de ser más biodegradable que cualquier otro aislante y resistir altas temperaturas (175°C) durante 2 horas sin sufrir variaciones en sus propiedades mecánicas (Gutiérrez et al., 2014).

Cadena & Bula (2002) proponen aglomerados con cáscara de arroz. Sus conclusiones son que el aglomerado que obtuvo menor coeficiente de conductividad fue el de cáscara de arroz, almidón de yuca a partir de raíces sin procesar, fibra de banano y fique; se conforma sin la aplicación de presión, que puede generar mayor porosidad que en los demás materiales totalmente naturales. Los autores proponen la utilización de los materiales

analizados como aislantes térmicos en sistemas de refrigeración, transporte de mercancía refrigerada, empaquetado de productos congelados y construcciones civiles (Cadena & Bula, 2002).

También se ha encontrado una patente ES 2 151 441 B1 de título: "Tablero aglomerado de cascarilla de arroz de densidad media" aplicable como sustitutos de tableros de aglomerado convencionales, caracterizado por estar formado a partir de la mezcla y laminación en caliente de una mezcla formada por un 85% de un granel de cáscara de arroz exento de finos, con un 15% de un adhesivo formado por un 15% de cola de isocianato al 15% o colas lamínicas al 38%, produciendo un tablero hidrófugo e ignífugo. Si se mezclan en distintas proporciones, 85% cascarilla de arroz exenta de finos con un 15% de colas lamínicas al 40%, adecuadamente tratada, produce un tablero aislante acústico y térmico (García Marín, 2000).

2.4.2. Mejora en el comportamiento acústico

En cuanto a las mejoras del comportamiento acústico, Mahzan (2009) produce un compuesto a base de cáscara de arroz mezclada con espuma de poliuretano como aglutinante. El autor concluye que con un 25% de cáscara de arroz se obtiene un posible material absorbente para el sonido de baja frecuencia (Mahzan et al., 2009).

2.4.3. Mejora del comportamiento ante la humedad

Se ha encontrado un estudio realizado por Kim (2009), Los tableros de yeso con 20% de cáscara de arroz cumplen con las normativas Japonesas en cuanto a incombustibilidad y reduce los niveles de absorción de humedad (Kim, 2009).

2.4.4. Mejora del comportamiento mecánico

La ceniza de la cáscara de arroz resulta adecuada para obtener cementos mezclados y/o sustituir ciertas cantidades de cemento Pórtland en morteros y hormigones por sus propiedades puzolánicas (Ajiwe, et al., 2000; Cook, 1986; Mehta, 1979; Swamy, 1986; Yeoh, et al., 1979). En cuanto a las publicaciones sobre la reutilización de ceniza de cáscara de arroz (CE), se han encontrado numerosos estudios (Gemma Rodríguez de Sensale, 2006; Givi, et al., 2010; Hu & Stroeven, 2004; Ismail & Waliuddin, 1996; Mejía, et al., 2013; Mutuk & Mesci, 2014; Robayo, et al., 2013; Singh & Rai, 2001; Zhang, et al., 1996; Zucco & Beraldo, 2008). Todos ellos incorporan la CE en mezclas de hormigón o cemento ya que al ser un excelente material puzolánico genera incrementos en la resistencia mecánica y mejora las propiedades de la durabilidad. Solarte et al. (2007) afirman que en su estudio la ceniza disponible localmente aumenta la resistencia a compresión y reduce la permeabilidad ante agentes agresivos como el ión cloro sólo si se adiciona al concreto en partículas finamente molidas. (Solarte et al., 2007).

La ceniza de la cáscara de arroz posee una adecuada actividad puzolánica y un efecto positivo en las propiedades del hormigón (Farias & Recena, 1990; Mehta, 1989; Smith & Kamwanja, 1986; Sugita & Shoya, 1992).

De los estudios realizados por Águila (2001) y Águila (2016) para producir un material puzolánico, a partir de la cáscara de arroz y utilizarlo como sustituto parcial del cemento Portland en las obras, el autor confirma que con sustituciones de hasta 30% de cemento por ceniza la resistencia a compresión no se ve afectada y verifica que el porcentaje óptimo de sustitución es de 20%, con un incremento del 20% de la resistencia a compresión del cemento; además, se obtiene una mejoría en la estabilidad química y la durabilidad del cemento cuando se le añade ceniza, lo cual aumenta la posibilidad del empleo de ésta, en elementos que estarán sometidos a ambientes agresivos (I Águila, 2001; Idalberto Águila, 2016).

En otra de las investigaciones realizadas por Mehta & Pirtz (1978) se utilizaron las cenizas de cáscara de arroz para reducir la temperatura del hormigón en masa y obtener resistencias a compresión mayores que la de los hormigones sólo con Pórtland (Mehta & Pirtz, 1978).

Singh & Rai (2001) estudian el efecto de la ceniza de cáscara de arroz en un cemento mezclado con yeso y (PVA) afirmando que es beneficiosa la sustitución del 10% del peso de cemento por RHA (ceniza de cáscara de arroz) ya que se obtienen cementos con incrementos en resistencias y disminuciones de porosidad (Singh & Rai, 2001).

También en otro estudio muy reciente Abbas et al. (2017) incorpora cenizas de cáscara de arroz a morteros de cemento para mitigar la reacción álcali-sílice y su expansión (Abbas et al., 2017).

Según la Agencia Universitaria de Periodismo Científico, AUPEC, el Grupo de Materiales Compuestos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, en convenio con la Empresa Arrocería La Esmeralda y el apoyo de Colciencias, lograron mejorar las propiedades mecánicas de durabilidad y compresión del cemento, en uno de sus proyectos de investigación. Este proyecto incinera la cáscara de arroz para eliminar el compuesto orgánico y extrae la sílice mediante un proceso químico para adicionarlo, en pequeñas cantidades, al cemento. Probando con distintas dosificaciones agua/cemento y porcentaje de adición de ceniza, se obtuvo en laboratorio, una muestra del nuevo cemento compuesto, con una mejora del 20 % de la resistencia a compresión, en comparación con un Portland tradicional. También se observaron mejoras, en durabilidad y en ambientes marinos. Este cemento con la adición, es además menos permeable a los iones cloruros, causantes de la corrosión del acero.

Rendón et al. (2009) realizan estudios sobre el comportamiento reológico de pastas y morteros de cemento Portland adicionados con sílice amorfa obtenida de las cenizas de la cáscara de arroz. Los autores logran obtener una adición de ceniza de cáscara de arroz que presenta alta resistencia mecánica a compresión y buena trabajabilidad en morteros y pastas adicionadas si la molienda de la ceniza es la adecuada y se consigue una sílice altamente cristalina (Rendón et al., 2009).

Mafla (2009) incorpora al cemento el SiO_2 obtenido de la cáscara de arroz. Los resultados de las muestras indican mejoras en cuanto a su resistencia a compresión. Los porcentajes de adición oscilaron entre un 5–10 % del contenido total de cemento. Sin embargo, el autor indica que el uso de la cascarilla de arroz sin un previo tratamiento químico es un agente patógeno para el hormigón, ya que el gran porcentaje de materia orgánica impide el correcto fraguado. Por lo tanto siempre se debe eliminar la parte orgánica (Mafla, 2009).

Los suelos arenosos no suelen presentar propiedades adecuadas como materiales de base o sub-base de pavimentos. Sin embargo, son muy frecuentes en las regiones de cultivo de arroz. La evaluación de la estabilización de suelos arenosos locales con adición de ceniza de cáscara de arroz y cal es una alternativa de interés, ya que la ceniza de cáscara de arroz está compuesta entre 90 y 96% por sílice, proporcionaría a los suelos la sílice necesaria para reaccionar con la cal y formar productos puzolánicos, obteniéndose así materiales más resistentes, menos deformables y más durables. Como conclusión, los expertos confirman que los materiales compuestos de suelos arenosos, ceniza de cáscara de arroz y cal son potencialmente utilizables para la construcción de capas de pavimentos de bajo a mediano volumen de tránsito, con posibles beneficios económicos y ambientales, al habilitar el uso de suelos arenosos locales con reducción de costos de transporte y el aprovechamiento de un residuo como es la ceniza de cáscara de arroz (Behak & Peres Núñez, 2008).

En la misma línea Basha et al. (2003) se puede agregar a los terrenos ceniza de cáscara de arroz para ayudar a la compactabilidad de estos (Emham Med A Basha et al., 2003). En un estudio posterior los autores indican que se recomienda la adición de 6-8% de cemento y 10-15% de ceniza de cáscara de arroz como cantidad óptima (E.M.A Basha et al., 2005).

Un estudio de López (1991) aplica ceniza de cáscara de arroz en suelos altamente meteorizados y por tanto de muy baja fertilidad natural. Los resultados concluyen que la aplicación de ceniza de cáscara de arroz tiene un efecto significativo sobre algunos de los

componentes químicos de los suelos, aumentando el contenido de calcio, magnesio, manganeso y fósforo (López, 1991).

Otros trabajos modifican los polímeros con polvo de ceniza de cáscara de arroz para material de relleno. La espuma epoxi se utiliza como parte de estructuras de materiales compuestos tipo sándwich para aplicaciones que requieren poco peso tales como estructuras aeronáuticas, aeroespaciales y navales. En concreto el trabajo de Stefani et al. (2006) analiza el efecto del polvo de ceniza de cáscara de arroz, en el proceso de espumado y sobre las propiedades de las espumas epoxi, con el objeto de disminuir el coste del sistema y valorizar un residuo de la agroindustria. Las cenizas de cáscara de arroz producen un efecto nucleante en la formación de burbujas en el proceso de espumado, es decir, espumas con mayor cantidad de burbujas por unidad de volumen y menor diámetro promedio. Se produce una mejora en el comportamiento mecánico de las espumas epoxi. A pesar de que la fracción de huecos en las espumas modificadas es mayor la presencia del filler en la matriz epoxi produce una mejora neta en el comportamiento mecánico (Stefani et al., 2006).

En cuanto a los trabajos realizados con cáscara triturada (CT), destaca Kim el cual realiza un estudio con placas de yeso fabricados con cáscara de arroz incorporando hasta un 40% sobre el peso del yeso. Las conclusiones de este estudio muestran un buen material de refuerzo, con un ligero efecto resistente sobre la absorción de agua y humedad (Kim, 2009).

Por otro lado la cáscara de arroz entera (CA) y la cáscara triturada (CT) se han utilizado para fabricar placas de fibra de cemento y lodos procedentes de la fabricación de papel. Se obtienen placas con baja capacidad térmica, excelente resistencia al cizallamiento, muy buena resistencia a ciclos de hielo/deshielo, incombustibilidad y no generan presencia de fuego ni humo al ser sometidas a fuego intenso (Loredo et al., 2014).

Se obtienen aglomerados de cáscara de arroz por moldeo por compresión utilizando como adhesivo una resina fenólica comercial. La cáscara de arroz no tiene ningún tratamiento previo. Los resultados muestran mejoras en el comportamiento mecánico y una disminución en el porcentaje de absorción de agua a medida que crece el porcentaje de adhesivo y la presión aplicada durante su procesado tanto en los aglomerados de cáscara de arroz como los obtenidos a partir de viruta de madera (Desirello et al., 2004).

Figura 17. Esquema del tablero (Kwon et al., 2013).

En el estudio realizado por (Kwon, et al., 2013) el compuesto sándwich-estructurado con madera en la capa superficial (40% en peso del peso del panel) y partículas de cáscara de arroz en la capa central (60% en peso del peso del panel) puede evaluarse como sustituto en aplicaciones estructurales.

2.4.5. Mejora medioambiental

Existen trabajos sobre materiales con residuos de la producción de arroz que no consiguen mejoras, salvo reducir la materia prima y valorizar el residuo. Este es el caso del estudio realizado por Molina, Tarifa & Mendoza (2015) en el que se utilizan residuos de cáscara de arroz, ceniza de cáscara de arroz y ceniza volante para fabricar bloques ecológicos. El estudio demuestra la viabilidad de utilizar los materiales con residuos de cenizas de

termoeléctrica y cenizas de cáscara de arroz como aglomerante puzolánico desde el punto de vista mecánico (Fuentes Molina et al., 2015).

Además se han encontrado estudios fundamentados en países de producción elevada de este cultivo y que necesitan abaratar la vivienda (Salas & Castro, 1985). El proyecto se basa en el estudio de viviendas de muy bajo coste, utilizando para ello materiales y procedimientos o sistemas constructivos que proporcionen un producto final que se adecue a las necesidades físicas y socioculturales de la zona. Se utilizan materias primas y semielaboradas para los costes de utilización sean bajos y con cierta disminución cualitativa de los mismos. Se obtienen: hormigones pobres en cemento, hormigones de escorias o residuos volcánicos, materiales a base de desechos agrícolas como bagazo de caña y cáscara de arroz.

En esta misma línea se ha encontrado el estudio de Bizzotto, Natalini & Gómez (1998) que realiza estudios sobre minihormigones con cáscara de arroz natural (Bizzotto et al., 1998). Portilla (2014) realiza una propuesta de diseño y desarrollo de una baldosa a partir de tereftalato de polietileno (PET) reciclado y cáscara de arroz o ceniza de cáscara de arroz para viviendas sociales (Mora Portilla, 2014).

Otro estudio demuestra que si la cáscara de arroz se incinera a la vez con carbón ayuda a limpiar las emisiones de las centrales eléctricas a carbón, aunque como desventaja puede producir más partículas ultrafinas y aumentan los problemas de escoria, incrustación y formación de Clinker en sistemas convencionales (Chao et al., 2008).

2.4.6. Reducción de densidad

Como se ha mencionado anteriormente en un estudio realizado por (Serrano, et al., 2012) se obtuvieron morteros de muy baja densidad y elevada porosidad que los convierten en candidatos para elaborar materiales de construcción para aislamiento térmico y acústico, pero no para fabricar elementos portantes debido a su baja resistencia mecánica. Se concluye que el tratamiento químico de la cascarilla con reactivos alcalinos y la adición de cloruro cálcico como acelerante del fraguado, son dos propuestas efectivas para la reutilización de estos residuos en morteros aligerados.

Padhko analiza la incorporación de paja de arroz para la fabricación de paneles de yeso a los que se les incorpora también cáscara de maíz (Padhko 2012). Los resultados de este estudio revelan que incorporando cáscara de arroz y maíz se obtienen mezclas con menor densidad y que absorben menos agua.

El estudio realizado por Kazmi et al. (2016) incorpora a la arcilla la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la ceniza de cáscara de arroz para la fabricación de ladrillos. Con incorporaciones del 5% de cada residuo se obtienen elementos que pierden resistencia a compresión pero que reducen su densidad y mejoran la resistencia contra la eflorescencia (Kazmi et al., 2016).

2.4.7. Aplicación de la cáscara como combustible

El poder calorífico de la cáscara de arroz es similar al de la madera y al de otros residuos agrícolas (debido a su composición alta en celulosa y sílice), por lo que inclusive se le ha considerado como una alternativa en usos domésticos. Se han desarrollado hornos para cereales que la utilizan como combustible, obteniéndose un mejor rendimiento (Errasti Cabrera et al., 2015; Valverde, et al., 2007).

También se estudia la posibilidad de la quema de la cáscara de arroz para producción de energía térmica y mecánica de las propias fábricas de arroz (Armesto, et al., 2002; Natarajan et al., 1998). Otros estudios como el de Contreras-Velásquez et al. (2012) y Capdevila et al. (2015), obtienen bioetanol a partir de los residuos de arroz. En este último se simula el proceso de fermentación/separación de bioetanol en estado estacionario determinando los niveles de las variables que conducen a la obtención del máximo rendimiento de bioetanol a partir del análisis de sensibilidad paramétrico (Capdevila et al., 2015; Contreras-Velásquez et al.,

2012). También existen estudios que utilizan la cáscara de arroz para producir etanol (Piñeros & Otálvaro, 2010).

Restrepo et al. (2004) confirman que en la empresa "Grupo Carolina" del sector de textil de la ciudad de Ibagué, se desarrolló un equipo de un hogar mecánico para calentar el agua para el triturado de la tela por medio de la combustión de la cascarilla de arroz. Este trabajo presenta la evaluación del comportamiento de la combustión, la temperatura del sistema y la emisión de gases hacia la atmósfera del prototipo diseñado, permitiendo realizar un manejo adecuado de los parámetros tecnológicos involucrados y así encontrar el punto más adecuado para la combustión de la cáscara (Restrepo et al., 2004).

Dentro de los estudios realizados por empresas se han encontrado:

- La UTE formada por IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) y Maicerías Españolas S.A. (DACSA) encuentra una solución para la valorización de la cáscara de arroz (residuo generado por DACSA) que se retiraba de fábrica por un gestor de residuos. Tras analizar distintas alternativas, se decidió optar por la construcción de una instalación de combustión de la cáscara de arroz, utilizando la tecnología de lecho fluido, para la generación de electricidad que se vende a la red y de energía térmica en forma de vapor que puede ser utilizada en algún proceso de la fábrica. Solución muy innovadora, ya que se trata de la primera instalación en Europa en quemar cáscara de arroz. Los equipos principales de la instalación son: Una caldera acuotubular de circulación natural, con una capacidad de producción de 10 t/h de vapor sobrecalentado a una presión de 62 bar y una temperatura de 485 °C, preparada para consumir unas 15.000 t/año de cascarilla. Un grupo turbogenerador, formado por una turbina de vapor y sistemas auxiliares, con una potencia eléctrica de 2,2 MW.
Actualmente, la planta lleva más de 55.000 horas de funcionamiento. Es un proyecto innovador, único en España por su tecnología, el combustible que utiliza y por la generación en la combustión de unas cenizas ricas en sílice, que pueden ser utilizadas con diverso fines, como por ejemplo en la industria siderúrgica.
- Según la revista Bioenergy International en Uruguay la empresa Arrozur, S.A. viene haciendo uso, desde hace años, de la cáscara de arroz para obtener energía térmica para sus procesos de cocción y secado. La planta está certificada dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) establecido en Kyoto, por lo que puede comerciar con los certificados de reducción de emisiones (CER) derivados de la generación de energía con biomasa. El uso de cascarilla de arroz de origen nacional para fines energéticos supone una reducción de emisiones, en comparación con los combustibles fósiles (Antonio Gonzalo, 2011).
- Otro de los proyectos encontrados es el de una empresa colombiana, dedicada al diseño, fabricación y montaje de maquinaria agroindustrial para molienda, secado y almacenamiento de arroz y otros granos. Esta ha desarrollado un nuevo diseño de horno para secar cereales, en el que se utiliza como combustible la cáscara de arroz. En el diseño y construcción del nuevo horno, se busca mejorar la vida útil del equipo, disminuir el costo de fabricación y el consumo de energía, y cumplir con las normas técnicas internacionales para prevenir la contaminación ambiental. El resultado fue un horno altamente competitivo por su elevada operatividad, su precio, el incremento de la eficiencia de combustión (de un 60% a un 80%) y su bajo consumo de energía eléctrica (CERIDE). Se contribuye así a la utilización de tecnologías sostenibles en plantas de la agroindustria, y en gran medida, a la reducción de un desecho de difícil biodegradación como es la cascarilla de arroz. Se logra además encontrar una fuente alternativa de generación de calor y así reducir el consumo de combustibles fósiles como el diesel, carbón coke y gas natural.

2.4.8. Aplicaciones de la cáscara en la industria

2.4.8.1. Obtención de sílice

Como se ha comentado ya existen múltiples investigaciones que afirman que el contenido de sílice de las cenizas procedentes de la combustión de residuos agrícolas, dependiendo del proceso de combustión, puede tener carácter puzolánico. Tal es el caso de materiales como la ceniza de cáscara de arroz, la ceniza de hojas de bambú y el bagazo de caña de azúcar (Visvesvaraya, 1986). Diversos estudios han ampliado los conocimientos relacionados con la obtención de SiO_2 de desechos agroindustriales que se producen en altos volúmenes, principalmente la cáscara de arroz debido al gran contenido de sílice amorfa que su ceniza contiene (Forero et al., 2009; Ordoñez, 2007).

La ceniza de cáscara de arroz contiene más del 60% de sílice y puede ser una materia prima económicamente viable para la producción de silicatos y sílice (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006; Charca et al., 2007; Kalapathy et al., 2002; Krishnarao et al., 2001; Luan & Chou, 1990; Sinyoung et al., 2017; Treviño Cardona & Gómez de la Fuente, 2003).

Otro estudio recicla cáscaras de arroz para convertir la sílice a silicio y lo utilizan para la fabricación de baterías de litio (Jung et al., 2013).

2.4.8.2. Aplicación en cementos y hormigones

La fabricación de clinker de cemento Portland requiere una gran cantidad de Energía (3100 MJ / t de clinker) y produce grandes cantidades de CO_2 . En el estudio de (Sinyoung, et al., 2017) se adicionan al cemento las nano-siliconas extraídas de la ceniza de cáscara de arroz pura calcinada en el laboratorio y la ceniza impura obtenida del proceso industrial de la cáscara de arroz para la fabricación de cementos.

La ceniza de cáscara de arroz podría utilizarse para la sustitución de sílice en la formulación de cemento para reducir sus peligros ambientales como desechos agrícolas y se propone la adición de ceniza de cáscara de arroz al cemento para el hormigón de forjados. El estudio concluye su recomendación de utilización de este compuesto en países que necesiten reducir sus problemas de generación de residuos de este tipo ya que las pruebas físicas y químicas comparadas con el cemento comercial tienen valores muy cercanos (Ajiwe, et al., 2000).

Rendón et al. (2009) modifica las propiedades morfológicas de la ceniza por diferentes técnicas de molido (molienda convencional con molino de bolas y molienda de alta energía en un molino de atrición). Con esta ceniza de cáscara de arroz se modifica el comportamiento en estado fresco del cemento adicionado. Además, según en qué condiciones se incinera la cáscara de arroz, las cenizas pueden tener un alto contenido de sílice amorfa, que hace interesante su utilización como puzolana en el hormigón basado en cemento Portland a la vez que se reduce el impacto ambiental de la producción de cemento. La obtención, bajo condiciones controladas, de este material no es sencilla, debido a la baja densidad de la cáscara y a la necesidad de gasificar el 80 % de la materia orgánica. Esto obliga a diseñar procesos que garanticen la obtención de una ceniza altamente amorfa sin sacrificar su rentabilidad, también se requiere modificar mecánicamente la morfología de estas cenizas ya que su origen orgánico genera partículas irregulares y porosas que pueden afectar a procesos posteriores. Al respecto aún existen dificultades para su desarrollo industrial como adición puzolánica en el cemento Portland. Un aspecto importante a estudiar es la reología de los materiales de cemento Portland adicionados con cenizas de cáscara de arroz, de manera que se pueda establecer las condiciones óptimas de obtención de estas cenizas (Rendón, et al., 2009).

Solarte et al. (2007) investigó el efecto de la ceniza en hormigones adicionados, sobre las propiedades mecánicas y durabilidad. Los resultados demuestran que la ceniza disponible localmente aumenta la resistencia a compresión y reduce la permeabilidad ante agentes agresivos como el ión cloro sólo si se adiciona al hormigón con partículas finamente molidas.

Tiene la capacidad de mejorar algunas propiedades en el hormigón en sus diferentes edades de curado. Es importante además el efecto de la granulometría de la ceniza, ya que a mayor finura genera incrementos en resistencia mecánica a 28 días con respecto al hormigón sin cenizas, y en algunos casos con respecto al hormigón adicionado con humo de sílice. El estudio de durabilidad mostró que las cenizas finas reducían la permeabilidad frente al ión cloruro y aumentaban la resistencia a la polarización y también densificaban la matriz (Solarte, et al., 2007).

2.4.8.3. Otros estudios encontrados

- La utilización de ceniza de cáscara de arroz como **base catalizadora** (Ersöz, 2014).
- **Biogás** obtenido a partir de cenizas de diferentes tipos de arroz Okeh et al. (2014) realizó un estudio en el que se observa las diferencias del biogás obtenido (Okeh et al., 2014).
- Obtención de **materiales vitrocerámicos**, Martin et al. (2011) muestra los resultados de un estudio de valorización de la ceniza de cáscara de arroz como materia prima. Los resultados obtenidos muestran que es posible utilizar ceniza de cáscara de arroz para producir materiales vitrocerámicos mediante un proceso de sinterización seguido de cristalización, con nefelina ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) como fase cristalina mayoritaria en el intervalo de temperatura 700°-950°C y forsterita ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) a temperaturas superiores a 950°C, con el objeto de conocer las prestaciones de los materiales investigados, para su uso en pavimentos cerámicos (M. I. Martín et al., 2011).
- También se están investigando los residuos de cáscara de arroz en **la industria farmacéutica** en una investigación que sustituye por ceniza de cáscara de arroz un material muy costoso utilizado para la regeneración ósea y la administración de fármacos, el vidrio bioactivo mesoporoso (S.-Y. Chen et al., 2017).
- El grupo de investigación para la utilización de cáscara de arroz de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay ha diseñado un proceso para aprovechar la cáscara de arroz obteniendo **carbón activado** a partir de ésta y concluye que es viable la implementación de un sistema que obtiene carbono utilizable como carbono activado, abrasivo o carga de polímeros, humo líquido, maximizando el rendimiento energético y produciendo un mínimo de compuestos residuales nocivos (Jurado et al., 2003).
- Se ha encontrado un proyecto de nombre RIZEOPACK cuyo objetivo es el desarrollo de un **envase** activo capaz de mejorar las condiciones de conservación del pescado fresco envasado, reduciendo el crecimiento de microorganismos y los procesos oxidativos. Este proyecto aprovecha y valoriza un residuo agroindustrial como son las cenizas de cáscaras del arroz que se utilizan como combustible en el proceso de secado del arroz y que son de difícil gestión por su naturaleza silíceas y que pueden generar contaminación por arrastre a mares y ríos. Esta valorización consistirá en la utilización de estas cenizas, como materia prima en procesos industriales; como por ejemplo, para la obtención de aditivos inorgánicos como zeolitas y/o silicatos laminares, que serán empleados para encapsular agentes activos de gran actividad antioxidante y antimicrobiana para pescado fresco. Este proyecto se encuentra financiado por la Convocatoria Retos-Colaboración del Programa Estatal de I+D+i orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Economía y Competitividad (Exp. RTC-2014-3017-2), en consorcio con el Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE), Maicerías Españolas S.A. y Blister&Pack S.L. (Mayo 2015).
- Prada & Cortés (2010) utilizan la descomposición térmica de la cáscara de arroz como una alternativa para su aprovechamiento integral, ya que el calor, las cenizas, el carbonato de calcio producto de la captura de los gases de combustión y las aguas efluentes, ricas en cloruros, pueden ser aprovechadas en **procesos productivos** (Prada-Matiz & Cortés-Castillo, 2011) (Prada & Cortés, 2010).
- Los residuos agrícolas se pueden utilizar como filtros para eliminar diversos tipos de contaminantes del agua ya que estos materiales tienen una capacidad natural de adsorción de metales pesados (Hubadillah et al., 2017). La adsorción de iones metálicos a partir de soluciones de biomasa viva o seca, utilizando residuos agrícolas como cáscaras de cacahuets y avellanas, corteza de pino, paja de arroz, cáscara

de arroz, salvado de arroz, soja, semilla de algodón, aserrín, etc en lugar de resinas de intercambio iónico (Asadi et al., 2008).

2.5. CONSIDERACIONES DEL CAPÍTULO

De toda la bibliografía consultada se puede concluir que han sido muchos los investigadores que han trabajado incorporando al yeso o a la escayola diferentes adiciones para mejorar alguna de sus características o simplemente para ahorrar materia prima.

En cuanto a las investigaciones encontradas con residuo de arroz son en formato ceniza, es decir, una vez incinerada la cáscara de arroz, la mayoría ha sido la obtención de silicio a partir de la incineración de la cáscara y la adición de ceniza al hormigón o al cemento para mejorar sus propiedades puzolánicas, sin embargo la utilización del residuo sin necesidad de quemarlo es escasa.

Por otro lado, los trabajos científicos publicados, realizados con escayola o yeso y residuo cáscara de arroz entera (Oteiza, 1993) y cáscara triturada (Kim 2009) son escasos. En todo caso, en dichos trabajos los porcentajes de adición de cáscara de arroz entera (CA) no superan el 2% de residuo (Oteiza), frente al 40% (Sumin Kim) alcanzado con cáscara de arroz triturada (CT).

En cambio, no se ha encontrado ningún estudio que incorpore residuo de arroz en formato ceniza (CE) en matrices de yeso o escayola, a pesar de ser un formato ampliamente estudiado como adición en la fabricación de cementos y hormigones.

Por tanto, este trabajo amplía el estudio realizado por Oteiza para incorporar el residuo cáscara de arroz (CA) en mayor cantidad a una matriz de escayola. Y por otra parte estudia la incorporación de cáscara triturada (CT) y cenizas de cáscara de arroz (CE) en una matriz de escayola analizando los resultados por comparación con trabajos realizados por otros autores con cargas ligeras y con respecto a los productos de yeso aligerado y yesos especiales comercializados en la actualidad en España.

CAPITULO 3

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El consumo de arroz a nivel mundial es muy importante ya que es el segundo alimento más consumido después del trigo. En algunos países es la base de su alimentación, esto hace que se generen grandes cantidades de residuo. Parte de ellos se están reutilizando como cama de animales, como es el caso de la cáscara de arroz entera (CA), y las cenizas (CE), originadas por su incineración se están incorporando en cementos y hormigones. Pero todavía queda mucho por hacer en cuanto a la búsqueda de otras aplicaciones que puedan conseguir reducir estos residuos.

Además el residuo de cáscara de arroz tiene una relación volumen-peso muy elevada, esto hace que, en los países donde el consumo de arroz es básico se genere un gran volumen de residuo que dificulta su eliminación en vertederos.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que para obtener la ceniza, en algunos países se quema al aire libre y durante la incineración de la cáscara de arroz se generan gases tóxicos que ocasionan problemas medioambientales.

Como se ha podido comprobar en el análisis bibliográfico, hay una extensa documentación en base al yeso, un material muy utilizado desde la antigüedad al que se le quieren conferir algunas propiedades como la tenacidad, dureza, durabilidad ante el agua y mejorar otras como su capacidad como aislamiento térmico y acústico. Sin embargo, los trabajos encontrados con yeso y residuo de la producción de arroz son escasos, y además, no se han encontrado trabajos que incorporen cenizas de cáscara de arroz en matrices de escayola o yeso.

Se ha observado también que, a pesar de que hay un problema grave de residuos, el campo de aplicación de los nuevos materiales que se están investigando se centra fundamentalmente en los RCD en base al hormigón. Es por todo esto por lo que se propone utilizar los residuos agrícolas como materia prima alternativa en el diseño de nuevos materiales de construcción.

Esta tesis tiene como objetivo solucionar estos problemas buscando otras aplicaciones alternativas a las ya existentes a la cáscara de arroz (CA) y cáscara triturada (CT) y a la ceniza de cáscara de arroz (CE) en nuevos materiales para aplicar a la edificación.

CAPITULO 4

OBJETIVOS

4. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio del comportamiento físico y mecánico de compuestos de matriz escayola y residuos de cáscara de arroz como carga y buscar aplicaciones de dichos compuestos en el sector de la construcción, para reducir los residuos que genera el consumo de arroz y reducir el consumo de yeso obteniendo de esta forma un menor impacto medioambiental.

Para conseguir el objetivo general se propone resolver cinco objetivos específicos:

- OB.1** Caracterizar el residuo procedente de la producción de arroz.
- OB.2** Analizar la viabilidad de obtener compuestos de yeso con residuos procedentes de la producción de arroz como alternativa a las cargas que se utilizan actualmente en los materiales de construcción y que han sido motivo de otras investigaciones.
- OB.3** Caracterizar las mezclas de escayola con residuo de la producción de arroz mediante un estudio experimental.
- OB.4** Proponer y analizar algunas aplicaciones de los compuestos obtenidos.
- OB.5** Estudiar el impacto medioambiental de los compuestos seleccionados.

CAPITULO 5

METODOLOGÍA

5. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología seguida para obtener los objetivos específicos de esta tesis. La metodología seguida se estructura según los objetivos definidos en este trabajo:

OB.1 Caracterización del residuo procedente de la producción de arroz, para ello se realizan:

- Una búsqueda bibliográfica de las características de este residuo (Cap. 2).
- Un plan de experimental descrito en el apartado 5.1 "Ensayos físicos y químicos del residuo procedente de la producción de arroz".

Para los objetivos 2, 3 y 4 se plantea una metodología común para la realización de las probetas definida en el apartado 5.6.2 "Confección de probetas".

OB.2 Análisis de la viabilidad de compuestos de yeso y residuos de arroz como alternativa a las cargas que se utilizan actualmente, para ello se realizan:

- Un estudio bibliográfico de los compuestos en base de yeso (Cap. 2).
- Un plan experimental definido en el apartado 5.2 "Probetas de residuos de arroz y cargas ligeras"

OB.3 Caracterización de las mezclas de escayola con residuos de arroz, para ello se realiza:

- Un plan experimental con probetas de yeso y residuo de arroz definido en el apartado 5.3 "Escayola con adición de residuos de arroz" donde se definen los ensayos físicos y mecánicos y se analizan los resultados en las probetas a las que se adicionan distintos porcentajes del residuo en los tres formatos, cáscara de arroz entera (CA), cáscara de arroz triturada (CT) y ceniza de cáscara de arroz (CE). Para ello se definen dos fases: FASE 1 y FASE 2.

OB.4 Propuesta y análisis de algunas aplicaciones de los compuestos obtenidos, para ello se realiza:

- Un plan experimental definido en el apartado 5.4 "Compuestos seleccionados: Aplicaciones".

OB.5 Estudio del impacto medioambiental de los compuestos seleccionados, según la metodología definida en el apartado 5.5 "Estudio de la reducción de materia prima de los compuestos".

5.1. ENSAYOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL RESIDUO PROCEDENTE DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ

Para la caracterización física del residuo se han realizado los siguientes análisis:

- Análisis granulométrico de la cáscara de arroz, cáscara triturada y ceniza de cáscara de arroz.
- Determinación del contenido de humedad.
- Determinación de la densidad real por picnometría de helio.
- Determinación de la densidad de empaquetamiento de los residuos.

Para la caracterización química y mineralógica del residuo se han realizado los siguientes análisis:

- Análisis termogravimétrico.
- Análisis aproximado de los residuos.
- Difracción de rayos x.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los ensayos para la caracterización física se realizan en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (UPM) y los ensayos para la caracterización química en el centro de asistencia a la investigación de la facultad de Geológicas (UCM).

La metodología para cada uno de ellos se describe a continuación.

5.1.1. Análisis granulométrico

El método empleado se define en la norma UNE-EN 933-1:1998/A1:2006 "Determinación de la granulometría de las partículas. Método de tamizado".

Este método consiste en tamizar una muestra del material a través de una serie de tamices normalizados anotándose el peso retenido en cada uno de ellos. Los tamices utilizados son los que tienen las siguientes aberturas en mm: 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 y 0.063mm. El tamizado se realizó de manera mecánica utilizando para ello el equipo adecuado para esta finalidad (Foto 1).

Foto 1. Equipo y tamices utilizados en el análisis granulométrico.

5.1.2. Determinación del contenido de humedad de los materiales

Para determinar el contenido de humedad de las muestras se ha seguido la norma UNE-EN 12880 *Caracterización de lodos. Determinación de la humedad y del contenido en materia seca*. El procedimiento experimental seguido es el siguiente: se pesa en balanza analítica una cierta cantidad de muestra (Foto 2) y se introduce en estufa de secado (J.P. Selecta S.A.) (Foto 3) hasta peso constante.

Foto 2. Balanza analítica.

Foto 3. Estufa de secado.

Se calcula el contenido de agua de la muestra con la siguiente expresión:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{masa muestra húmeda} - \text{masa muestra seca}}{\text{masa muestra húmeda}} \times 100$$

5.1.3. Determinación de la densidad real por picnometría de helio

La determinación de la densidad real por picnometría de helio se basa en los métodos de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), que es la máxima autoridad mundial en las decisiones sobre nomenclatura química (terminología, métodos estandarizados para la medida, masas atómicas y otros datos evaluados) y las recomendaciones específicas de la casa comercial del picnómetro utilizado (Quanta Chrome).

La densidad real (ρ_s), también conocida como densidad de esqueleto, densidad verdadera o densidad de helio, se define como la densidad del material excluyendo poros y espacios interparticulares. Se ha empleado un Stereopycnometer Quanta Chrome en el ensayo (Foto 4), purgando la muestra, previamente desecada, con helio durante 10 minutos para desgasificar.

La determinación de la densidad real de un sólido mediante el uso de un estereopicnómetro (Figura 18) consiste en introducir un gas (He ALPHAGAZ 99,999% de Air Liquide) hasta una determinada presión (P_1) en una cámara de volumen conocido (V_c) en la que se encuentra el sólido cuya densidad real va a medirse, de modo que, el gas ocupará todo el volumen libre (introduciéndose en los poros del sólido y en los huecos interparticulares). A continuación, se abre la válvula para que ese volumen de aire se introduzca también en la otra cámara de volumen conocido (V_a) donde se expande y produce otra presión (P_2).

Foto 4. Equipo Stereopycnometer Quanta Chrome.

Como en el sistema siempre hay la misma cantidad de He puede establecerse la siguiente relación:

$$P_1(V_c - V_s) = P_2(V_a + V_c - V_s)$$

Después de haber realizado la medida por triplicado se calcula el volumen de la muestra de sólido para cada ensayo con la siguiente ecuación:

$$V_s = V_c + \left[\frac{V_a}{1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)} \right]$$

Siendo:

V_s el volumen real de la muestra (cm^3)

V_c volumen de la celda muestra ($155,88 \text{ cm}^3$)

V_a volumen de la celda de referencia ($76,67 \text{ cm}^3$)

P_1 presión leída después de presurizar la muestra

P_2 presión leída después de incluir el volumen de la celda de referencia V_a

Y la densidad real se calcula a partir de la masa de muestra pesada con la expresión de la densidad:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad ; \quad \rho_s = \frac{m}{V_s}$$

Donde:

ρ_s es la densidad real de la muestra (g/cm^3)

V_s es el volumen real de la muestra (cm^3)

m es la masa de muestra pesada (g)

Figura 18. Esquema del estereopícnometro (Quanta Chrome).

5.1.4. Determinación de la densidad de aparente de las partículas

La densidad de aparente de un conjunto de partículas granulares se define como la relación entre la masa del conjunto y el volumen total (aparente) de éste, incluidos los huecos o espacios que dejan entre sí las partículas (Boizán 1980).

Para determinarla se sigue el procedimiento tradicional que a continuación se expone:

- Se tara el recipiente de medida obteniéndose el peso m_0 .
- Se rellena dicho recipiente con el residuo a ensayar.
- Se pesa obteniéndose m_1 de cada uno de los residuos.

Foto 5. Medición de la densidad de empaquetamiento de las partículas.

Se calcula la densidad aparente de la siguiente manera expresada en g/cm³,

$$d_{aparente} = \frac{m_1 - m_0}{V}$$

Donde:

m_1 : Peso del recipiente lleno

m_0 : Peso del recipiente vacío

V : volumen del recipiente

5.1.5. Análisis termogravimétrico

Este análisis se basa en la variación de masa (pérdida o ganancia) en función de la temperatura (Faraldos & Goberna, 2002). Para ello se someten los tres tipos de residuo a un proceso de análisis termogravimétrico dinámico (la muestra se calienta en una atmósfera determinada, con una rampa de temperatura controlada).

Para dicho ensayo se emplea un equipo de análisis termogravimétrico SDT Q600 de TA Instruments (Foto 6), que es capaz de medir el flujo de calor (DSC) y el cambio de peso (TGA) de una muestra que se somete desde temperatura ambiente hasta 1000°C, a 10 °C/min, en atmósfera de nitrógeno con un caudal de 100 ml/min de nitrógeno (N₂ ALPHAGAZ 99,999% de Air Liquide).

Este equipo consta de una microbalanza con dos brazos (Foto 7), en uno se coloca el material de referencia, que debe ser térmicamente inerte, en este caso platino, y en el otro la muestra. Se somete la muestra a un aumento de temperatura definido, y se registra la evolución de la masa de la muestra con el tiempo. El ensayo se realiza en atmósfera dinámica controlada, y se selecciona la velocidad de calentamiento y el caudal del gas portador.

Foto 6. Equipo de análisis termogravimétrico.

Foto 7. Microbalanza.

5.1.6. Análisis aproximado de los residuos

Como se ha comentado en el apartado 5.3.1.5 el análisis termogravimétrico puede proporcionar además información de humedad, contenido de volátiles o cantidad de cenizas. El procedimiento se define en la nota técnica TA-129 y según ASTM 3173.

5.1.7. Difracción de rayos x

Actualmente se considera una técnica de utilidad analítica para las estructuras cristalinas o la diferenciación de formas alotrópicas o isomórficas (Faraldos & Goberna, 2002). Los rayos x se utilizan para identificar compuestos sólidos, tamaño de cristales, cristalinidad y cambio de fase. Son ondas electromagnéticas de longitud de onda corta (0.01-100 unidades Angstrom (1/100.000.000 cm)).

En el proceso utilizado los rayos x se desvían al chocar con un cristal (Figura 19), de esta forma un haz de rayos x incide en la superficie del cristal a cierto ángulo y una parte se dispersa por la primera capa de átomos y la otra parte penetra sufriendo dispersiones semejantes al atravesar cada una de las siguientes capas.

Figura 19. Difracción de rayos X a través de un cristal (Cuesta 2013).

Para que esto ocurra es necesario que:

- La separación entre las capas de átomos sea aproximadamente igual a la longitud de onda de la radiación.
- Los centros de dispersión se distribuyan de forma regular.

Se utiliza un equipo Siemens Krystalloflex D5000, con un monocromador de grafito con Cu Ka donde se colocan las muestras preparadas para el estudio (Foto 9)

Foto 9. Se obtuvo el difractograma en un rango entre $5^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$ cada 0.04° , 1 segundo por paso.

Foto 8. Equipo de DRX.

Foto 9. Portamuestras.

5.1.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica que consiste en radiar electrónicamente (electrones) la muestra para obtener información de ésta. Nos proporciona caracterizaciones texturales, morfológicas y químicas de un gran número de fases. El microscopio electrónico de barrido con detector de energía dispersiva (SEM-EDX) permite obtener imágenes microscópicas de todo tipo de materiales. Las imágenes se pueden obtener con electrones secundarios y retrodispersados, estas últimas nos dan información de variaciones composicionales de la muestra, mientras que las primeras permiten observar la textura y características morfológicas de las fases analizadas. La escala de trabajo comprende aumentos que van desde x20 hasta x300000 en condiciones ideales. Con el

detector de rayos X (EDX) se pueden realizar microanálisis puntuales, zonales y mapeados de elementos mayoritarios en muestras en polvo, lámina delgada, probeta pulida, rotura natural, etc.

El microscopio utilizado es un Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-820 con microanálisis (Foto 10). El software que utiliza el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el EDX Oxford ISIS-Link. El ensayo se realiza en el Centro de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.

En el análisis realizado se han obtenido microanálisis puntuales en muestras en polvo.

Los electrones al interactuar con la muestra proporcionan dos tipos de imágenes y por tanto distinta información:

- Imagen de electrones secundarios (SE): Información superficial y morfológica de la muestra.
- Imagen de electrones retrodispersados (BSE): Información textural basada en la composición de la muestra.

Además esta técnica nos proporciona información de la composición química de una zona en concreto de la muestra, ya que al bombardear el área con electrones se generan rayos x característicos de los elementos existentes en la zona excitada que informan de la composición química de ese punto de la muestra.

Foto 10. Microscopio electrónico de barrido utilizado.

Se analizan los tres residuos CA, CT y CE con el microscopio electrónico de barrido (SEM). Para ello se preparan los residuos sobre un portamuestras cilíndrico de latón sobre el que se adhiere una cinta de doble cara de carbono y sobre ella una parte representativa del residuo que se desea analizar. Una vez preparados los portamuestras se desecan en estufa a 40°C para eliminar la humedad. Posteriormente se recubre con oro la muestra para hacerla conductora.

5.2. PROBETAS DE RESIDUOS DE ARROZ Y CARGAS LIGERAS

En este apartado se definen los ensayos realizados para la caracterización de los compuestos de escayola con cargas ligeras y con los residuos utilizados en este trabajo.

Se realizan ensayos en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid según norma UNE-EN 13279. La temperatura del laboratorio es aproximadamente de 23°C y la humedad relativa es de 26,4%.

Para el OB.2 se realizan probetas con relación A/E=0,6 de referencia, con cargas ligeras y con residuos de arroz. En este objetivo se pretende analizar si los residuos de arroz son viables

como adición a la escayola y para ello se comparan con algunas cargas ligeras utilizadas en la actualidad y por otros investigadores (del Rio Merino, 1999).

5.2.1. Denominación de probetas

Para el objetivo 2 se han realizado probetas de escayola de referencia con relación A/E de 0.6. En las probetas de referencia la denominación (Tabla 17) se compone de un número y la palabra REF detrás, de tal forma que el número indica la relación A/E utilizada para la confección de las probetas.

DENOMINACIÓN	A/E
06 NOR	0.6
06 REF	0.6

Tabla 17. Denominación de las series de referencia (OB.2).

En esta fase se han realizado probetas de escayola con relación A/E de 0.6, cargas ligeras y residuos de arroz.

Cada compuesto se define por una fórmula abreviada de todos sus componentes en la que primero se define la relación agua-escayola del compuesto. El siguiente elemento se refiere al tipo de residuo o carga ligera utilizada en el compuesto, CO (corcho), PE (perlita, AR (arcilla expandida) y PO (poliestireno expandido), CA (cáscara de arroz entera), CT (cáscara de arroz triturada) y CE (ceniza de cáscara de arroz). Y el último elemento, que es un número, se refiere al porcentaje de carga ligera o de residuo de arroz con respecto al peso de escayola utilizado para realizar la pasta. A modo de ejemplo la siguiente tabla muestra la denominación utilizada para el compuesto 06PO6, 06PE8, 06CO10, 06CA1, 06CT2 y 06CE3.

En el ejemplo queda definida la mezcla de la siguiente manera: 0,6 relación agua-escayola por cada 1000 g de escayola se pesan 600 g de agua. PO es el tipo de carga que se ha incorporado, en este caso poliestireno expandido. El valor de 6 corresponde al 6 % de carga ligera incorporada, medida siempre a partir del peso total de la escayola, en este caso el 6% de 1000 g de escayola corresponden a 60 g de poliestireno expandido.

Se sustituye el 6% del peso de la escayola por cada uno de las cargas mencionadas siguiendo la misma metodología utilizada por otros investigadores (Jiménez Rivero, et al., 2014; Serna et al., 2012).

Denominación (fórmula abreviada)	Relación A/E	Tipo de carga	% carga
06 PO 6	0,6	PO: Poliestireno expandido	6 % de PO
06 PE 8		PE: Perlita	8 % de PE
06 CO 10		CO: Corcho	10 % de CO
06 CA1	0,6	CA: Cáscara de arroz	1 % de CA
06CT2		CT: Cáscara triturada	2 % de CT
06CE3		CE: Ceniza de cáscara de arroz	3 % de CE

Tabla 18. Ejemplo de denominación de los compuestos.

En la Tabla 19 se presentan los compuestos realizados con cargas ligeras (OB.2). Se realizan además probetas con 8 y 10% de adición de corcho para poder comparar con los trabajos realizados por otros investigadores (del Rio Merino, 1999).

Denominación	Relación A/E	Carga ligera		
		%	Tipo	Tamaño
06 CO 6	0,6	6%	Corcho	2,5-8 mm
06 PE 6	0,6	6%	Perlita	0-3 mm
06 AR 6	0,6	6%	Arcilla expandida (F-5)	3-8 mm
06 PO 6	0,6	6%	Poliestireno expandido	2 mm
06CO8	0,6	8%	Corcho	2,5-8 mm
06CO10	0,6	10%	Corcho	2,5-8 mm

Tabla 19. Probetas realizadas con cargas ligeras (OB.2).

Las probetas realizadas con residuos de arroz para el OB.2 son las que se presentan en la Tabla 20.

Denominación	Relación A/E	% Carga
06CA6	0,6	6,0%
06 CA8	0,6	8,0%
06CA10	0,6	10,0%
06CT6	0,6	6,0%
06CT8	0,6	8,0%
06CT10	0,6	10,0%
06CE6	0,6	6,0%
06CE 8	0,6	8,0%
06CE10	0,6	10,0%

Tabla 20. Probetas realizadas con incorporación de residuos de arroz.

5.2.2. Caracterización de los compuestos de escayola y cargas

Para la caracterización de los compuestos en esta investigación se realizan los ensayos exigidos por la norma UNE-EN 13279-2. En esta primera parte experimental (OB.2) se realizan ensayos del compuesto en estado fresco:

- Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

Ensayos del compuesto en estado endurecido:

- Densidad
- Dureza Shore C
- Resistencias mecánicas: flexotracción y compresión.

5.2.2.1. Ensayos del compuesto en estado fresco

a) Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

Para la determinación de la relación agua escayola de los compuestos se puede utilizar distintos procedimientos: amasado a saturación y método de la mesa de sacudidas.

El amasado a saturación consiste en determinar la cantidad de conglomerante de escayola en g que es necesaria para saturar 100 g de agua. Obtendremos el resultado al dividir 100 entre el peso inicial del agua y el peso final o saturado.

$$\frac{a}{e} = \frac{100}{P_{\text{saturado}} - P_{\text{inicial}}}$$

Foto 11. Procedimiento de amasado a saturación.

El método de la mesa de sacudidas permite encontrar la consistencia adecuada para que la trabajabilidad se encuentre en los valores adecuados exigidos por la norma en todas las muestras. El método de la mesa de sacudidas se aplica según la normativa UNE EN-13279-2,

se rellena el molde cónico que está colocado en el centro de una placa de cristal. La pasta en exceso se elimina mediante una espátula. Se levanta el molde verticalmente al cabo de 10-15 segundos y se aplican 15 golpes verticales a una velocidad de 1 revolución por segundo.

Foto 12. Método de la mesa de sacudidas.

5.2.2.2. Ensayos del compuesto en estado endurecido

a) Determinación de la dureza superficial Shore C

Este ensayo se realiza según la normativa UNE EN-13279-2. Se determina la huella que deja una fuerza aplicada perpendicularmente en dos de las caras de la probeta que ha estado en contacto con el molde y se toman 3 medidas de cada cara. El resultado será la media de las 18 huellas "m", excluyendo las que se salgan del intervalo 0,9m -1,1m. El durómetro empleado es de la marca Mecánica Científica S.A. (Foto 13).

Foto 13. Determinación de la dureza Shore C.

b) Determinación de la resistencia a flexotracción

Se someten las probetas a ensayo de flexotracción según la normativa UNE EN-13279-2, aplicando una carga perpendicular a la probeta y en el centro de ésta que estará apoyada sobre unos rodillos separados 100 mm Foto 14. La carga se aplica hasta la rotura de la probeta (Foto 15). El resultado final será la media de las 3 probetas ensayadas expresado en MPa o N/mm².

Foto 14. Máquina para ensayo a flexotracción.

Foto 15. Parámetros de ensayo a flexotracción.

c) Determinación de resistencia a compresión

Se someten las probetas a ensayo de compresión según la normativa UNE EN-13279-2, aplicando una carga a los dos trozos de la probeta procedentes del ensayo a flexotracción. Los trozos se colocan en la máquina entre 2 platos de acero de sección 40 x 40 mm con las dos caras que han estado en contacto con el molde apoyando sobre uno de ellos (Foto 16). Se ensayan así hasta su rotura. El resultado será el valor medio de los 6 resultados expresados en MPa o N/mm².

Foto 16. Máquina para ensayo a compresión.

5.3. ESCAYOLA CON ADICIÓN DE RESIDUOS DE ARROZ

Realizamos un estudio en el que se incorporan a la escayola los distintos formatos de residuos de arroz, CA, CT y CE (OB.3), para ello realizamos las siguientes fases:

- FASE 1: Se realizan probetas con la máxima cantidad de residuo en cada formato, se realizan los ensayos definidos en el apartado 5.2 y además se analizan la absorción de agua por capilaridad y la retención de agua de los compuestos.
- FASE 2: En esta fase del plan experimental se realiza una comparativa entre las densidades y el comportamiento mecánico de los compuestos y se obtienen datos de adherencia superficial y coeficiente de conductividad térmica de los compuestos que cumplen el ensayo de consistencias. Además se realiza un estudio estadístico en el que se analiza la influencia de los factores A/E, tipo de residuo y % de residuo en los resultados obtenidos en esta Tesis (Anexo 1).

Para el OB.3 se han realizado probetas de escayola de referencia con relación A/E de 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 (Tabla 17).

DENOMINACIÓN	A/E
06 REF	0,6
07 REF	0,7
08 REF	0,8
09 REF	0,9

Tabla 21. Denominación de las series realizadas con pasta de escayola-agua (FASE 1).

En este apartado se definen los compuestos realizados con los residuos CA, CT y CE, incorporando desde el mínimo porcentaje hasta el máximo admitido por la trabajabilidad del compuesto. A continuación se presentan en la Tabla 22 los compuestos realizados con escayola y residuo de cáscara de arroz (CA).

DENOMINACIÓN	RELACIÓN A/E	% CARGA CA
06 CA 0,5	0,6	0,5 %
06 CA 1	0,6	1,0 %
06 CA 1,5	0,6	1,5 %
06 CA 2	0,6	2,0 %
06 CA 2,5	0,6	2,5 %
06 CA 3	0,6	3,0 %
06 CA 3,5	0,6	3,5 %
06 CA 4	0,6	4,0 %
06 CA 4,5	0,6	4,5 %
06 CA 5	0,6	5,0 %
06 CA 5,5	0,6	5,5 %
06 CA 6	0,6	6,0 %
06 CA 8	0,6	8,0%
06 CA 10	0,6	10,0%
07 CA 6	0,7	6,0%
07CA10	0,7	10,0%
07CA15	0,7	15,0%
07CA20	0,7	20,0%
08 CA 0,5	0,8	0,5 %
08 CA 1,5	0,8	1,5 %
08 CA 2	0,8	2,0 %
08 CA 5	0,8	5,0%
08 CA 6	0,8	6,0%
08 CA 7	0,8	7,0%
08 CA 8	0,8	8,0%
08 CA 10	0,8	10,0%
08 CA 13	0,8	13,0%
08 CA 15	0,8	15,0%
08 CA 20	0,8	20,0%
09 CA 10	0,9	10,0%
09 CA 15	0,9	15,0%
09 CA 20	0,9	20,0%

Tabla 22. Probetas realizadas con incorporación de cáscara de arroz.

En la Tabla 23 se presentan todas las probetas realizadas en las que se incorporan residuos de cáscara de arroz triturada (CT)

DENOMINACIÓN	RELACIÓN A/E	% CARGA CT
06 CT 6	0,6	6,0%
06 CT 8	0,6	8,0%
06 CT 10	0,6	10,0%
07CT 6	0,7	6,0%
07CT 10	0,7	10,0%
07CT 15	0,7	15,0%
07CT 20	0,7	20,0%
08 CT 6	0,8	6,0%
08 CT 7	0,8	7,0%
08 CT 8	0,8	8,0%
08 CT 10	0,8	10,0%
08 CT 15	0,8	15,0%
08 CT 20	0,8	20,0%
09 CT 10	0,9	10,0%
09 CT 15	0,9	15,0%
09 CT 20	0,9	20,0%

Tabla 23. Probetas realizadas con incorporación de cáscara triturada.

En la Tabla 24 se presentan las probetas realizadas con residuos de cenizas de cáscara de arroz (CE).

DENOMINACIÓN	RELACIÓN A/E	% CARGA CE
06 CE 3	0,6	3,0%
06 CE 4	0,6	4,0%
06 CE 4,5	0,6	4,5%
06 CE 5	0,6	5,0%
06 CE 6	0,6	6,0%
06 CE 8	0,6	8,0%
06 CE 10	0,6	10,0%
07 CE 6	0,7	6,0%
07 CE 10	0,7	10,0%
07 CE 15	0,7	15,0%
07 CE 20	0,7	20,0%
08 CE 6	0,8	5,0%
08 CE 6	0,8	6,0%
08 CE 7	0,8	7,0%
08 CE 8	0,8	8,0%
08 CE 10	0,8	10,0%
08 CE 15	0,8	15,0%
08 CE 20	0,8	20,0%
09 CE 10	0,9	10,0%
09 CE 15	0,9	15,0%
09 CE 20	0,9	20,0%

Tabla 24. Probetas realizadas con incorporación de ceniza.

Se define a continuación la metodología seguida para realizar los ensayos correspondientes al apartado 5.3.

5.3.1. Ensayos realizados en la FASE 1

En la fase 1 se realizan los ensayos para determinar la capacidad de retención de agua del compuesto así como su absorción de agua por capilaridad.

5.3.1.1. Determinación de la capacidad de retención de agua

Se determina la densidad aparente húmeda según la norma UNE-EN 1936-2006 dividiendo el peso de la probeta entre el volumen de esta (160x40x40 mm³). Se obtendrán así las densidades aparentes húmedas. Se determina la densidad aparente seca según la norma UNE-EN 1015-10:2000/A1 transcurridos 7 días desde su desmoldado y una vez desecadas en estufa hasta peso constante a 35-40°C, temperatura distinta a la de la norma, ya que algunas probetas llevan un componente orgánico.

Se determina la capacidad de retención de agua según la norma UNE-EN 1936-2006 mediante la siguiente relación:

$$((d_{ah} - d_{as})/d_{as}) \times 100$$

Siendo d_{ah} la densidad aparente húmeda de las probetas según se desmoldan y d_{as} la densidad aparente seca a los 7 días. Ambas densidades obtenidas según lo descrito en el apartado 5.1.

5.3.1.2. Determinación de absorción de agua por capilaridad

Para determinar el nivel de ascensión de agua por capilaridad que experimenta el material se sigue la norma (RILEM TC 25-PEM, 1980).

Se disponen las probetas, previamente desecadas, en posición vertical en un recipiente lleno de agua hasta una altura de 1 cm poniendo el cronómetro en marcha en el momento en el que se introducen éstas en el recipiente Foto 17. Cada minuto se marca en las probetas el nivel de ascensión de humedad que ha sufrido, dando por finalizado el ensayo cuando han transcurrido 10 minutos. Se obtiene así el nivel expresado en mm como resultado del ensayo.

Foto 17. Ensayo de absorción de agua por capilaridad.

5.3.2. Ensayos realizados en la FASE 2

En la fase 2 se realizan los ensayos para determinar la adherencia de los compuestos y su conductividad térmica.

5.3.2.1. Determinación de la adherencia

Se determina la adherencia según la normativa UNE EN 13279-1:2009 mediante la máxima carga que soporta la probeta cuando un disco de metal pegado a la escayola se arranca de forma perpendicular a su superficie. El equipo de medida consta de:

1. Discos de metal de 50 mm de $\varnothing$ y con un espesor no menor a 10 mm, con un dispositivo central para realizar tracciones.
2. Adhesivo a base de resina (resina epoxi o de metacrilato).
3. Broca para cortar probetas de escayola endurecida de $50\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ de $\varnothing$.
4. Aparato de tracción que aplica una carga sobre los discos de metal sin que el conjunto se vea sometido a una carga de flexión. El manómetro de lectura tiene una precisión en la medición de $\pm 5\%$ de la carga máxima registrada (Foto 20).
5. El soporte empleado son ladrillos cerámicos hueco sencillo que previamente ha sido humedecidos.

Foto 18. Preparación soporte.

Foto 19. Probetas terminadas.

Se realizarán las mezclas a ensayar según el apartado 5.6.2 (confección de probetas) y se aplicarán sobre el soporte cerámico y con espesor de 1 cm (Foto 18).

Las probetas se mantendrán durante 7 días en la atmósfera de ensayo (Foto 19) y posteriormente se realizará con la broca un corte a una profundidad de 5 mm aproximadamente para separar la masa a ensayar del resto, posteriormente se pega el disco de metal centrado sobre la probeta evitando su unión con la parte de la masa sobre la que no se va a realizar el ensayo (Foto 21). Se aplica la carga de forma perpendicular a la

superficie del ensayo mediante el aparato de tracción descrito anteriormente (Foto 20). La carga debe aplicarse a una velocidad constante comprendida entre 0.003 N/mm² y 0.1 N/mm² por segundo.

Foto 20. Aparato de tracción.

Foto 21. Probetas preparadas.

Foto 22. Probetas ensayadas.

Una vez ensayadas las probetas (Foto 22), la resistencia a la adherencia se calcula como:

$$R_U = \frac{F_U}{A}$$

Donde:

R_U es la fuerza de adherencia en N/mm²

F_U es la carga de rotura en N

A es el área de ensayo en la probeta cilíndrica en mm²

La adherencia se calculará como el valor medio de los valores individuales y se expresa con una precisión de 0.01 N/mm².

Si la rotura se produce en la interfase escayola-soporte (rotura tipo A o por adhesión) el valor de la resistencia de adherencia coincide con el resultado indicado en el dispositivo de ensayo, pero si la rotura se produce en la masa de escayola (rotura tipo

B o por cohesión) o en el soporte (rotura tipo C o por cohesión), entonces los valores de la resistencia son superiores a los indicados por el dispositivo.

5.3.2.2. Determinación de la conductividad térmica

En los materiales de construcción una de las propiedades más estudiadas es la conductividad térmica, ya que si éstos forman parte de un trasdosado deberán ser aptos térmicamente. En la Tabla 25 se incluyen las conductividades térmicas de algunos materiales.

Coeficiente de conductividad térmica de algunos materiales		
Material	Densidad aparente ρ (kg/m ³)	Conductividad Térmica λ (W/mk)
Morteros de cemento o cal para revoco o enlucido	$1250 < \rho \leq 1450$	0,70
Morteros de áridos ligeros (vermiculita, perlita)	$\rho \leq 1000$	0,41
Mortero de yeso	$\rho \leq 1600$	0,80
Enlucido de yeso	$1000 \leq \rho \leq 1300$ $\rho \leq 1000$	0,57 0,40
Enlucido de yeso con perlita o vermiculita	$800 \leq \rho \leq 900$ $500 \leq \rho \leq 600$	0,30 0,18
Placa de yeso o escayola	$750 \leq \rho \leq 900$	0,25
Placa de yeso laminado	$750 \leq \rho \leq 900$	0,25
Placa de yeso armado con fibras minerales	$800 \leq \rho \leq 1000$	0,25
Placas de corcho	> 400	0,065

Tabla 25. Conductividades térmicas de algunos materiales.

Para determinar la resistencia térmica se realiza un ensayo no normalizado que establece de forma comparativa el comportamiento del material y se obtiene el coeficiente de conductividad térmica del compuesto. En el ensayo se registran las temperaturas de los distintos compuestos ensayados por medio de la transmisión de calor en régimen estacionario.

El equipo de medida está formado por:

1. Cubo aislado con cuatro caras abiertas con paredes móviles (Foto 23).
2. Termostato.
3. Instrumento de medida de temperaturas con dos termopares de NiCr-Ni.
4. Cronómetro.
5. Cinta adhesiva.
6. Fuente de calor.

Foto 23. Equipo utilizado

Foto 24. Interior del cubo aislado

El cubo tiene en su interior (Foto 24), una fuente de calor generada por una bombilla de 100W y una sonda térmica conectada al termostato. Además en sus aristas hay practicados unos orificios que permiten introducir las sondas térmicas. Las aberturas laterales del cubo (Foto 26) son de 21x21cm y los materiales que a ensayar se sujetan a estas con dos tornillos de presión en su parte interior. En su parte exterior estas aberturas tienen unos soportes para poder adosar planchas de material aislante de 21x21 cm (Foto 25). La parte superior del cubo tiene una tapa de acceso al interior que esta convenientemente aislada y se fija al cubo mediante cuatro tornillos.

Las paredes del cubo están dispuestas de la siguiente manera:

- Las paredes denominadas 1,2 y 4 están compuestas, del interior del cubo hacia el exterior, por una placa de poliestireno expandido de 1 cm de espesor y adosada a ella una placa de madera de 2 cm de espesor. El contacto con el exterior se realiza mediante una última placa de poliestireno expandido de 1 cm de espesor. (ver foto interior cubo).
- La pared número 3 es la que alberga la placa sometida a ensayo que tiene 3cm de espesor y a ella esta adosada una placa de poliestireno expandido de 1 cm de espesor.

Foto 25. Detalle lateral y tapa.

Foto 26. Detalle de una de las paredes.

Para los cálculos se utilizarán los coeficientes de conductividad de los materiales empleados:

$$\lambda_{\text{EPS}} = 0,037 \text{ Wk}^{-1}\text{m}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{aire}} = 0,02 \text{ Wk}^{-1}\text{m}^{-1}$$

El ensayo se realiza de la siguiente manera:

Se pasan a través de la abertura lateral de la arista del cubo las dos sondas correspondientes al medidor de temperatura, una se coloca a media altura y registra la temperatura del interior del cubo (T_{int}). La segunda sonda se fija con papel adhesivo al centro de la cara a medir y registrará la temperatura (T_1). Del otro medidor se fija con papel adhesivo una de las sondas a la cara intermedia de los dos materiales y se registra la temperatura correspondiente a la otra cara de la placa a ensayar (T_2). La otra sonda se coloca en el exterior para registrar la temperatura exterior de la pared (T_3). Por último se anota la temperatura del laboratorio (T_{ext}).

Una vez colocada la placa, las sondas y una vez que la temperatura del interior del cubo se ha estabilizado se procede a anotar las temperaturas correspondientes a las 5 sondas, cada minuto durante cinco minutos (Foto 27).

Foto 27. Obtención de datos del ensayo.

5.3.2.3. Coeficiente de conductividad térmico C-Therm TCi

Se realiza este ensayo en los compuestos seleccionados para obtener un parámetro de conductividad que permitan comprobar la variación de los datos obtenidos con el ensayo definido en el apartado anterior.

El equipo C-Therm TCi consta de un sensor sobre el que se coloca la muestra a ensayar. Para asegurar el contacto correcto entre el sensor y la muestra se utiliza un agente de contacto y si es necesario también un peso. El equipo debe ser previamente calibrado para el tipo de agente de contacto utilizado, que en este caso será una grasa térmica de la marca Wakefield.

Mediante este ensayo se consigue directamente el coeficiente de conductividad térmico en W/mK.

Foto 28. Equipo C-Therm TCi.

5.4. COMPUESTOS SELECCIONADOS: APLICACIONES

En esta parte del plan experimental (OB.4) se proponen aplicaciones de los compuestos seleccionados en base a los siguientes ensayos:

- Principio de fraguado
- Microscopía (SEM)
- Porosidad
- Comportamiento ante la humedad
- Ciclo agua-estufa
- Absorción de agua por capilaridad
- Heladicidad
- Módulo de Young
- Comportamiento ante impacto de cuerpo duro
- Análisis como material de revestimiento

5.4.1. Caracterización de los compuestos

5.4.1.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Como se ha comentado anteriormente, la microscopía electrónica de barrido (SEM) nos proporciona caracterizaciones texturales, morfológicas y químicas de un gran número de fases. Permite obtener imágenes microscópicas de todo tipo de materiales. Las imágenes se pueden obtener con electrones secundarios y retrodispersados, estas últimas nos dan información de variaciones composicionales de la muestra, mientras que las primeras permiten observar la textura y características morfológicas de las fases analizadas. La escala de trabajo comprende aumentos que van desde pocas decenas hasta 300000 en condiciones ideales. Con el detector de rayos X (EDX) se pueden realizar microanálisis puntuales, zonales y mapeados de elementos mayoritarios en muestras en polvo, lámina delgada, probeta pulida, rotura natural, etc.

El microscopio utilizado es un Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-820 con microanálisis (Foto 29). El software que utiliza el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el EDX Oxford ISIS-Link. El ensayo se realiza en el Centro de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.

En el análisis realizado se han obtenido microanálisis puntuales en muestras en rotura natural.

Los electrones al interactuar con la muestra proporcionan dos tipos de imágenes y por tanto distinta información:

- Imagen de electrones secundarios (SE): Información superficial y morfológica de la muestra.
- Imagen de electrones retrodispersados (BSE): Información textural basada en la composición de la muestra.

Además esta técnica nos proporciona información de la composición química de una zona en concreto de la muestra, ya que al bombardear el área con electrones se generan rayos x característicos de los elementos existentes en la zona excitada que informan de la composición química de ese punto de la muestra.

Foto 29. Microscopio electrónico de barrido utilizado.

Se analizan la referencia 07REF y tres compuestos 07CA10, 07CT20 y 07CE15 con el microscopio electrónico de barrido (SEM). Para ello se obtiene un fragmento representativo de la probeta, sin que se deteriore el estado del compuesto, y se coloca sobre un portamuestras al que previamente se le ha impregnado de Loctite para que la adherencia entre éste y el compuesto sea máxima. Una vez preparadas las muestras se introducen en estufa a 40°C para eliminar la humedad. Posteriormente se procede a metalizar con oro el conjunto para hacerlo conductor.

5.4.1.2. Determinación de la porosidad abierta y total

Se determina la porosidad de las probetas de escayola y los compuestos según la norma UNE-EN 1936 "Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total" ya que no existe una norma específica para yesos o escayolas. El procedimiento para la determinación de la porosidad abierta y la total se resume a continuación.

Primero se determina la densidad aparente (d_b) y la porosidad abierta (P_0) mediante las siguientes expresiones:

$$d_b = \frac{m_d \text{ (masa seca)}}{v_b \text{ (volumen aparente)}}$$

$$P_0 = \frac{V_0 \text{ (volumen poros abiertos)}}{v_b \text{ (volumen aparente)}} \times 100$$

Las probetas deben tener forma de cilindro, cubo o prisma. Su volumen aparente (calculado por medios geométricos) debe ser como mínimo de 60 ml y la relación entre el área de la superficie y el volumen debe estar comprendido entre 0,08 mm⁻¹ y 0,20 mm⁻¹. Las probetas se desecan a temperatura (70±5)°C hasta masa constante (cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de (24±2) horas, no es superior al 0,1% de la masa de la probeta) y se mantienen en desecador hasta el ensayo. Se pesan y se anota la masa seca (m_d) de cada probeta.

Para calcular el volumen aparente y el volumen de poros abiertos hace falta la masa saturada y la masa bajo agua (pesada hidrostática). Para la masa saturada la norma utiliza una cámara de vacío para extraer el aire de los poros y forzar la absorción de agua y posteriormente efectúa el llenado de agua de la cámara.

Un procedimiento alternativo y utilizado en esta tesis es sumergir las probetas en agua destilada hasta masa constante, obteniendo así, la masa saturada y la masa bajo el agua. Se utilizan las siguientes expresiones:

$$V_0(\text{volumen poros abiertos}) = \frac{\text{masa saturada} - \text{masa seca}}{\text{densidad del agua}}$$

$$v_b(\text{volumen aparente}) = \frac{\text{masa saturada} - \text{masa bajo agua}}{\text{densidad del agua}}$$

$$d_b(\text{densidad aparente}) = \frac{\text{masa seca}}{\text{volumen aparente}}$$

$$P_0(\text{porosidad abierta \%}) = \frac{V_0(\text{volumen poros abiertos})}{v_b(\text{volumen aparente})} \times 100$$

También se puede obtener la absorción tras el tiempo de inmersión con la siguiente expresión:

$$A = \frac{\text{masa saturada} - \text{masa seca}}{\text{masa seca}} \times 100$$

5.4.1.3. Determinación del principio de fraguado de las pastas

Se ha utilizado el método de la aguja de Vicat para determinar el principio de fraguado, en minutos, de las dosificaciones elegidas, según el método descrito en la norma UNE-EN-13729-2:2006. Una vez amasada la pasta a ensayar se rellena un molde de caucho y se obtiene el tiempo de principio de fraguado cuando la aguja penetra en la pasta la medida de (22 ± 2) mm. Se determina el principio de fraguado para los compuestos finales y la referencia. El dispositivo utilizado es el que se observa en la Foto 30.

Foto 30. Método de Vicat en los distintos compuestos.

El tiempo que determina el principio de fraguado T_i , en minutos, se determina utilizando la siguiente expresión:

$$T_i = t_1 - t_0$$

Donde:

t_1 es el tiempo, en minutos, en que la profundidad de penetración del cono en la pasta de yeso llega a (22 ± 2) mm por encima de la placa de vidrio.

t_0 es el tiempo, en minutos, en que el yeso se pone en contacto con el agua.

5.4.1.4. Determinación del módulo de Young estático

Para determinar el módulo de Young estático se procede de la siguiente manera.

Foto 31. Ensayo para Módulo de Young.

Foto 32. Parámetros obtenidos en el ensayo.

Se acoplan a la probeta unos extensores y se procede a realizar el ensayo comprimiendo la probeta longitudinalmente como se puede observar en la Foto 31. Los parámetros obtenidos en el ensayo son los que se muestran en la Foto 32. A partir de dichos datos numéricos se calcula el módulo de Young mediante rotura a compresión "E" en MPa.

5.4.1.5. Determinación del módulo de Young dinámico por ultrasonidos

El módulo de elasticidad dinámico se determinó mediante la velocidad de propagación de ultrasonidos a través del compuesto de escayola endurecido. Las lecturas de tiempo de paso se realizan longitudinalmente en la probeta, tal y como se puede apreciar en la Foto 33. Para favorecer la correcta transmisión de las ondas sonoras se aplica un gel en las dos caras de la probeta donde se coloca el emisor y el receptor.

Foto 33. Ensayo de Módulo de Young dinámico por ultrasonidos.

5.4.1.6. Ensayo de impacto

Se realiza un ensayo no normalizado para analizar por comparación el comportamiento de los compuestos ante un impacto. El ensayo se realiza de la siguiente forma:

- Se realizan revestimientos de 8 mm de espesor sobre soportes cerámicos y sobre bloques de hormigón.
- Una vez secos se deja caer una bola de 439,4 g de peso y 47,5 mm de diámetro desde una altura de 33 cm (Foto 34).

Se obtendrán datos de la profundidad y el diámetro de la huella de impacto en mm.

Foto 34. Ensayo de impacto.

5.4.2. Comportamiento ante el agua y la humedad

5.4.2.1. Comportamiento a ciclos agua-estufa

A continuación se determina el procedimiento seguido para este ensayo no normalizado realizado por (del Rio Merino, 1999):

- Se introducen las probetas en una cubeta con agua de manera que quedan perfectamente sumergidas (Foto 35).
- Transcurridos dos días se sacan y se pesan y posteriormente se dejan en estufa durante dos días para que se sequen (Foto 36).
- Se ensayan a flexión y a compresión.

El ensayo permite determinar: la capacidad de absorción de agua, la capacidad para secarse y para perder o no sección, y el comportamiento mecánico de las probetas secas después de someterlas a uno o dos ciclos agua-estufa.

Foto 35. Ciclo de agua.

Foto 36. Ciclo de estufa.

5.4.2.2. Determinación de la resistencia a la heladicidad

Para determinar el comportamiento de los compuestos frente a la helada se ha adaptado el ensayo de la norma UNE-EN 12371 que hace referencia a piedra natural, ya que no existen una norma específica de ensayos para yesos o escayolas.

Foto 37. Período de congelación de probetas.

El ensayo se realiza sobre probetas prismáticas de 160mm x 40 mm x 40 mm que se someten a ciclos de hielo/deshielo hasta 5 días. El procedimiento de cada ciclo del ensayo es el siguiente:

- Período de congelación: Se colocan las probetas horizontalmente en la cámara de heladidad procurando que no haya contacto entre ellas ni con las paredes de la cámara, donde permanecen 12 horas entre -8°C y -12°C (Foto 37).
- Período de descongelación: Se sumergen las probetas en agua a temperatura entre 10°C y 30°C durante 12 horas.
- Período ambiente: Se sacan las probetas del agua y se dejan secar al aire 12 horas.

Una vez finalizados los ciclos se examinan las probetas y se someten a ensayo de flexotracción para obtener la pérdida de dicha resistencia después de los ciclos.

5.4.2.3. Capacidad de absorción de la humedad

Para determinar el comportamiento de los compuestos ante la humedad se realizan ensayos no normalizados que establecen de forma comparativa, el comportamiento ante la humedad y el agua del compuesto. Se sigue el mismo procedimiento que Del Río Merino utilizó en su tesis doctoral.

- Se introducen las probetas en cámara húmeda (temperatura 21°C y HR 72%), hasta cinco días, tomando nota cada día de los incrementos de peso que se producen.
- Pasados los siete días se ensayan las probetas a flexión y compresión.

5.4.2.4. Ensayos realizados sobre la aplicación de revestimiento

Se realizan sobre soporte cerámico y de hormigón un guarnecido de 8mm de espesor con escayola y residuos de arroz. Una vez seco el guarnecido se procede a realizar un posterior enlucido de 1,5 mm de espesor sobre el que se aplica una vez seco una capa de pintura. De esta manera se pretende realizar un análisis visual del comportamiento del compuesto aplicado en revestimiento de paramentos.

5.5. ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE MATERIA PRIMA DE LOS COMPUESTOS

La metodología utilizada para la obtención del porcentaje de reducción de materia prima se basa en el método utilizado por Santa Cruz et al. (2015), en el que se obtiene dicho porcentaje a partir del peso húmedo de las probetas, del peso seco y de la densidad de los distintos materiales que componen la probeta (Santa Cruz Astorqui et al., 2015).

5.6. MATERIALES Y CONFECCIÓN DE PROBETAS

5.6.1. Materiales

Escayola: La escayola utilizada en el plan experimental es Iberplaco E-35 (Foto 38). Esta escayola se utiliza para la realización de elementos prefabricados para construcción como decorativos, para agarre, repaso, rejuntado y relleno de dichos elementos. La escayola puede proceder de distintas fábricas: Viguera VA, Gelsa GA, Soneja SO, Morón MN y San Martín SN y sus características técnicas pueden variar (Manual Placo). En la Tabla 26 se presentan las características de la escayola utilizada en esta Tesis:

Característica	Valor
Índice de pureza (%)	> 90-92
Granulometría (mm)	0-0,2
Resistencia mecánica a flexión (N/mm ²)	3-3,5
Tiempo de empleo (minutos)	13-22
Coefficiente de conductividad térmica λ (W/mK)	0,30-0,34
Relación A/Y (litros/kg)	0,7-1,0
PH	≥ 6
Temperatura de aplicación recomendada (°C)	5-40

Tabla 26. Características de la escayola E-35 (Manual Placo).

Foto 38. Escayola utilizada en el proceso experimental.

Corcho: Se ha utilizado corcho natural granulado con diámetros comprendidos entre 2,5 y 8 mm (Foto 39). Proviene de la sierra de Espadán (Castellón), 100% natural y procedente del desecho de la fabricación de tapones de corcho para botellas. La empresa suministradora es Arkisoi bioconstrucción.

Foto 39. Corcho utilizado en el proceso experimental.

Perlita: La perlita es un silicato volcánico amorfo que tiene un contenido de agua relativamente alto. Es un mineral que tiene la propiedad de expandirse cuando se calienta (1000-1300°C) ya que el agua ocluida se transforma en vapor y esto causa la expansión del material hasta 20 veces su volumen inicial. Es un excelente aislante térmico y acústico, incombustible e imputrescible y se utiliza en rellenos o mezclado con cemento, yeso o escayola (Del Río et al. 98).

La perlita utilizada es de Navarro Pérez S.L. con una granulometría comprendida entre 0-5 mm (Foto 40) y tiene las siguientes características (Tabla 27).

Color	Densidad aparente	Densidad compactada	Humedad relativa	Conductividad térmica
Blanco	50-80 kg/m ³	60-100 kg/m ³	< 2%	≤ 0.04 W/mK

Tabla 27. Características de la perlita (Navarro Pérez S.L.).

Su composición química es la que aparece en la Tabla 28.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	H ₂ O (agua combinada)
70-80%	12-16%	2-5%	2-5%	0-2%	0-1%	0-1%	< 1%

Tabla 28. Propiedades químicas de la perlita (Francisco Navarro Pérez S.L.)

Foto 40. Perlita utilizada en el proceso experimental.

Arcilla expandida: La arcilla expandida se obtiene mediante cocción a elevadas temperaturas (1200°C) de arcillas especiales. De esta forma la arcilla se transforma en partículas esféricas, porosas y ligeras. Los diferentes tipos y sus características aparecen en la Tabla 29.

DENOMINACIÓN	TAMAÑO (mm)	DENSIDAD APARENTE (kg/m ³)
G-3	10-16	325±50
F-3	3-10	350±50
F-5	3-10	550±50
F-7	3-10	750±50
A-5	0-5	575±50

Tabla 29. Características de los diferentes tipos de arcilla expandida (Manual Arlita).

Foto 41. Arcilla expandida utilizada en el proceso experimental.

La arcilla expandida utilizada (Foto 41) corresponde a la denominada F-5 con tamaño de grano comprendido entre 3-10 mm de la empresa ARLITA.

Poliestireno expandido: El poliestireno expandido es un material plástico celular y rígido que se obtiene a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros, que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire (ANAPE). Es un material 100% reciclable y algunas de sus características son las siguientes:

- Excelente capacidad de aislamiento térmico, ya que la propia estructura del material es aire ocluido dentro de una estructura celular, donde aproximadamente el 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% materia sólida (poliestireno).
- No es higroscópico y sumergido en agua los niveles de absorción son mínimos (1-3% en volumen en inmersión de 28 días).
- En caso de combustión las emisiones de gases son moderadas.
- Es imputrescible, no enmohece y no se descompone.

Se ha utilizado poliestireno expandido granulado en perlas de granulometría 2 mm (Foto 42).

Foto 42. Poliestireno expandido utilizado en el proceso experimental.

Cáscara de arroz: La cáscara de arroz utilizada procede del Molino de arroz que pertenece a Herba Ricemills. S.L.U (Grupo Ebro Puleva) situado en San Juan de Aznalfarache Sevilla (España). Según datos disponibles en Mapama (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente) la información del sustrato (CA) es la siguiente:

Propiedades físicas del sustrato	
Humedad	10 % en origen
Densidad real	1,58 g/cm ³
Densidad aparente	0,084 g/cm ³
Espacio poroso total	94,7 % vol.
Capacidad de aireación (vol. aire a 10cm de c.a.)	86,1 % vol.
Volumen de agua a 10 cm de c.a.	8,6% vol.
Capacidad de retención de agua	86 g/l sustrato
Contracción	No apreciable

Tabla 30. Propiedades físicas de la cáscara de arroz (MAPAMA, 2017a).

Además la materia orgánica total del sustrato cáscara de arroz es de un 81,4%.

Los tres formatos que se han utilizado son: cáscara de arroz (CA), cáscara triturada (CT) y ceniza de cáscara de arroz (CE) (Foto 43). La cáscara de arroz triturada (CT) proviene del mismo molino previamente triturada. La ceniza de cáscara de arroz (CE) se obtiene a partir de la combustión de la cáscara alcanzando elevadas proporciones de sílice en su composición. Sus principales características indican que podría ser un buen combustible (Armesto, et al., 2002).

Foto 43. Tipos de residuo utilizados en los ensayos.

Dependiendo de la temperatura de calcinación de la cáscara la ceniza varía de tonalidad y de aspecto (Figura 20). La ceniza utilizada en este trabajo es de color negro, lo que indica que tiene alto contenido en carbón, es decir no se ha oxigenado lo suficiente la cáscara durante su combustión (I Águila, 2001).

Figura 20. Tipos de cenizas en función de la temperatura de calcinación (I Águila, 2001).

También se insiste en que para la fabricación de las probetas no se ha realizado ningún tratamiento previo a los residuos, es decir, se utilizan según se reciben del molino sito en San Juan de Aznalfarache (Sevilla), además no se han utilizado aditivos o refuerzos cuyo uso complican el compromiso con el medioambiente de este trabajo de investigación. Donde además, se ha utilizado como matriz un conglomerante yeso/escayola abundante y cuya obtención no suponen procesos de alto impacto ambiental.

5.6.2. Confección de probetas

En este apartado se define la metodología que se sigue en la confección de todas las probetas realizadas en la parte experimental, es decir la metodología seguida para los objetivos 2, 3 y 4.

Se realizan probetas de 40x40x160 mm³ según normativa UNE-EN 13279 con escayola E-35. En primer lugar, se pesan los componentes de la pasta agua y escayola que dependerán de la relación agua escayola elegida. Se utilizan para ello un peso con precisión ± 0.01 g y recipientes normalizados y limpios (Foto 44).

Se vierte en un recipiente el agua pesada y se espolvorea durante 30" la cantidad necesaria de escayola. Se deja reposar y se procede al amasado un minuto manualmente y durante otro minuto con mezcladora amasadora, con movimientos de rotación y movimiento planetario según lo indicado en la normativa.

Como para la confección de probetas con cargas ligeras y con residuos de arroz se procederá amasando sólo manualmente, se realizan probetas de referencia con amasado manual durante 2 minutos y así poder comparar resultados entre ambos métodos (Foto 45).

Foto 44. Peso utilizado

Foto 45. Máquina de amasar.

Para la preparación de las probetas de escayola con residuo de cáscara de arroz, se procede de la siguiente manera según la norma UNE EN 13279-2:

- Se pesan los componentes agua, escayola que dependerán de la relación agua escayola elegida y se añade el residuo de cáscara de arroz calculando su peso a partir del porcentaje elegido y sobre el peso de escayola utilizado.
- Se realiza la mezcla en seco de la cáscara de arroz con la escayola hasta conseguir un reparto homogéneo de la cáscara en la escayola (Foto 46)

Foto 46. Mezcla en seco de la escayola y la cáscara.

Foto 47. Flotación de la cáscara.

- Se vierte en un recipiente el agua pesada y se espolvorea durante 30" la escayola y la carga adicionada. Se deja reposar y se observa que la mezcla pierde su homogeneidad ya que la cáscara de arroz flota en el agua en un porcentaje muy alto (Foto 47), teniendo que prolongar el amasado más de dos minutos para obtener un reparto homogéneo de la cáscara en la pasta.

Por tanto, para evitar la flotación del residuo, el tiempo prolongado de amasado y poder obtener así una mezcla homogénea y uniforme de la pasta final, se procede en el amasado de todos los compuestos de la siguiente manera, distinta a la que hace referencia la normativa UNE EN 13279-2:

- Se vierte en un recipiente el agua pesada y se espolvorea durante 30" la escayola. Se deja reposar y se procede al amasado manual:
- Se amasa un minuto el agua y la escayola. Posteriormente, se añade el residuo de cáscara de arroz sin detener el amasado (Foto 48) y se prolonga hasta los 3 minutos para conseguir un reparto uniforme de la cáscara en la pasta.

Foto 48. Mezcla de la cáscara en la pasta agua-escayola.

- Se realiza el ensayo de la mesa de sacudidas (Foto 49) para determinar el diámetro ($\varnothing$) de escurrimiento.

Foto 49. Mesa de sacudidas.

Se rellenan los moldes normalizados cuidando el correcto relleno de huecos y esquinas, y evitando la aparición de burbujas de aire (se eleva el molde de su extremo superior ± 1 cm y se deja caer 10 veces). Se elimina el material sobrante con una regla metálica (Foto 50).

Foto 50. Relleno de moldes.

En el caso de las probetas con residuos de CA se complica el enrase de las probetas cuando el porcentaje de cáscara es alto, ya que con la regla se arrastra parte de la cáscara de arroz (Foto 51).

Foto 51. Probetas de CA terminadas.

Se desmoldan las probetas cuando la pasta haya adquirido el grado adecuado de resistencia (Foto 52), se identifican y se dejan a temperatura ambiente durante 7 días (Foto 53).

Foto 52. Desmoldado de probetas

Foto 53. Probetas a temperatura ambiente.

Transcurridos los 7 días las probetas se desecan hasta masa constante a una temperatura de $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ (Foto 54) y posteriormente se enfrían en desecador (Foto 56) hasta la temperatura de laboratorio (Foto 55).

El procedimiento seguido en las probetas realizadas con cáscara de arroz se aplica también a la realización de probetas con cargas ligeras, cáscara triturada y con ceniza de cáscara de arroz. En total se elaboraron 81 mezclas con distintas consistencias y porcentajes de residuo para determinar así las más adecuadas para la finalidad de este trabajo de investigación.

Foto 54. Probetas en estufa.

Foto 55. Probetas preparadas para ensayar.

Foto 56. Desecador de vidrio.

Para la realización de otros ensayos, como adherencia, resistencia térmica, determinación de la capacidad de retención de agua, absorción de agua por capilaridad y microscopía electrónica de barrido, el procedimiento seguido para la elaboración de la pasta en todos los casos es el mismo.

En cuanto a las relaciones A/E analizadas son: las más utilizadas en la industria de la construcción, las propuestas por el fabricante Iberyola E-35 y las que han sido estudiadas por otros investigadores como Del Río, Rivero y Madariaga, entre otros.

Se analiza la relación $A/E=0,6$ ya que es la menor relación estudiada por otros investigadores como González Madariaga, Del Río Merino, Gutiérrez González, Romaniega Piñeiro, Berná Serna y Oteiza San José entre otros. (Berná Serna, 2013; del Río Merino, 1999; Francisco Javier González Madariaga, 2008; Gutiérrez González, et al., 2012; Oteiza, 1993; Romaniega Piñeiro, et al., 2015).

Se realizan probetas con $A/E=0,7$ ya que el método de amasado a saturación que marca la norma UNE-EN 13279-2, obtiene esa relación agua escayola para el conglomerante utilizado en esta tesis (E-35), además, este valor está comprendido entre los determinados por el fabricante (0,7-0,8). Por otro lado, esta relación ha sido utilizada por otros investigadores (García Santos, 2009; Serna, et al., 2012).

En cuanto a la relación $A/E=0,8$ se realiza para comparar con otros trabajos de investigación como los de (del Río Merino, 1999; Romaniega Piñeiro, 2016) entre otros, y además para poder incorporar más cantidad de residuo en el nuevo compuesto ya que para las relaciones superiores a 0,6 los diámetros de escurrimiento superan el valor máximo permitido, por tanto es en este tipo de relaciones A/E es donde se van a incorporar los residuos en mayor cantidad hasta agotar la trabajabilidad del compuesto llegando a relaciones de $A/E=0,9$.

CAPITULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para los objetivos propuestos en esta Tesis, así como el análisis y las conclusiones de los mismos.

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS: CA, CT Y CE

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados para caracterizar físicamente, química y mineralógicamente los tres formatos de residuo CA, CT y CE.

6.1.1. Caracterización física

6.1.1.1. Análisis granulométrico

En la Tabla 31 se muestran los pesos retenidos parciales, así como los % retenidos parciales y acumulados del residuo cáscara de arroz (CA) utilizado en este trabajo, así como la curva granulométrica obtenida a partir de dichos datos (Figura 21).

Luz de malla (mm)	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	Fondo
Peso retenido (g)	0,0	87,6	37,5	17,8	5,0	0,8	0,2	0,2
% Retenido Parcial	0,0	58,75	25,15	11,94	3,35	0,54	0,13	0,13
% Retenido Acumulado	0,0	58,75	83,90	95,84	99,19	99,73	99,86	100
% Pasa Acumulado	100,0	41,25	16,1	4,16	0,81	0,27	0,14	0,0

Tabla 31. Análisis granulométrico de CA.

Figura 21. Curva granulométrica de la CA.

Se observa según los resultados de la (Tabla 31) que el 99.19% del residuo CA se encuentra comprendido entre 2mm y 0.25mm. Como se puede observar no varían con los análisis aportados por el MAPAMA (

Tabla 32).

Luz de malla (mm)	2-4	1-2	0.5-1	0.25-0.5	0.125-0.25	<0.125
% Retenido Parcial	14	71	10	3	1	1

Tabla 32. Análisis granulométrico de CA (MAPAMA, 2017a)

En la Tabla 33 se muestran los pesos retenidos parciales del residuo cáscara de arroz triturada (CT), y la curva granulométrica obtenida a partir de dichos datos (Figura 22).

Luz de malla (mm)	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	Fondo
Peso retenido (g)	0	0	71,2	102,8	55,1	11,5	4,1	4,0
% Retenido Parcial	0	0	28,63	41,33	22,16	4,62	1,65	1,61
% Retenido Acumulado	0	0	28,63	69,96	92,12	96,74	98,39	100
% Pasa Acumulado	100,0	100,0	71,37	30,04	7,88	3,26	1,61	0,0

Tabla 33. Análisis granulométrico de CT.

Figura 22. Curva granulométrica de la CT.

El 96.74% del material CT se encuentra comprendido entre 1mm y 0.063mm.

En la Tabla 34 se muestran los pesos retenidos parciales del residuo ceniza de cáscara de arroz (CE) utilizado en esta investigación, así como la curva granulométrica que se ha obtenido a partir de dichos datos (Figura 23).

Luz de malla (mm)	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	Fondo
Peso retenido (g)	0	0	0.5	18.2	66.6	47.6	29.5	16.3
% Retenido Parcial	0	0	0.28	10.18	37.27	26.64	16.51	9.12
% Retenido Acumulado	0	0	0.28	10.46	47.73	74.37	90.88	100
% Pasa Acumulado	100	100	99.72	89.54	52.27	25.63	9.12	0

Tabla 34. Análisis granulométrico de CE.

Los datos obtenidos en el análisis granulométrico del residuo CE muestran que el 90.88% de la muestra está comprendida entre 1mm y 0.063mm.

Figura 23. Curva granulométrica de la CE.

6.1.1.2. Determinación de la humedad

Los resultados del contenido de humedad de los diferentes formatos de residuos se muestran a continuación (Tabla 35).

Residuo	Masa (g) húmedas	Masa (g) secas	% de humedad
Cáscara arroz (CA)	4.0965	3.7951	7.4
Cáscara arroz triturada (CT)	7.8912	7.2385	8.3
Ceniza (CE)	4.9824	4.8525	2.6

Tabla 35. Contenido en humedad cáscara de arroz.

Los resultados muestran que el residuo que contiene menos porcentaje de humedad (2,6%) es el residuo CE obtenido a partir de la quema de la CA, seguido de ésta (7,4%) y el contenido más alto (8,3%) de humedad se obtiene del residuo CT.

Estos resultados están de acuerdo con los valores medios de otros estudios para la cáscara de arroz (Valverde 07). El contenido en humedad es especialmente importante cuando se utiliza como combustible, ya que para la mayoría de los procesos de conversión energética de la biomasa se requiere un contenido máximo de humedad del 30%.

6.1.1.3. Determinación de la densidad real por picnometría de helio

Los resultados de la densidad real obtenidos en el ensayo de picnometría de helio se muestran en la Tabla 36.

Los datos obtenidos en el ensayo no difieren mucho de los aportados por la empresa al MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente), datos que se encuentran en el Anexo 3 de este trabajo. La densidad real del sustrato es de 1,58 g/cm³.

Muestra	Masa	P2	P3	Vs (cm3)	Densidad (g/cm3)	Densidad media (g/cm ³)
Cásc_arroz	3,8156	17,389	11,611	1,81	2,11	
		17,198	11,484	1,79	2,13	2,13
		17,47	11,666	1,77	2,15	
Cásc_arroz_molida	7,2628	17,178	11,412	4,14	1,76	
		19,445	12,929	3,75	1,94	1,85
		17,32	11,514	3,83	1,89	
		17,373	11,546	3,96	1,83	
Cenizas arroz	15,5202	18,024	11,999	3,19	4,87	
		18,019	11,953	4,80	3,23	3,65
		17,968	11,902	5,45	2,85	

Tabla 36. Resultados de densidad real de CA, CT y CE.

6.1.1.4. Densidad aparente de los residuos

Las densidades aparentes de los tres residuos de cáscara de arroz obtenidas en el ensayo son los que se reflejan en la Tabla 37.

Tipo de residuo	CA	CT	CE
Densidad aparente (g/cm ³)	1.10	2.60	1.85

Tabla 37. Resultados de densidad aparente de CA, CT y CE.

La densidad aparente de la cáscara de arroz es bastante menor que la cáscara triturada, ya que el gran volumen que ocupa la CA es uno de los problemas que existen con este residuo, por eso se incinera, pasando a ocupar aproximadamente el 20% de su volumen inicial. La CT es la que menos volumen ocupa.

6.1.2. Caracterización química y mineralógica

6.1.2.1. Análisis termogravimétrico

En la Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3, se representa la evolución de la masa de las muestras (% en peso) en función del tiempo de análisis, junto con el perfil de temperaturas también en función del tiempo. En la Tabla 38 se recogen los datos numéricos asociados.

Residuo	<200°C	<500°C	Total
Cáscara de arroz (CA)	8.07	58.98	70.52
Cáscara triturada (CT)	8.44	60.10	71.93
Ceniza (CE)	2.63	1.17	6.46

Tabla 38. Pérdidas de masa (%) en el análisis termogravimétrico de los residuos.

Las muestras de cáscara de arroz CA Y CT presentan un comportamiento muy similar, debido a que la composición química de las muestras es similar, y por ello las principales diferencias entre ellas se deben a la diferencia en el tamaño de partícula, y que se reflejarán en diferencias en las propiedades físicas. Como se puede observar en la Gráfica 1 Gráfica 2, la pérdida de peso en el ensayo térmico en el residuo CA y CT está entre un 60-70 %. Sin embargo la ceniza no pierde nada de peso por estar ya quemada (Gráfica 3).

Gráfica 1. Resultados del análisis térmico (CA).

Gráfica 2. Resultados del análisis térmico (CT).

Las muestras CA y CT presentan una pérdida de masa total en torno a un 70%, que corresponde en primer lugar a la pérdida de humedad a baja temperatura, inferior al 10% en ambos casos y una pérdida de masa de la muestra mayor, en torno al 60%, y que está asociada a la descomposición térmica (pirolisis) de la materia orgánica.

La pérdida mayoritaria muestra un hombro inicial (máximo aproximadamente a 300 °C) que se solapa con el pico principal (máximo aproximadamente a 350 °C), que a su vez va seguido de una cola. Este esquema se corresponde con la pirólisis de materiales lignocelulósicos (Biney et al., 2015; Z. Chen et al., 2015; Shen et al., 2015), el pico principal y mayoritario se debe a la descomposición térmica de la celulosa, el hombro representa la conversión más rápida de la hemicelulosa, y la cola del pico principal corresponde principalmente a la pirólisis de la lignina, más difícil de degradar, y que está presente en muy pequeña cantidad a tenor de los resultados del análisis térmico. A una temperatura superior a 550 °C la masa permanece prácticamente constante. Estos resultados ponen de manifiesto que la composición orgánica de la cáscara de arroz es similar a la de la mayoría de las fibras orgánicas, siendo la celulosa y la hemicelulosa los hidratos de carbono más abundantes. Los valores numéricos son acordes con los presentados por Valverde et al. 07, y con un valor total de celulosa, hemicelulosa y lignina comprendido entre el 45.2 y el 81.5% para un estudio de la cascarilla de arroz realizado a nivel mundial, siendo la celulosa el componente mayoritario de entre los tres. También (Serrano, et al., 2012) reportan resultados similares.

Gráfica 3. Resultados del análisis térmico (CE).

El análisis térmico de la ceniza de cáscara de arroz (CE) es muy diferente al de las cáscaras CA y CT. La ceniza de arroz presenta una pérdida de masa inicial de 2,63% por debajo de 200 °C, asociado a la pérdida de humedad de la muestra. El resto del análisis muestra una pérdida de peso progresiva, pero muy pequeña, sin picos definidos, con una pérdida de masa total hasta 900°C de 6,46%. Estos resultados son adecuados con el proceso de combustión al que ha sido sometido la cáscara para la obtención de las cenizas, y que consecuentemente ha eliminado la mayor parte de la materia orgánica de la muestra, con lo que la composición de la CE es fundamentalmente inorgánica (Serrano, et al., 2012), tal y como se verá más adelante en los resultados obtenidos en el análisis aproximado de las muestras.

En las tres muestras analizadas el contenido en humedad es similar al obtenido por desecación de las muestras en la mufla.

6.1.2.2. Análisis aproximado de los residuos

Se muestran a continuación en la Gráfica 4, Gráfica 5 y Gráfica 6 los resultados obtenidos en el análisis aproximado de los tres residuos.

Gráfica 4. Resultados del análisis aproximado de CA.

Gráfica 5. Resultados del análisis aproximado de CT.

Gráfica 6. Resultados del análisis aproximado de CE.

Los resultados del análisis aproximado de los carbones se recogen en la tabla 36.

Muestra	Humedad (%)	Volátiles (%)	Carbono Fijo (%)	Cenizas (%)
Cáscara arroz	8.62	62.91	15.93	12.54
Cáscara arroz triturada	7.61	61.23	16.24	14.92
Ceniza de cáscara de arroz	2.62	4.00	11.06	82.32

Tabla 39. Análisis aproximado de los residuos.

Como se observa en la Tabla 39, y para todos los residuos, el contenido en humedad por este método también proporciona unos resultados similares a los obtenidos en mufla. El análisis aproximado de ambas cáscaras es similar, mientras que el de las cenizas, acorde a lo descrito anteriormente, es muy distinto.

La cáscara de arroz no difiere mucho de los datos aportados por (Valverde, et al., 2007), en el que el autor hace una comparativa de las diferentes variedades y por distintos países Canadá, California y China, como se puede observar en la Tabla 40. Donde V₁, V₂, V₃ y V₄ son variedades de cáscara de arroz y V_T es el tallo de la cáscara de arroz.

Parámetros	Canadá				California		China	Colombia
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V _i	V _T	V ₁	V ₁
Materia volátil	66,40	67,30	63,00	67,70	63,52	65,47	51,48	65,47
Carbono fijo	13,60	13,90	12,40	14,20	16,22	45,86	25,10	16,67
Ceniza	20,00	18,80	24,60	18,20	20,26	48,67	16,92	17,89

Tabla 40. Análisis aproximado de la cáscara de arroz en diferentes variedades y por diferentes países (Valverde, et al., 2007)

Para ambos residuos de cáscara, el porcentaje de materia combustible, dado por el contenido en volátiles y carbono fijo, es muy alto, superior al 75% en ambos casos, y especialmente alto el contenido en volátiles (Arcos et al., 2007; Valverde, et al., 2007). Las cenizas, residuo inorgánico remanente tras la combustión suponen más de un 12% en peso del material inicial; es precisamente esta elevada cantidad de residuo inquemado, que se genera tras la combustión de la cáscara de arroz, lo que ha impulsado la búsqueda

soluciones para valorizar esta ceniza, siendo la cáscara de arroz uno de los residuos de biomasa que presenta un mayor contenido en cenizas (Rambo et al. 2015). En cuanto a la composición química de las cenizas, diversos autores constatan el elevado contenido en sílice de la cáscara de arroz, ya que la sílice forma parte de numerosas plantas, principalmente para cumplir funciones estructurales. Tras la calcinación la sílice queda en las cenizas, de forma que constituye aproximadamente un 90-95% de la masa de las cenizas, acompañado de pequeñas cantidades de sales inorgánicas (Arcos, et al., 2007; M. I. Martín, et al., 2011; Mejía, et al., 2013; Valverde, et al., 2007).

El análisis aproximado de las cenizas de arroz realizado en este trabajo muestra unos valores muy distintos de las muestras de cáscara, con un porcentaje muy bajo, en torno a un 15%, de materia orgánica constituido por volátiles y carbono fijo, siendo el componente mayoritario las cenizas que constituyen más del 80% del residuo. La ceniza empleada en este estudio presenta color negro, lo que indica que la temperatura de quema no está controlada, y contiene todavía materia orgánica, tal y como queda reflejado en el análisis inmediato, y como confirman algunos autores (Behak & Peres Núñez, 2008).

6.1.2.3. Difracción de rayos X

La Gráfica 7 muestra los resultados obtenidos en el ensayo para la cáscara de arroz (CA) y las cenizas de cáscara de arroz (CE).

Gráfica 7. Resultados de la difracción de rayos X-Termogravimetría

Se observa en la Gráfica 7 la escasa cristalinidad de todas las muestras. De acuerdo a los resultados del análisis térmico, se identifica la celulosa como componente mayoritario de la muestra de cáscara de arroz, con los dos picos característicos de la celulosa a $2\theta=22-23^\circ$ y un segundo de menor intensidad a $2\theta=15-17^\circ$ (Rambo et al. 2015). Estos dos picos se pueden apreciar en el difractograma inserto en la figura, a modo de comparación, de una muestra comercial de celulosa microcristalina (Avicel, Panreac), realizado en las mismas condiciones. La muestra de cenizas de arroz presenta mayor cristalinidad, y no se observa en ella los picos de la celulosa, acorde a todos los resultados presentados anteriormente. En el caso de las cenizas de cáscara de arroz se observa un pico principal, que prácticamente coincide con el de la celulosa, situado a $2\theta=22^\circ$, y un pico secundario situado a $2\theta=36^\circ$, que corresponde con la presencia de sílice en la muestra en forma de cristobalita (Behak & Peres Núñez, 2008). De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, aproximadamente un 12% de la masa de la cáscara forman las cenizas, constituidas mayoritariamente por SiO_2 . En la cáscara, el silicio se encuentra fundamentalmente en forma de sílice amorfa, que presenta un único pico muy ancho centrado a $2\theta=22^\circ$ (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006; Mejía, et al., 2013). Por tanto, el pico característico de la sílice amorfa quedaría enmascarado por el de la celulosa, compuesto además más abundante, de acuerdo al análisis termogravimétrico. Durante la calcinación de la cáscara para obtener las cenizas, dependiendo de las condiciones en las

que se lleve a cabo el proceso, la sílice amorfa puede transformarse, a temperaturas superiores a 700°C, a sílice cristalina (Rendón, et al., 2009), una de cuyas formas es la cristobalita.

6.1.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A continuación se analizan una serie de imágenes SEM de los distintos residuos CA, CT y CE en secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) que nos aportan información morfológica en el primer caso y composicional en el caso de BSE.

a) Cáscaras de arroz (CA)

La planta de arroz es una de las plantas que absorben sílice del suelo y lo asimila en su estructura durante el crecimiento (Smith & Kamwanja, 1986). La cáscara de arroz es el revestimiento exterior del grano de la planta de arroz con una alta concentración de sílice, generalmente más del 80-85% (Siddique 2008). Normalmente contiene el 80% de la materia orgánica y el 20% de sustancias inorgánicas (Givi, et al., 2010).

En el análisis realizado con el microscopio electrónico de barrido se observa en primer lugar una imagen SEM x15 (Figura 24) en secundarios (izquierda) y retrodispersados (derecha) para poder obtener una imagen del residuo en su totalidad, aunque la escala no corresponda con la real ya que el microscopio no hace lecturas de menos de x20.

Las imágenes muestran varias zonas diferenciadas en la cáscara, tanto en SE como en BSE, una externa más rugosa, otra interna de carácter más laminar y la parte que corresponde al tallo en la parte más inferior de las imágenes.

Como se puede observar en la imagen es evidente que la cáscara de arroz (CA) tiene características únicas de superficie, ya que es rica en sílice y su superficie externa es muy irregular (Jung, et al., 2013). La Figura 24 (BSE) muestra las distintas tonalidades debidas a los diferentes números atómicos de los elementos. La parte externa de la cáscara es más clara (menos orgánica) ya que corresponde a la zona compuesta por silicio y los laterales y el tallo son más oscuros porque están compuestos por carbono.

Figura 24. Imagen SEM en secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) a 15x de la CA.

A continuación se muestra la imagen SEM en retrodispersados x250 (Figura 25) donde se observa con mucho detalle la morfología de la cáscara y además, se obtiene la composición química correspondiente al punto señalado. Los datos obtenidos en esa zona son un 61% de SiO₂ y en un 39% de CO₂ (Figura 26).

Figura 25. Imagen SEM en BSE a 250x de la cáscara de arroz.

Figura 26. Composición química de la cáscara de arroz en el punto indicado en la Figura 25.

Sin embargo la zona del borde que corresponde a la parte interior de la cáscara (Figura 27), donde crece el grano de arroz es más orgánica ya que tiene una composición química inversa, es decir, un 88% de CO_2 y un 12% de SiO_2 .

Figura 27. Imagen SEM en BSE a 250x de la cáscara de arroz.

Figura 28. Composición química de la cáscara de arroz en el punto indicado en la Figura 27.

A medida que bajamos hacia la zona donde la vaina se engancha con la planta (Figura 29) la composición química varía otra vez (Figura 30) con un 60% de SiO_2 y un 40% de CO_2 .

Figura 29. Imagen SEM en BSE a 20x de la cáscara de arroz.

Figura 30. Imagen SEM en BSE a 100x de la cáscara de arroz.

No se observan poros a gran escala (Figura 31) pero como se trata de una estructura vegetal puede tener microporos en su estructura interna.

Figura 31. Imagen SEM en SE a 600x de la cáscara de arroz.

b) Cáscaras trituradas (CT)

Las cáscaras trituradas no varían en cuanto a composición química con respecto a las enteras, sin embargo en cuanto a su textura y morfología si, ya que en algunos casos se mantienen las dos zonas diferenciadas pero en otros las zonas se han separado en el proceso de trituración. En la Figuras 32 la imagen de la izquierda corresponde a la parte externa de la cáscara, donde la composición química es el 100% de SiO_2 . La imagen de la derecha corresponde al interior de la vaina en cuya composición química predomina un alto porcentaje de CO_2 .

Figuras 32. Imagen SEM en SE a 150x y 250x de la cáscara de arroz triturada.

Se observa como la estructura interna de la cáscara triturada está completamente fragmentada (Figura 33) y su composición química en la zona marcada contiene el 92% de CO_2 y el 8% de SiO_2 .

Figura 33. Imagen SEM en BSE a 1000x de la cáscara de arroz triturada.

c) Cenizas de cáscara de arroz (CE)

La temperatura necesaria para la combustión de la materia orgánica de la cáscara, desprendiendo la mayor cantidad de carbón posible y que la sílice mantenga su estado amorfo, (no cristalice) está entre 500 y 700°C. La ceniza cuanto más blanca indica bajo contenido en carbón, para ello debe garantizarse la oxigenación suficiente durante la combustión y el enfriamiento (I Águila, 2001). Las principales impurezas que contiene esta sílice son: calcio, potasio, magnesio y manganeso y como secundarias aluminio, hierro (10-20 ppm), boro y fósforo (1-40 ppm) (J. E. Rodríguez et al., 1992).

Por lo tanto, a la vista del color negro de la ceniza tratada en este trabajo de investigación (Foto 57) se puede afirmar su alto contenido en carbón y su combustión fuera del rango indicado por (I Águila, 2001).

Foto 57. Fotografía tomada a 54x de la ceniza de cáscara de arroz.

En la imagen SEM en retrodispersados (Figura 34), se puede observar a partir de las distintas tonalidades que el resultado de incinerar la cáscara, es una ceniza que todavía tiene parte orgánica y parte inorgánica. La parte más oscura corresponde al elemento más ligero, que es en este caso la parte orgánica y que está compuesta por carbono. La zona de tonalidad más clara es la que corresponde al elemento más pesado y que en este caso se trata del silicio.

Figura 34. Imagen SEM en BSE a 50x de la ceniza de cáscara de arroz.

Figura 35. Imagen SEM en SE a 250x de la ceniza de cáscara de arroz.

En la Figura 35 se puede apreciar como en la combustión de la cáscara quedan partes con aspecto viscoso, que corresponden al carbono calcinado y en la parte externa (silicio) se observan poros en la estructura que corresponde al silicio (Figura 36).

Figura 36. Imagen SEM en SE a 1000x de la ceniza de cáscara de arroz.

También se observan partes de la cáscara que no tienen ninguno de los aspectos comentados anteriormente (Figura 37). Donde la composición química en el punto Spectrum1 es del 79% de carbono y el 20% de silicio, y el punto Spectrum2 solamente se compone de silicio.

Figura 37. Imagen SEM en SE a 250x de la ceniza de cáscara de arroz.

6.2. ESCAYOLA CON ADICIÓN DE CARGAS LIGERAS, RESIDUOS DE ARROZ Y ESCAYOLA CON FIBRAS

6.2.1. Análisis de compuestos y cargas ligeras: corcho, perlita, arcilla expandida y poliestireno expandido

En esta fase se han realizado probetas con cargas ligeras utilizadas por otros investigadores y por la industria del yeso. Se han añadido cargas en un 6% del peso de la escayola ya que otros autores incorporan esta cantidad, entre otros Del Río et al. (2000) y González Madariaga (2005). Además se realizan incorporaciones de porcentajes superiores 8 y 10% de corcho para obtener resultados y comprobar los valores obtenidos por estos investigadores.

6.2.1.1. Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

Los valores que se obtienen en el ensayo de consistencia de las pastas son los de la Tabla 41

Denominación	A/E	Ø Escurrimiento medio (mm)
06 REF	0,6	161,5
06 CO 6	0,6	172,0
06 PE 6	0,6	165,0
06 AR 6	0,6	172,0
06 PO 6	0,6	114,0

Tabla 41. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.

Como se puede observar las probetas que cumplen con la normativa en cuanto al ensayo de consistencias, cuyos límites inferior y superior, 160-170 mm, son la de referencia y la aditivada con perlita.

6.2.1.2. Resultados: Densidad, Dureza Shore C y resistencias mecánicas

En este apartado se pretende comparar los residuos que se están adicionando en esta Tesis con los que se han incorporado en otras investigaciones.

Los resultados obtenidos para las distintas series con cargas ligeras se resumen en la Tabla 42.

Denominación	A/E	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Dureza Shore C	R. Flexión (MPa)	R. Compresión (MPa)
06 REF	0,6	310,977	1,211	93,00	7,87	19,31
06 CO 6	0,6	251,920	0,984	93,00	3,61	8,45
06 CO 8	0,6	241,42	0,943	99,00	2,54	4,25
06 CO 10	0,6	226,73	0,886	90,00	2,75	4,47
06 PE 6	0,6	303,390	1,185	92,00	7,05	15,55
06 AR 6	0,6	313,200	1,223	94,00	7,54	20,74
06 PO 6	0,6	136,370	0,532	0,00	2,22	2,90

Tabla 42. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.

La Gráfica 8 muestra la desviación en porcentaje de los resultados obtenidos con los compuestos que llevan adiciones de cargas ligeras en comparación con la probeta de referencia.

Gráfica 8. Desviación en porcentaje de los resultados obtenidos con las mezclas de adición ligera en comparación con las probetas referencia.

Se observa que la serie realizada con adiciones del 6% de corcho, el peso de las probetas disminuye en torno al 20% en comparación con la referencia. La resistencia a flexión y compresión son un 44% y un 51% respectivamente menor que la de referencia. Los resultados correspondientes a la mesa de sacudidas muestran un diámetro de escurrimiento de 17,2 cm. Por el tipo de carga se hace más dificultoso el reparto homogéneo del corcho en la pasta. En definitiva, la mezcla de escayola con un 6% de corcho, disminuye bastante el peso con respecto a la escayola sin adiciones, pudiendo tratarse de un material apto para realizar elementos constructivos que requieran poco peso.

Foto 58. Compuestos escayola-corcho

En cuanto a los resultados de compuestos de escayola y perlita con incorporaciones del 6% de perlita, se observa una disminución de un 2% del peso en comparación con la de

referencia. La resistencia a flexotracción disminuye un 10% con respecto a la de referencia y la resistencia a compresión disminuye un 11%. Se realiza la mesa de sacudidas obteniendo un resultado para el diámetro de escurrimiento de 16,5 cm. La pasta se trabaja mal en menos tiempo y al hacer la mesa de sacudidas el relleno de moldes es dificultoso.

En los compuestos de escayola con 6% de arcilla expandida, se observa un incremento de peso de un 1% con respecto a la referencia y la dureza superficial es muy parecida a la de referencia. La resistencia a flexotracción tienen una disminución de sólo un 4% con respecto a las probetas que no llevan ninguna adición y la resistencia a compresión aumenta un 17% con respecto a las probetas de referencia. Se realiza la mesa de sacudidas obteniendo un resultado para el diámetro de escurrimiento de 17,2 cm. Con este compuesto, no se consiguen reducciones significativas en el peso, la disminución de la resistencia a flexotracción es muy pequeña, sin embargo, la resistencia a compresión aumenta considerablemente en comparación con la de referencia.

En la serie de probetas que incorporan un 6% de poliestireno expandido sobre el peso de escayola, se observa una disminución de un 56% del peso con respecto a las probetas referencia. No se pudo tomar medida de la dureza ya que la superficie de las probetas es totalmente irregular y llena de oquedades. Tanto la resistencia a flexotracción como a compresión disminuyen drásticamente en comparación con la referencia (72% y 84% respectivamente). Se realiza la mesa de sacudidas obteniendo un resultado para el diámetro de escurrimiento de 11,4 cm. Por la poca densidad del material y la poca adherencia entre las perlas de poliestireno y la escayola es necesario prolongar el amasado. En definitiva, con la adición de EPS, se reduce el peso en más de un 50%, pero las pérdidas de resistencias mecánicas son muy significativas.

Foto 59. Compuestos escayola arcilla expandida y escayola con poliestireno expandido.

6.2.1.3. Capacidad de retención de agua

A continuación se presentan los datos y resultados de las retenciones de agua en las series 0,6 y referencia.

Denominación	A/E	Peso húmedo (g)	Densidad (g/cm ³)	Peso desecado (g)	Densidad (g/cm ³)	Retención de agua (%)
06 REF	0,6	415,187	1,622	310,016	1,211	33,94
06AR6	0,6	415,350	1,622	313,200	1,223	32,64
06C06	0,6	335,800	1,312	251,920	0,984	33,33
06PO6	0,6	180,900	0,707	136,370	0,532	32,89
06PE6	0,6	404,957	1,582	303,390	1,185	33,50

Tabla 43. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.

Como se puede observar en la Tabla 43 la capacidad de retención de agua no varía en los compuestos que incorporan perlita y corcho con respecto a la serie de referencia. Si lo hacen

los que incorporan arcilla expandida y poliestireno expandido, siendo menor que la referencia en un 6%.

6.2.2. Análisis de compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz CA, CT Y CE con A/E = 0,6.

En este apartado se realizan las series correspondientes a A/E=0,6. Se incorporan residuos de CA, CT, CE, y cargas ligeras como arcilla expandida (AR), perlita (PE), poliestireno expandido (PO) y corcho (CO) utilizadas por otros investigadores. Los porcentajes de adición son el 6%, 8% y 10% sobre el peso de la escayola.

Los resultados obtenidos con incorporaciones de cargas ligeras y residuos de arroz son los de la Tabla 44.

Denominación	A/E	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Dureza	R. Flexión (MPa)	R. Compresión (MPa)
06 REF	0,6	310,977	1,211	93	7,87	19,31
06 CO 6	0,6	251,920	0,984	93	3,61	8,45
06 CO 8	0,6	241,42	0,943	92	2,54	4,25
06 CO 10	0,6	226,73	0,886	90	2,75	4,47
06 CA 6	0,6	302,187	1,181	99	4,778	11,458
06 CA 8	0,6	302,080	1,18	99	4,35	10,15
06 CA 10	0,6	300,92	1,175	99	3,83	9,63
06 CT 6	0,6	296,96	1,160	91	6,11	14,50
06 CT 8	0,6	320,20	1,250	93	6,40	12,64
06 CT 10	0,6	321,10	1,250	93	6,13	11,74
06 CE 6	0,6	309,98	1,211	95	7,23	21,575
06 CE 8	0,6	310,615	1,213	95	7,08	22,15
06 CE 10	0,6	309,76	1,210	95	6,63	22,66
06 AR 6	0,6	313,200	1,223	94	7,54	20,74
06 PE 6	0,6	303,390	1,185	92	7,05	15,55
06 PO 6	0,6	136,370	0,532	-	2,22	2,90

Tabla 44. Resultados de las series realizadas con AR, PE, CO, PO y residuos CA, CT y CE.

En cuanto a las densidades de compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz, los resultados obtenidos se representan en la Gráfica 9, Gráfica 10 y Gráfica 11.

Gráfica 9. Densidad de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.

En cuanto a los compuestos formados con cargas ligeras y residuos de arroz, en la Gráfica 9 se presentan los resultados con incorporaciones del 6% de cada una de las cargas ligeras y de los residuos de arroz. Las densidades son similares en todas las cargas excepto el poliestireno expandido que reduce la densidad un 56%, seguido del corcho con un 19% con

respecto a la referencia. El residuo CT tiene menor densidad que los compuestos con incorporaciones de perlita.

Los comportamientos de los compuestos con 8 y 10 % de carga y de residuo son similares como se puede observar en la Gráfica 10 y la Gráfica 11. Obteniendo el compuesto formado con corcho la menor densidad (22-27%) seguido del compuesto con CA que solo reduce un 3% la densidad de la referencia.

Gráfica 10. Densidad de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Gráfica 11. Densidad de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.

En cuanto a las durezas Shore C de los compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz, los resultados obtenidos se representan en la Gráfica 12, Gráfica 13 y Gráfica 14.

Gráfica 12. Dureza Shore C de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Los mayores aumentos de dureza (6,5%) se obtienen para los compuestos con CA en todos los casos. Las incorporaciones de CE dan durezas similares a la referencia pero son superiores a las obtenidas por los compuestos que incorporan AR, CO y PE.

En el resto de los casos, es decir con incorporaciones del 8% y 10% de CO y residuos de arroz el comportamiento de las durezas es mejor en los compuestos que incorporan CA, seguidos de las adiciones de CE.

Gráfica 13. Dureza Shore C de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Gráfica 14. Dureza Shore C de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.

En cuanto a las resistencias a flexotracción de los compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz, los resultados obtenidos se representan en la Gráfica 15, Gráfica 16 y Gráfica 17.

Gráfica 15. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.

En cuanto a la resistencia a flexotracción con incorporaciones del 6% (Gráfica 15), los valores obtenidos por el compuesto que incorpora AR, PE y la adición de CE son muy similares difieren de la referencia en un 4%, 10% y 13% respectivamente. Con el resto de adiciones se reducen un 22% con CT, un 39% con CA, un 54% con CO y un 72% con PO.

Para las adiciones del 8% y 10% (Gráfica 16 y Gráfica 17), las mejores resistencias a flexotracción se obtienen con CE ya que la máxima reducción de resistencia es de un 16%. Con CT se reduce la resistencia en un 22% y con CO un 68%.

Gráfica 16. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Gráfica 17. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Gráfica 18. Resistencia a compresión de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.

En cuanto a las resistencias a compresión de los compuestos con cargas ligeras y residuos de arroz, los resultados obtenidos se representan en la Gráfica 18, Gráfica 19 y Gráfica 20, donde se observa que las mejores resistencias a compresión son las que obtienen los compuestos que incorporan CE en todos los casos, con un incremento del 17% de resistencia a compresión con respecto a la serie de referencia. Los compuestos con AR (Gráfica 18)

aumentan las resistencias en un 7%. La adición de PE y CT dan resistencias similares y reducen con respecto a la referencia un 19% y 25% respectivamente. El resto de adiciones reducen un 41% (CA), 56% (CO) y 85% (PO).

En cuanto a las adiciones de 8% y 10% de CT, CA y CO las resistencias a compresión se reducen en todos los casos un 35%, 47% y 78% respectivamente.

Gráfica 19. Resistencia a compresión de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.

Gráfica 20. Resistencia a compresión de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.

6.2.3. Escayola con adición de fibras

Como se ha comentado con anterioridad hay muchos estudios realizados que adicionan a la escayola con fibras, ya sean naturales o artificiales para conseguir diferentes objetivos como son:

- Incrementar la resistencia a flexotracción.
- Mejorar la ductilidad del material.
- Incrementar la resistencia ante impactos.
- Mejora de las propiedades reológicas.
- Controlar las fisuras y la forma de fractura de elementos constructivos.

En este apartado se contrastan algunos trabajos realizados con yeso y fibras con la relación AE 0,6 utilizada en el OB.2.

Las investigaciones realizadas por Río Merino et al. (2002) y Romaniega Piñeiro et al. (2015) al incorporar fibras de vidrio E y fibras de vidrio recicladas obtienen mejoras en resistencias a flexotracción, sin embargo los resultados obtenidos con AE 0,6 y fibras de CA y CT muestran

disminuciones de resistencias a flexotracción (M del Río Merino & Comino, 2002; Romaniega Piñeiro, et al., 2015)

Por otro parte, otros trabajos como los de Gutiérrez González (2012) confirman que la incorporación de fibras al yeso evita la rotura frágil del material. Con las adiciones de fibras de CA y CT se evita la rotura frágil del yeso ya que en la rotura a flexotracción los dos lados de la probeta quedan completamente cosidos (Sara Gutiérrez González, 2012).

6.3. ESCAYOLA CON ADICIÓN DE RESIDUOS DE ARROZ

Los resultados obtenidos en los ensayos sobre la escayola con adición de residuos de arroz se estructuran según los ensayos realizados en la fase 1 y la fase 2.

6.3.1. Resultados de los ensayos realizados en la FASE 1

En este apartado se muestran los valores promedio de los ensayos obtenidos de las probetas con las diferentes proporciones de cáscara de arroz realizadas para el OB.3. Como el trabajo de investigación se ha realizado sobre diferentes consistencias y residuos se analizarán los resultados de la siguiente manera:

- Resultados y discusión en función de las distintas relaciones agua-escayola de cada residuo, para observar la influencia del agua en los compuestos.
- Resultados y discusión en función del residuo incorporado, para estudiar la influencia de éste en los compuestos.

Además se realizará un análisis estadístico que incluye un análisis de la varianza (ANOVA) y de los factores AE, % de adición y el tipo de residuo (Anexo 1).

6.3.1.1. Resultados del compuesto escayola con residuos de CA

En la Tabla 45 se presentan los resultados obtenidos en los compuestos con incorporaciones de CA.

Denominación	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Dureza Shore C	R. Flexión (MPa.)	R. Compresión (MPa.)
06 CA 0,5	306,330	1,197	93	6,794	16,342
06 CA 1	308,850	1,207	92	6,084	15,208
06 CA 1,5	309,412	1,209	93	6,494	15,387
06 CA 2	304,700	1,190	93	5,330	14,145
06 CA 2,5	301,567	1,178	93	5,537	12,719
06 CA 3	303,974	1,187	96	5,433	13,029
06 CA 3,5	302,000	1,180	93	5,000	12,380
06 CA 4	303,233	1,184	99	4,477	10,355
06 CA 4,5	301,450	1,176	100	4,933	10,980
06 CA 5	303,230	1,184	100	5,016	11,931
06 CA 5,5	306,170	1,196	100	5,220	11,474
06 CA 6	302,187	1,181	99	4,778	11,458
06CA 8	302,080	1,180	99	4,350	10,150
06 CA10	300,92	1,175	99	3,830	9,630
07 CA 6	265,87	1,040	85	3,190	6,220
07 CA 10	258,56	1,010	88	3,540	7,890
07 CA 15	266,83	1,040	87	3,500	7,210
07 CA 20	262,53	1,030	83	3,190	6,410
08 CA 5	248,27	0,970	100	2,720	4,890
08 CA 6	240,64	0,940	83	2,988	6,420
08 CA 7	250,23	0,977	80	3,025	4,935
08 CA 8	247,1	0,966	80	3,027	5,067
08CA10	248,3	0,970	81	2,790	5,490
08CA15	239,00	0,934	81	2,655	5,136
08CA20	250,32	0,970	81	2,845	5,155
09CA10	232,23	0,907	81	3,088	5,200
09CA15	233,3	0,911	82	2,653	4,778
09CA20	218,368	0,853	79	2,758	4,098

Tabla 45. Resultados medios de las series realizadas con CA.

a) Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

Los resultados obtenidos en los compuestos en cuanto a diámetros de escurrimiento dan valores diferentes entre unas muestras y otras, incluso en los compuestos que se repiten los valores obtenidos son distintos. Sin embargo se observa que al aumentar el porcentaje de residuo el $\emptyset$ de escurrimiento de la mesa de sacudidas disminuye con respecto a la referencia, constatando que el residuo absorbe parte del agua de amasado.

En la Tabla 46 se presentan los resultados promedio de los $\emptyset$ de escurrimiento obtenidos en la mesa de sacudidas con incorporaciones de CA. En la Gráfica 21 se representan dichos valores. Se realiza el estudio de los compuestos según las fechas en las que se realizan los ensayos para eliminar las posibles variables que pueden influir en este comportamiento, como son la escayola, el residuo, la temperatura del laboratorio y la humedad, ya que como se ha comentado en el capítulo de caracterización del residuo, la CA tiene un porcentaje de humedad que además puede variar ya que se está utilizando según llega del molino y no se somete a ningún tratamiento previo, es decir, no se lava ni se limpia y se ha utilizado residuo que se ha recibido de distintas cosechas.

% CA	1%	2%	3%	4%	5%	6%	8%	10%
Denominación	06 CA 1	06 CA 2	06 CA 3	06 CA 4	06 CA 5	06 CA 6	06 CA 8	06 CA 10
$\emptyset$ Escurrimiento(mm)	217,4	214,35	224,0	204,0	170,0	167,0	141,0	121,0

Tabla 46. Resultados $\emptyset$ de escurrimiento medio en series 06CA.

En los resultados con residuo de CA la trabajabilidad 167-170 mm de $\emptyset$ se obtiene en porcentajes de cáscara de arroz que no superan el 6%. Los compuestos que cumplen la normativa son las que incorporan un 5 y 6% de CA. Se observa de esta manera que el comportamiento de los compuestos es el adecuado ya que sin variar la relación A/E cuando se incrementa la adición de residuo la capacidad de absorción de agua de éste hace que la consistencia del compuesto en estado fresco disminuya (Gráfica 21).

Gráfica 21. Resultados del ensayo de consistencia en series 06CA.

Los resultados de los compuestos realizados con relación A/E=0,7 se presentan en la Tabla 47.

% CA	6%	10%	15%	20%
DENOMINACIÓN	07CA6	07CA10	07CA15	07CA20
$\emptyset$ ESCURRIMIENTO (mm)	171	165	156	145

Tabla 47. Resultados $\emptyset$ de escurrimiento medio en series 07CA.

Las consistencias de estos compuestos siguen un descenso acorde al incremento de residuo. El compuesto que cumple la normativa es el que incorpora un 10% de CA sobre el peso de

escayola. En incorporaciones superiores del residuo el compuesto se maneja difícilmente ya que el volumen del residuo en esos porcentajes es muy grande (Gráfica 22).

Gráfica 22. Resultados del ensayo de consistencia en series 07CA.

Las probetas realizadas con la relación $A/E = 0,8$ tienen unos resultados que no permiten comprobar el diámetro de escurrimiento en la mesa de sacudidas, ya que para una misma incorporación de residuo los resultados difieren bastante unos con respecto a otros al igual que en las relaciones $A/E = 0,6$ como se ha podido observar.

Por lo tanto para determinar si la humedad del residuo puede influir en la consistencia del compuesto se deseca la CA hasta peso constante para eliminar la humedad, y se observa que en este caso los diámetros de los ensayos descienden linealmente a medida que se incorporan mayores porcentajes de residuo. Por lo tanto se puede concluir que las variabilidades observadas en los resultados pueden ser debidas a la humedad que contiene el residuo.

En la Tabla 48 se observan los resultados promedio de los ϕ de escurrimiento obtenidos en la mesa de sacudidas sobre las series realizadas con $A/E = 0,8$.

% CA	8%	10%	15%	20%
DENOMINACIÓN	08 CA 8	08CA10	08CA15	08CA20
Ø ESCURRIMIENTO (mm)	190	186	159	150

Tabla 48. Resultados ϕ de escurrimiento medio en series 08CA.

Gráfica 23. Resultados del ensayo de consistencia en series 08CA.

Se observa en la Gráfica 23 que a medida que aumenta el porcentaje de residuo incorporado, los diámetros de escurrimientos obtenidos en la mesa de sacudidas van disminuyendo.

En la relación A/E=0,9 (Tabla 49) se observa el mismo efecto en los resultados, esto es, cuanto más residuo menor trabajabilidad de la pasta (Gráfica 24).

% CA	10%	15%	20%
DENOMINACIÓN	09CA10	09CA15	09CA20
ØESCURRIMIENTO (mm)	198	170	158

Tabla 49. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 09CA.

La Gráfica 24 se observa que no hay relación lineal entre el Ø de escurrimiento y la cantidad de residuo incorporado.

Gráfica 24. Resultados del ensayo de consistencia en series 09CA.

En la Gráfica 25 se puede observar el comportamiento que tiene la incorporación de la misma cantidad de residuo CA y la variación del A/E. Para un 10% de residuo y relaciones A/E de 0,6-0,7-0,8 y 0,9 el Ø de escurrimiento sigue una relación lineal hasta el compuesto con más cantidad de agua. El compuesto que obtiene valores que cumplen con las especificaciones de la norma es el denominado 07CA10.

Gráfica 25. Resultados del ensayo de consistencia en series 0,6-0,7-0,8-0,9.

Se evidencia la necesidad de profundizar en el tema para poder obtener un rango en la consistencia de las pastas en el que se pueda trabajar con seguridad.

b) Densidad

Se muestra en la Gráfica 26 los valores de las densidades obtenidos con respecto a la referencia de todos los compuestos ensayados con las distintas relaciones A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9)(Tabla 45).

En A/E=0,6 se observa que las probetas con incorporación de CA no sufren una variación significativa, pero ninguno de los resultados superan la densidad de referencia. La pequeña variabilidad en los resultados se debe al arrastre de la cáscara en el enrasado de las probetas y la posible incorporación de más o menos aire en el interior de la mezcla durante el proceso de amasado ya que se realiza manualmente.

Gráfica 26. Densidad de las series CA y serie de referencia.

En la determinación de la densidad de los compuestos Escayola-CA con relación A/E=0,7, las densidades de las mezclas con adición de CA son inferiores al valor de referencia 1,07 (g/cm³). El mejor resultado -7% se obtiene con adición del 10% con el compuesto denominado 07CA10.

En los resultados de las probetas con distintos porcentajes de CA y relación A/E=0,8 se observa que la densidad de las probetas con incorporación de cáscara no sufre una variación significativa, pero todos los resultados con incorporación de residuo CA están por debajo de la densidad de referencia hasta un 8%.

Con incorporaciones de CA y relación A/E=0,9 las densidades disminuyen en torno a un 3% con respecto al valor de referencia.

Como se ha podido observar en todas las relaciones estudiadas la variación de las densidades no son significativas, pero en ningún caso se superan las densidades de referencia.

c) Capacidad de retención de agua

En la Tabla 50 se presentan los datos de densidades aparentes húmedas y secas a los 7 días, y los resultados de la capacidad de retención de agua a partir de estos.

Como se puede observar en la Tabla 50 todos los compuestos que incorporan CA tienen menos capacidad de retención de agua que las series de referencia en porcentajes que no superan el 6%.

Denominación	A/E	Peso húmedo (g)	Densidad (g/cm ³)	Peso desecado (g)	Densidad (g/cm ³)	Retención de agua (%)
07 REF	0,7	407,970	1,594	281,233	1,099	45
07CA6	0,7	379,270	1,482	265,870	1,039	42,65

07CA10	0,7	372,33	1,454	258,56	1,01	43,96
08 REF	0,8	391,630	1,530	255,970	1,000	50,22
08CA7	0,8	376,500	1,47	250,230	0,977	50,46
08CA8	0,8	368,79	1,44	247,16	0,965	49,21
09 REF	0,9	381,870	0,933	238,870	0,933	59,87
09CA15	0,9	359,530	1,404	233,300	0,911	54,12
09CA20	0,9	335,66	1,311	218,48	0,853	53,69

Tabla 50. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CA y la referencia.

d) Dureza Shore C

Se muestran en la Gráfica 27 los resultados de las durezas Shore C de todos los compuestos ensayados con las distintas relaciones A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9).

Gráfica 27. Dureza de las series CA y serie de referencia.

Con adiciones de CA superiores al 4% (Tabla 45) se obtienen valores de dureza Shore C superiores a los de referencia (93) en un 8%.

La dureza de los compuestos con relación A/E=0,7 es superior en todos los casos a la de referencia pero no sigue una relación lineal con el incremento de residuo. Esto depende del reparto de la CA en la cara de las probetas. En la relación A/E=0,8 los valores de dureza son muy parecidos a la de referencia. En los resultados obtenidos en adición de CA y relación A/E=0,9 se observa que los compuestos que incorporan CA obtienen durezas superiores a la de referencia en un 13%.

Como se puede observar a medida que aumenta la relación A/E disminuye la dureza superficial del compuesto (P.Barriac. Eurogypsum, Stuttgart, 1973), pero esta característica tan evidente en las referencias no lo es tanto en los compuestos con CA y relaciones 0,8 y 0,9 donde las durezas son similares.

e) Resistencia a flexotracción

Se muestran en la Gráfica 28 los resultados de resistencias a flexotracción de todos los compuestos ensayados con las distintas relaciones A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9) (Tabla 45).

Gráfica 28. Resistencia a flexotracción de las series CA y de referencia.

En $A/E=0,6$ la resistencia a flexotracción disminuye en proporción al incremento de residuo hasta llegar a un 51% de reducción con incorporaciones del 10% de adición, con respecto a la serie de referencia. En cuanto a la relación $A/E=0,7$ la resistencia a flexotracción se reduce entre un 31% y un 38% con respecto a la serie de referencia. En relación $A/E=0,8$ los valores de resistencia a flexotracción decrecen en todos los porcentajes de CA llegando a un valor máximo del 40% con respecto a la referencia.

En la relación $A/E=0,9$ la disminución de la resistencia a flexotracción con respecto a la referencia es menor que con las otras relaciones estudiadas. Este descenso es del 10% con incorporaciones de 20% de CA y de un 14% en incorporaciones de CA del 15% y con el 10% no se produce disminución de resistencia a flexotracción.

Por lo tanto la relación A/E que menos reducción de la resistencia mecánica a flexotracción obtiene es la de 0,9 para densidades de $(0,97-1) \text{ g/cm}^3$. En relación $A/E=0,7$ el compuesto 07CA10 con una densidad de $1,01 \text{ g/cm}^3$ reduce en un 31% la resistencia a flexotracción con respecto a la referencia.

Gráfica 29. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CA y de referencia.

La Gráfica 29 presenta los resultados de las densidades con sus correspondientes resistencias a flexotracción, así como la línea de tendencia obtenida para la relación entre ambas variables. Se puede concluir que con incorporaciones de CA del 10% (señaladas en la gráfica) las resistencias a flexotracción en probetas realizadas con distintas relaciones A/E y por lo tanto distintas densidades, dan resistencias a flexotracción muy similares ya que sus valores difieren en 1 MPa. Además observamos hay una relación lineal directa ($R^2=0,85$) entre las densidades y las resistencias a flexotracción, a medida que aumenta la densidad, la resistencia es mayor.

El compuesto que mejor se comporta a flexotracción y que además cumple con las exigencias de la normativa en cuanto al ensayo de la mesa de sacudidas es 07CA10.

Si comparamos los datos obtenidos con otros autores nos encontramos con San Antonio et al. que para densidades de $0,86 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ obtiene valores de flexotracción de 2,33 MPa, en el caso de la incorporación de 20% de CA y una densidad de 0,85 se obtienen valores algo superiores de 2,76MPa. En los datos aportados por Del Río Merino, para $A/E=0,6$ y densidades entre $0,8-1 \text{ g/cm}^3$ las resistencias a flexotracción varían entre 2,1 y 3,4 MPa, en este trabajo para estas densidades se obtienen resistencias comprendidas entre 2,8-3,5 MPa para relaciones A/E más elevadas (0,9-0,8-0,7) (del Río Merino, 2005; Alicia San Antonio Gonzalez et al., 2015).

Foto 60. Rotura a flexotracción de las probetas con incorporación de CA.

Por otro lado, se observa que en todas las probetas con incorporación de CA la rotura a flexotracción no es frágil. Después del ensayo ambos lados de la probeta quedan completamente cosidos (Foto 60). Esta forma de rotura se produce con incorporaciones desde el 1% en adelante, siendo más difícil la separación de los dos lados de la probeta a medida que se va aumentando el porcentaje de cáscara de arroz. Esto se debe a la adherencia entre la cáscara y la escayola, aunque al observar la rotura la parte de cáscara que sobresale está entera, no se produce rotura de ésta, este efecto se produce por la elevada dureza del residuo (Cadena & Bula, 2002).

Los valores obtenidos en resistencias no son inferiores en ningún caso al valor de 1 MPa fijado por la norma UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción (B1).

f) Resistencia a compresión

Se muestran en la Gráfica 30 los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de todos los compuestos con las distintas relaciones A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9) (Tabla 45).

Gráfica 30. Resistencia a compresión de las series CA y serie de referencia.

En las series A/E=0,6 la resistencia a compresión se reduce hasta un 50% con respecto a la serie de referencia para la máxima incorporación del 10% estudiada en esta relación A/E.

En cuanto a las resistencias a compresión con relación A/E=0,7 los valores de resistencia a compresión se reducen entre un 40% y un 53% en el caso del valor más desfavorable con respecto a la referencia.

En relación A/E=0,8 las resistencias a compresión con adición de CA también obtienen valores inferiores en todos los casos con respecto a la referencia. La máxima disminución de la resistencia a compresión es del 51%.

Los resultados con relación A/E=0,9 muestran una disminución de la resistencia de un 34% y 48% con adiciones de CA con respecto a la referencia.

Por lo tanto, al igual que ocurre con la resistencia a flexotracción, la resistencia a compresión obtiene sus mejores resultados en las relaciones A/E=0,9 y A/E=0,7, ya que las diferencias con sus respectivas series de referencia son menores que con las A/E=0,6 y A/E=0,8.

Asimismo como se puede observar en la Gráfica 31 que relaciona las densidades con las resistencias a compresión obtenidas, con incorporaciones de CA del 10% las resistencias compresión en probetas realizadas con distintas relaciones A/E de 0,9 y 0,8 y por lo tanto distintas densidades, y las relaciones 0,6 y 0,7 dan resistencias a compresión muy similares ya que sus valores difieren como máximo en 2 MPa. Además se observa la línea de tendencia para estas dos variables y el coeficiente de determinación $R^2=0,87$, lo que indica que cuando aumenta la densidad de los compuestos incrementan las resistencias a compresión.

Gráfica 31. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CA y serie de referencia.

Sin embargo como se puede observar en la Foto 61, después de la rotura a compresión la probeta se disgrega fácilmente. Esto se debe a que en una probeta sin adiciones se produce una íntima unión de los cristales de yeso, en cambio con la adición de CA esa unión es solo parcial.

En todos los casos los valores obtenidos en resistencias no son inferiores en ningún caso al valor de 2MPa fijado por la norma UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción (B1).

Foto 61. Rotura a compresión de las probetas con residuo de CA.

g) Análisis de los compuestos en función del % de residuo

En este apartado se estudia la influencia del porcentaje de residuo en los compuestos con la misma relación A/E. Además se realiza un análisis estadístico de la muestra para confirmar la influencia de la variable porcentaje de residuo CA en los compuestos de las distintas series A/E.

En cuanto a relaciones A/E=0,6 en la Gráfica 32 se muestra un resumen de las propiedades estudiadas en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo.

Gráfica 32. Serie 06CA y serie de referencia.

Se observa que en todos los compuestos realizados con CA las propiedades físicas de densidad y dureza obtienen resultados que mejoran un poco (3% en densidad y 8% en dureza) los valores de la referencia. La adición de CA máxima conseguida para una trabajabilidad adecuada ($\varnothing=167\text{mm}$) ha sido del 6% obteniendo valores de dureza un 7,5% superiores a la referencia pese a que disminuye un 3% su densidad. Se consiguen por lo tanto compuestos un poco más ligeros y con mayores valores en dureza. No se ha encontrado en la bibliografía comportamientos similares en compuestos con reducciones de densidad ya que al disminuir las densidades se obtienen menores durezas (del Rio Merino, 1999; Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012; Romaniega Piñeiro, 2016; San Antonio González et al., 2015).

En cuanto a las propiedades mecánicas de resistencias a flexotracción y compresión todos los compuestos sufren un descenso lineal en ambas resistencias, llegando a un máximo de 10% de incorporación de CA y un descenso de ambas propiedades de un 45% y 50% con respecto a los valores de la referencia. Además se puede observar que se produce una caída de resistencias del 6% al 8%, esto se debe a que como la densidad de la CA es muy

pequeña, el volumen que ocupa la cáscara en porcentajes tan altos es muy grande y la superficie que queda de escayola en el compuesto es muy inferior a la del residuo.

Curiosamente otras investigaciones de compuestos que incorporan fibras aumentan sus resistencias mecánicas, como es el caso de (García Santos, 2004b), que añade fibras de polipropileno, poliéster y acrílicas en un 2% y un 3% y obtienen resistencias mejoradas con respecto a la matriz estudiada. Por otro lado, (Romaniega Piñeiro, 2016) incorpora fibras de vidrio obteniendo, a pesar de su disminución de densidades, mejoras en el comportamiento mecánico a flexión, dureza superficial y fuerzas de adherencia, Deng & Furuno incorporan también fibras de polipropileno en 9-12% y mejoran las resistencias a flexión de los compuestos. Del Río & Comino y Ali & Grimer obtienen mejoras en el comportamiento a flexión con compuestos que incorporan fibras de vidrio E (Ali & Grimer, 1969; M del Río Merino & Comino, 2002; Deng & Furuno, 2001). Oteiza define el comportamiento del compuesto a partir de dos factores a tener en cuenta: la cantidad y la longitud de las fibras. Sus resultados obtienen un 30% más de resistencia a flexotracción con longitudes máximas de 40 mmy 2% de fibra de sisal en peso de escayola (Oteiza, 1993).

Sin embargo Romaniega Piñeiro incorpora fibras de polipropileno en matriz de escayola obteniendo disminuciones de las resistencias mecánicas por el incremento de porosidad del compuesto y por tanto su disminución de densidad hasta un 28% (Romaniega Piñeiro, 2016).

De los compuestos ensayados los que cumplen la mesa de sacudidas son 06CA5 y 06CA6, pero como esta relación A/E es muy baja y se pretende incorporar más residuo no se sigue el estudio en esta relación A/E.

Del análisis estadístico (Anexo 1) se puede concluir que en relaciones A/E las densidades y las durezas sufren cambios muy pequeños cuando se aumentan las incorporaciones de residuo. Sin embargo las resistencias mecánicas a flexotracción y compresión se ven afectadas por el aumento de adición de CA, ya que a medida que aumenta el porcentaje de CA disminuyen las resistencias mecánicas de los compuestos.

En cuanto a los compuestos con relación A/E=0,7, como se puede observar en la Gráfica 33 el comportamiento de los compuestos es muy similar y la variabilidad de los resultados muy pequeña. Se observa una ligera mejora en el compuesto realizado con el 10% de CA que puede deberse a la orientación de las fibras en las zonas de rotura una vez observada la superficie de fractura. Además como se ha comentado con anterioridad, estas probetas que incorporan CA son difíciles de separar ya que los dos lados de la probeta quedan completamente cosidos en el ensayo a flexotracción.

Gráfica 33. Serie 07CA y serie de referencia.

La adición de CA máxima conseguida para una trabajabilidad adecuada ($\varnothing=165\text{mm}$) ha sido del 10% obteniendo valores de dureza un 5% superiores a la referencia pese a que sus

densidades son las mismas. Se consiguen por lo tanto compuestos con mayores valores en dureza.

Por lo tanto el compuesto con el mejor comportamiento es 07CA10 ya que consigue mayores durezas, menor densidad y resistencias que disminuyen menos que las que incorporan otros porcentajes e inferiores al 40%.

De la serie A/E=0,8 se muestran las propiedades estudiadas en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo en la Gráfica 34.

Gráfica 34. Serie 08CA y serie de referencia.

Se constata que en todos los compuestos realizados con CA las propiedades físicas de densidad y dureza obtienen resultados que mejoran los valores de la referencia, llegando a un máximo de dureza que supera en un 9% a la referencia y densidades que descienden en un 9% con respecto a los valores de la referencia. Como se ha comentado en el apartado anterior (A/E=0,6) el aumento de las durezas con respecto a las disminuciones de densidades no se ha encontrado en otras investigaciones.

En cuanto a las propiedades mecánicas de resistencias a flexotracción y compresión todos los compuestos sufren un descenso lineal en ambas propiedades, llegando a un máximo de un -40% y -51% respectivamente con respecto a los valores de la referencia. A medida que aumenta el % de adición de CA disminuyen las resistencias mecánicas.

Por lo tanto se consiguen compuestos más ligeros y con mayores valores en dureza que en el resto de A/E estudiadas.

El compuesto que mejor se comporta mecánicamente es 08CA6, pero no cumple las recomendaciones de la norma en cuanto a Ø de escurrimiento, además en este trabajo se pretende incorporar la máxima cantidad posible de residuo y de los compuestos ensayados no se ha encontrado ninguno que cumpla la mesa de sacudidas.

En relación A/E=0,9 se han realizado sólo tres porcentajes de adición de 10%, 15% y 20%. Se han observado densidades que disminuyen en -9%, durezas Shore C que aumentan un 14%, y disminuciones de la resistencia a flexotracción de un 14% y de un 48% en la resistencia a compresión.

Gráfica 35. Serie 09CA y serie de referencia.

Por tanto la relación A/E=0,9 es la que mejor se comporta en cuanto a que sufre pérdidas de resistencias mecánicas menores que las otras relaciones A/E ensayadas con respecto a la de referencia. Sin embargo, para obtener un material competitivo con los comercializados en la actualidad se podría considerar, en futuras investigaciones, el uso de aditivos para mejorar las propiedades mecánicas del compuesto.

6.3.1.2. Resultados del compuesto escayola con residuos de CT

En la tabla 32 se presentan los resultados obtenidos en los compuestos con incorporaciones de CT.

Denominación	Peso (g)	Densidad (g/cm³)	Dureza shore C	R. flexión (MPa.)	R. compresión (MPa.)
06CT6	296,96	1,210	91	6,11	14,50
06CT8	320,20	1,250	93	6,40	12,64
06CT10	321,10	1,250	93	6,13	11,74
07 CT 6	266,93	1,040	83	3,91	7,34
07 CT 10	270,37	1,056	82	3,65	6,56
07 CT 15	265,77	1,038	84	4,05	7,32
07 CT 20	263,68	1,030	86	4,26	7,14
08CT6	245,76	0,960	80	3,64	7,32
08CT8	250,88	0,980	81	3,82	5,63
08CT10	258,80	1,010	82	3,90	6,79
08CT15	242,87	0,949	76	3,18	5,28
08CT20	240,62	0,94	78	3,25	5,15
09 CT 10	234,00	0,914	82	3,79	5,90
09 CT 15	233,90	0,914	82	3,23	5,60
09CT20	230,50	0,900	73	2,23	3,54

Tabla 51. Resultados medios de las series realizadas con CT.

a) Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

En cuanto a adiciones de residuo de CT los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 52 constatando que con incorporaciones del 8 y 10 % y relaciones A/E=0,6 la consistencia de los compuestos es bastante fluida.

% CT	8%	10%
DENOMINACIÓN	06CT 8	06CT10
ØESCURRIMIENTO(mm)	178,8	170,0

Tabla 52. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 06CT.

Con este tipo de formato se puede añadir el residuo en porcentajes mucho mayores o utilizar relaciones A/E menores para conseguir resultados adecuados a la norma en la mesa de sacudidas ya que la CT no absorbe nada de agua durante el amasado, con lo que se obtienen pastas muy fluidas.

Con la relación A/E=0,7 se consigue un diámetro en la mesa de sacudidas dentro de la normativa sólo en el compuesto 07CT20 que incorpora un 20% de residuo de CT tal y como se observa en la Tabla 53.

% CT	15%	20%
DENOMINACIÓN	07CT15	07CT20
ØESCURRIMIENTO(mm)	>170	166

Tabla 53. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 07CT.

En relaciones de A/E 0,8 y 0,9 los resultados son mayores de 170 mm, el compuesto 09CT20 obtiene un Ø de escurrimiento de 211 mm. Como las consistencias son tan fluidas no se realiza la mesa de sacudidas.

Por lo tanto se puede concluir que el residuo CT no absorbe agua como ocurre con CA, además de obtener consistencias más fluidas en el compuesto se genera mucha burbuja que sin embargo no es evidente en mejoras de densidad.

b) Densidad

En la Gráfica 36 se muestran los valores de densidad de las series realizadas con distintos porcentajes de CT y las distintas relaciones A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9) (Tabla 51).

Gráfica 36. Densidad de las series CT y serie de referencia.

En general los compuestos que incorporan residuo CT obtienen densidades similares e incluso en algunos compuestos (06CT8 y 06CT10) un poco más altas que las escayolas sin aditivar.

El resto reducen un poco la densidad con respecto a la referencia pero con valores entre el 2% y el 5%.

El incremento de peso que se produce en algunos casos se debe a que la CT cuando se incorpora en la pasta de escayola no absorbe agua, generando muchas burbujas. Después, cuando la pasta comienza a fraguar y se produce un aumento de volumen en las probetas después del enrase de éstas, provocando incrementos de densidad ya que la probeta una vez desmoldada tiene una de las caras no planas. Estos compuestos en comparación con los otros residuos incorporados tardan más en secar por lo que es posteriormente cuando la CT absorbe agua, ya que además no se observan poros posteriormente en la rotura.

c) Capacidad de retención de agua

En la Tabla 54 se presentan las densidades aparentes de todos los compuestos que incorporan CT, y la capacidad de retención de agua de cada uno de ellos.

DENOMINACIÓN	A/E	PESO HÚMEDO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	PESO DESECADO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	RETENCIÓN DE AGUA (%)
07 REF	0,7	407,970	1,594	281,233	1,099	45,00
07CT6	0,7	381,330	1,490	266,930	1,043	42,86
07CT10	0,7	382,230	1,493	270,367	1,056	41,38
07CT20	0,7	366,510	1,432	263,68	1,03	39,00
08 REF	0,8	391,630	1,530	255,970	1,000	50,22
08CT7	0,8	384,630	1,502	255,170	0,997	50,65
08CT8	0,8	392,170	1,532	263,133	1,028	49,03
09 REF	0,9	381,870	0,933	238,870	0,933	59,87
09CT10	0,9	362,570	1,416	234,000	0,914	54,92
09CT15	0,9	359,330	1,404	233,900	0,914	53,61
09CT20	0,9	350,070	1,367	230,300	0,900	51,89

Tabla 54. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CT y la referencia.

A la vista de los resultados todos los compuestos que incorporan CT obtienen menores capacidades de retención de agua que las series de referencia. Para la misma incorporación del 20% de CT, a medida que se aumenta la relación A/E aumenta la capacidad de retención de agua del compuesto, como es lógico al haber más cantidad de agua se generan más poros. Y a medida que aumenta la incorporación del residuo disminuye la capacidad de retención de agua.

d) Dureza Shore C

La adición de CT mejora los valores de dureza superficial siendo mayores con más cantidad de residuo (Tabla 51). En general se observa una tendencia de mejora de la dureza con porcentajes de adición superiores al 8%, probablemente por colmatación de la porosidad de la escayola. Los valores de disminución no son significativos ya que la dureza se reduce tan solo un 2% con respecto a la referencia, como se observa en la Gráfica 37.

Gráfica 37. Dureza de las series CT y serie de referencia.

Con incorporaciones de residuo CT y relación A/E=0,6 los valores de durezas no varían con respecto a la referencia

Con incorporaciones de residuo CT y relación A/E=0,8 se obtienen durezas superiores en todos los casos a la dureza de la serie de referencia, pero los valores no son muy altos llegando a un máximo de un 5% de incremento con las incorporaciones del 10% de CT.

Las muestras que incorporan CT en relaciones A/E=0,9 obtienen también valores de dureza superiores al valor de la referencia en un 14%.

Los resultados obtenidos en dureza son en general superiores a los de la referencia. En algún caso no es así, pero las reducciones que se observan no superan el 2% con respecto a la referencia, excepto el compuesto 08CE15 que obtiene una dureza inferior a la de la serie de referencia en un 6%.

Por lo tanto, la adición de CT en general mejora los valores de dureza superficial.

e) Resistencia a flexotracción

En todos los compuestos de escayola y CT la resistencia a flexotracción decrece entre un 22% y un 29 % respecto a la referencia ensayada.

Gráfica 38. Resistencia a flexotracción de las series CT y serie de referencia.

Para todas las A/E estudiadas a mayor cantidad de residuo añadido, mayores reducciones de resistencia obtenidas. Salvo para A/E=0,7 donde para un 20% de CT la resistencia disminuye un 17% con respecto a la serie de referencia, menos que con las demás incorporaciones (29%). Además con un 20% de residuo CT se obtiene la misma resistencia de las muestras de referencia en relación A/E=0,8 (Gráfica 38).

El compuesto 97CT20 obtiene resistencias a flexotracción de 4,26 MPa, con la misma densidad (1,03 g/cm³) que el compuesto de escayola y lana mineral de Romaniega et al, cuyas resistencias a flexotracción de 5,172 MPa difieren en tan solo 1 MPa con la adición de CT (Romaniega Piñeiro, et al., 2015).

Los compuestos 09CT10 y 09CT15 con las mismas densidades, tienen un comportamiento que mejora a la referencia en cuanto a resistencia a flexotracción (Gráfica 39).

El compuesto 08CT15 obtiene densidades y resistencias similares a la referencia de A/E=0,9. Al igual que el compuesto 07CT20 y la referencia 08REF.

Gráfica 39. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CT y serie de referencia.

Los valores obtenidos en los ensayos de resistencias mecánicas son superiores a los valores de 1 MPa fijados por la norma UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción (B1).

f) Resistencia a compresión

Se observa en la Gráfica 40 que en todas las A/E estudiadas que los compuestos de escayola y CT reducen su resistencia proporcionalmente al incremento de % de residuo (Tabla 51).

Gráfica 40. Resistencia a compresión de las series CT y serie de referencia.

En estos compuestos la resistencia a compresión decrece un 39% como valor máximo en relaciones A/E=0,6; en compuestos de A/E=0,7 se obtienen disminuciones del 50%. Con CT y A/E=0,8 se observa que en todos los casos la resistencia disminuye en torno al 48% en los valores más altos. Con relaciones A/E=0,9 se puede observar que las adiciones de CT en un 10% y 15% producen el mismo efecto que las de 08CT15. Con la adición del 20% se obtiene la máxima disminución del 55% con respecto a la referencia.

En la Gráfica 41, se representan las densidades y sus correspondientes resistencias a compresión. Se puede apreciar que los compuestos que incorporan el máximo de residuo y dan resistencias similares son 09CT10, 08CT15, 07CT20 y 07CT10. Además el compuesto 06CT6 tiene una resistencia a compresión muy similar a la serie de referencia.

Gráfica 41. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CT y serie de referencia.

Los valores obtenidos en los ensayos de resistencias mecánicas son superiores al valor de 2MPa fijado por la norma UNE-EN 13279-2 para los yesos de construcción (B1).

g) Análisis de los compuestos en función del % de residuo

En este apartado se estudia la influencia del porcentaje de residuo en los compuestos con la misma relación A/E. Además se realiza un análisis estadístico de la muestra para confirmar la influencia de la variable porcentaje de residuo CT en los compuestos de las distintas series.

En la Gráfica 42 se muestran las propiedades estudiadas en los compuestos 06CT en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo.

Gráfica 42. Series 06CT y serie de referencia.

Foto 62. Realización de probetas con residuo CT.

Como se puede observar (Gráfica 42) con incorporaciones de CT no se consiguen mejorar las propiedades mecánicas de la serie de referencia y además no cumplen los requisitos de la norma en el ensayo de consistencia.

Los compuestos muestran densidades que superan la referencia en un 3%, que pueden deberse a que la CT no absorbe agua y que se crean burbujas de aire en el amasado manual produciendo un aumento de volumen de las probetas en el molde durante su fraguado (Foto 62). Los valores de durezas son superiores a la referencia en un 5%.

En cuanto a las resistencias en todos los compuestos se obtienen reducciones con respecto a los valores de referencia, en flexión en un 22% y en compresión un 39% con la máxima incorporación de CT.

El compuesto que mejor se comporta es 06CT6 ya que tiene densidades menores, las pérdidas de dureza son del 3%, y las resistencias mecánicas bajan un 22% y un 25% con respecto a la serie de referencia.

En cuanto a la relación $A/E=0,7$ en la Gráfica 43 se representan los diferentes porcentajes de CT en la escayola y su comportamiento en cuanto a las propiedades estudiadas.

Se puede observar que en cuanto a las densidades se consiguen variaciones pequeñas con respecto a la referencia ya que reducen en un 6%, pero son menores en todos los casos. Las durezas son similares a la serie de referencia. Las resistencias a flexotracción no se mejoran con la incorporación de CT (-29%), al igual que las resistencias a compresión (-50%) que son menores a la de referencia en todos los casos.

El compuesto con mejor comportamiento es 07CT20 ya que mejora en durezas, tiene densidades más bajas y las resistencias mecánicas disminuyen en un 18% y un 45%. Además este compuesto cumple con el ensayo de consistencia.

Gráfica 43. Series 07CT y serie de referencia.

En la Gráfica 44 se muestra un resumen de las propiedades estudiadas en el compuesto 08CT en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo.

Los compuestos realizados con este residuo muestran densidades inferiores (-8%) a la referencia y valores de durezas inferiores en un 6%. En cuanto a las resistencias todos los compuestos disminuyen los valores de referencia, en flexión en un 29% y en compresión un 49% con la máxima incorporación de CT.

Gráfica 44. Series 08CT y serie de referencia.

En la Gráfica 45 se muestra un resumen de las propiedades estudiadas en el compuesto 09CT en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo.

Los compuestos realizados con CT y A/E0=0,9 muestran densidades inferiores a la referencia (-3,5%) y valores de durezas superiores en un 14%, excepto el compuesto 09CT20 que aumenta en un 1,4%. En cuanto a las resistencias a flexotracción, los compuestos aumentan los valores de referencia en un 5 y 23%, excepto con la máxima incorporación del 20% de CT que disminuye la resistencia en un 28%. En resistencias a compresión los valores obtenidos son todos inferiores a la referencia, obteniendo una disminución del 55% con la máxima incorporación de CT.

Gráfica 45. Series 09CT y serie de referencia.

El compuesto que mejor se comporta es 09CA10 ya que mejora la resistencia a flexotracción y la dureza, su densidad disminuye y la resistencia a compresión es un 25% inferior a la serie de referencia.

Sin embargo, las incorporaciones de CT en compuestos con A/E=0,9 no cumplen con los requisitos de la mesa de sacudidas.

6.3.1.3. Resultados del compuesto escayola con residuos de CE

En la Tabla 55 se presentan los resultados medios obtenidos en los compuestos realizados con incorporaciones de CE.

DENOMINACIÓN	PESO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	DUREZA Shore C	R. FLEXIÓN (MPa.)	R. COMPRESIÓN (MPa.)
06CE3	320,00	1,250	94	7,57	19,96
06CE5	319,60	1,248	95	7,19	21,25
06CE6	309,98	1,211	95	7,23	21,58
06CE8	310,62	1,213	95	7,08	22,15
06CE10	309,76	1,210	95	6,63	22,66
07 CE 6	279,80	1,092	87	5,22	12,13
07 CE 10	287,73	1,124	88	5,37	12,65
07 CE 15	284,16	1,110	91	5,69	14,10
07 CE 20	286,23	1,118	93	5,86	15,24
08CE6	261,12	1,020	85	4,84	10,87
08CE8	265,97	1,039	87	4,80	10,99
08CE10	263,68	1,030	86	5,30	11,25
08CE15	263,80	1,030	85	5,42	11,49
08CE20	271,80	1,062	90	5,71	13,46
09 CE 10	245,73	0,960	84	4,43	10,15
09 CE 15	252,23	0,985	86	4,74	11,17
09CE20	253,37	0,990	82	4,40	12,56

Tabla 55. Resultados medios de las series realizadas con CE.

a) Determinación de la relación agua escayola (consistencia de los compuestos)

En la realización de probetas con incorporación de cenizas de cáscara de arroz se observa la demanda de agua de la ceniza cuando se añade ésta a la pasta, tal y como aprecia Aguila (2001), que en su trabajo observa como aspecto negativo que la adición de ceniza al cemento provoca una demanda mayor de agua para el amasado de la mezcla, lo cual tiende a disminuir su resistencia mecánica (I Águila, 2001).

En la Tabla 56 se observan los resultados obtenidos en los compuestos con escayola y residuo CE y relación A/E=0,6.

% CE	3%	5%	8%	10%
DENOMINACIÓN	06CE3	06CE5	06CE8	06CE10
Ø ESCURRIMIENTO (mm)	202,0	170,5	161,0	144,0

Tabla 56. Resultados Ø de escurrimiento medio en serie 06CE.

Con el 8% de incorporación de CE el compuesto obtiene resultados que cumplen la normativa en el ensayo de la mesa de sacudidas, sin embargo en porcentajes superiores se observa que la consistencia de la mezcla no tiene buena trabajabilidad (Gráfica 46).

Gráfica 46. Resultados de la mesa de sacudidas en serie 06CE.

No obstante, en este apartado sólo se pretende comparar estas consistencias con otros investigadores que han utilizado estas relaciones A/E en otros compuestos de yeso.

En la relación A/E=0,7 el compuesto que cumple la mesa de sacudidas es 07CE15 con un Ø de escurrimiento de 161,5 cm.

RELACIÓN A/E	% CE	10%	15%	20%	30%
A/E=0,7	DENOMINACIÓN	07CE10	07CE15	07CE20	
	Ø ESCURRIMIENTO (mm)	170,73	164,5	143,1	—
A/E=0,8	DENOMINACIÓN	08CE10	08CE15	08CE20	
	Ø ESCURRIMIENTO (mm)	190,0	170,0	160,0	—
A/E=0,9	DENOMINACIÓN	09CE10	09CE15	09CE20	09CE30
	Ø ESCURRIMIENTO (mm)	236,45	193,8	173,95	154,1

Tabla 57. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 07CE, 08CE y 09CE.

Con incorporaciones de CE y A/E=0,8 los compuestos que cumplen la mesa de sacudidas son 08CE15 y 08CE20, cuyos resultados se encuentran en los límites aceptados por la normativa.

Con incorporaciones de CE y A/E=0,9 los compuestos no cumplen estrictamente la normativa pero se encuentran en valores cercanos a los límites marcados por ésta (165 ± 5 mm).

En general los compuestos con incorporaciones de residuo CE, para consistencias que cumplen la mesa y superiores, cuando entran en contacto con la pasta de escayola disminuyen la trabajabilidad, pues este residuo absorbe gran cantidad de agua del amasado y hace que la mezcla sea difícilmente trabajable. Sin embargo durante el amasado y a medida que la ceniza se va incorporando a la pasta la trabajabilidad va aumentando, e incluso, se obtienen consistencias que cumplen la norma (Tabla 57).

b) Densidad

En la Gráfica 47 se muestran los resultados de densidad de todos los compuestos de escayola con CE y relación A/E estudiadas (0,6; 0,7; 0,8; 0,9) (Tabla 55).

Gráfica 47. Densidad de las series CE y serie de referencia.

Las densidades de los compuestos realizados con A/E=0,6 son similares a las de la serie de referencia, sin embargo para el resto de las A/E la tendencia es que a mayor porcentaje de residuo mayor es la densidad de los compuestos, aunque estos incrementos son valores muy pequeños (3% y 6%), como se puede observar en la Gráfica 47. Esto como se ha comentado anteriormente se debe a que la densidad del residuo CE es mayor que la densidad de la escayola, por tanto estamos incrementando el peso de los compuestos.

c) Capacidad de retención de agua

Las densidades aparentes tanto en estado húmedo como en estado seco después de 7 días y la capacidad de retención de agua se obtienen tal como se define en el apartado 5.4.2.9.

DENOMINACIÓN	A/E	PESO HÚMEDO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	PESO DESECADO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	RETENCIÓN DE AGUA (%)
06 REF	0,6	415,187	1,622	310,016	1,211	33,94
06CE6	0,6	416,03	1,625	308,2	1,204	34,97
06CE8	0,6	411,37	1,607	308,200	1,204	33,47
07 REF	0,7	407,970	1,594	281,233	1,099	45,00
07CE6	0,7	399,570	1,561	279,800	1,093	42,82
07CE10	0,7	408,400	1,595	287,733	1,124	41,90
07CE15	0,7	397,82	1,554	284,16	1,110	40,00
07CE20	0,7	396,970	1,551	286,230	1,118	38,73
08 REF	0,8	391,630	1,530	255,970	1,000	50,22
08CE8	0,8	396,670	1,549	266,667	1,042	48,66
08CE15	0,8	389,900	1,523	265,300	1,036	47,00
08CE20	0,8	395,570	1,545	271,800	1,062	45,48
09 REF	0,9	381,870	0,933	238,870	0,933	59,87
09CE15	0,9	386,300	1,509	252,233	0,985	53,20
09CE20	0,9	389,370	1,521	253,370	0,990	53,64

Tabla 58. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CE y la referencia.

A la vista de los resultados obtenidos en la Tabla 58, con incorporaciones del 20% de CE, la relación A/E 0,7 reduce un 14% la capacidad de retención de agua de los compuestos, en A/E 0,8 un 9% y en A/E 0,9 un 10%, es decir a medida que aumenta la relación A/E la capacidad de retención de agua disminuye, ya que hay más agua de amasado.

d) Dureza Shore C

Con incorporaciones de CE las durezas obtenidas en la serie 06 son superiores a la de referencia en un 2,5% como valor máximo, en las series 07 y 08 se obtienen mejoras de un 11% y en 09 en un 14% (Tabla 55)

En todas las series estudiadas (Gráfica 48), las durezas obtenidas están por encima de los valores de referencia. En el caso de las probetas realizadas con A/E=0,7 el incremento de la dureza sigue un comportamiento lineal en relación al porcentaje de residuo incorporado. Con relaciones A/E=0,8 llegan al máximo con un incremento de un 15% en el compuesto que incorpora un 20% de CE.

En cuanto a la relación A/E=0,9 se obtienen valores superiores a la referencia entre un 14% y 20%.

Gráfica 48. Dureza de las series CE y serie de referencia.

e) Resistencia a flexotracción

En la Gráfica 49 se representan los resultados obtenidos en los ensayos de flexotracción sobre los compuestos con incorporaciones de CE y distintas relaciones A/E (Tabla 55).

Gráfica 49. Resistencia a flexotracción de las series CE y serie de referencia.

En general la resistencia a flexotracción aumenta con aumento de la adición excepto en la serie A/E=0,6.

La serie 06CE obtienen resistencias que están por debajo de la referencia en valores que no superan el 10% para el máximo % estudiado. Según Aguila esto se debe a la demanda de agua de la ceniza (I Águila, 2001).

En la serie realizada con A/E=0,7 se consiguen aumentos de la resistencia a flexotracción del 3% con adiciones del 20% de CE sobre el peso de la escayola.

Con adiciones de CE en las series 08CE la resistencia a flexotracción aumenta su valor hasta un 30% en adiciones de un 10% de CE, siendo este aumento de resistencia a flexotracción el mayor obtenido en los ensayos para A/E=0,8. Todos los porcentajes añadidos superan la referencia.

La serie 09CE obtiene valores de resistencia a flexotracción muy superiores a los de la referencia ya que las tres dosificaciones 10%, 15% y 20% el aumento de la resistencia es del 44%, 54% y 43% respectivamente.

La Gráfica 50 representa las densidades de todos los compuestos ensayados y sus resistencias a flexotracción. Con incorporaciones máximas de CE los compuestos que mejoran las series de referencia son 09CE15, 08CE20, 07CE15 y 07CE20 (señalados en la Gráfica 50).

Gráfica 50. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CE y serie de referencia.

Además como se puede observar (Gráfica 50) la línea de tendencia tiene un coeficiente de determinación $R^2=0,84$.

Los valores obtenidos en los ensayos de resistencias mecánicas son superiores a los valores fijados por la norma UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción (B1).

f) Resistencia a compresión

En la Gráfica 51 se representan los resultados obtenidos en los ensayos de compresión sobre los compuestos con incorporaciones de CE y distintas relaciones A/E (Tabla 55).

Gráfica 51. Resistencia a compresión de las series CE y serie de referencia.

La serie 06CE obtienen en todos los casos mejoras de la resistencia a compresión. El caso más favorable es el compuesto que incorpora un 10% de residuo CE en el que se obtienen incrementos de resistencia de un 17%. Las resistencias siguen una relación lineal.

En el caso de las series 07CE el aumento de resistencia a compresión es directamente proporcional a la incorporación de CE. Se aumentan las resistencias hasta un 27%.

En las series 08CE las resistencias son todas superiores a la serie de referencia, obteniendo valores superiores en un 33% respecto a la serie de referencia en el caso del compuesto 08CE20.

En los resultados obtenidos en las series 09CE se puede observar que con adiciones de CE del 10%, 15% y 20% la resistencia aumenta en un 29%, 42% y 59% respectivamente, con respecto a la de referencia.

En la Gráfica 52 que relaciona las densidades con las resistencias a compresión, las máximas incorporaciones de CE con aumentos de los valores de referencia son los compuestos 09CE20, 08CE20, 07CE15 y 07CE20.

Gráfica 52. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CE y serie de referencia.

Se observa además Gráfica 52 el ajuste de la línea de tendencia que obtiene un $R^2=0,83$.

Los valores obtenidos en los ensayos de resistencias mecánicas son superiores a los valores fijados por la norma UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción (B1).

g) Análisis de los compuestos en función del % de residuo

En este apartado se estudia la influencia del porcentaje de residuo en los compuestos con la misma relación A/E. Además se realiza un análisis estadístico de la muestra para confirmar la influencia de la variable porcentaje de residuo CE en los compuestos de las distintas series.

Gráfica 53. Series 06CE y serie de referencia.

En la Gráfica 53 se muestran las propiedades estudiadas en el compuesto 06CE en los distintos porcentajes de adición de dicho residuo.

Como se puede observar en la Gráfica 53 la densidad y la dureza tienen un comportamiento similar a la referencia. Sin embargo el comportamiento mecánico del material difiere, la

resistencia a flexión disminuye un máximo del 16% y las resistencias a compresión aumentan hasta llegar a un valor máximo del 17%. Sin embargo nos encontramos ante compuestos que no tienen buena trabajabilidad por su mínimo contenido de agua y la avidez de la ceniza por ésta.

La Gráfica 54 muestra los resultados obtenidos en los compuestos realizados con $A/E=0,7$ y distintos porcentajes de CE.

Gráfica 54. Series 07CE y serie de referencia.

Como se puede observar la densidad supera a la de la referencia en todos los compuestos analizados, sin embargo este incremento no llega en ningún caso a superar el 2%. Además se observa que la resistencia a flexotracción y resistencia a compresión de los compuestos con adiciones de CE aumentan hasta un 16% y en un 11% la dureza Shore C.

El mejor compuesto es 07CE15 ya que cumple con los requisitos de la norma en cuanto al ensayo de consistencias, con densidades similares a la serie de referencia, incrementos de durezas y resistencias a compresión en un 8% y de resistencias a flexotracción en un 10%.

En la Gráfica 55 se muestra un resumen de las propiedades estudiadas en los compuestos 08CE.

En estos compuestos la densidad es similar a la densidad de la serie de referencia, sin embargo los valores de la dureza van aumentando a medida que el porcentaje de CE es mayor llegando a superar a la referencia en un 11%. La resistencia a flexión aumenta en todos los casos hasta llegar al 30% con respecto a la referencia. Las resistencias a compresión aumentan hasta un máximo del 33% en el compuesto que incorpora el 20% de CE.

El compuesto con mejor comportamiento a resistencias es 08CE20, sin embargo las exigencias de la normativa en cuanto a la mesa de sacudidas están al límite en este compuesto.

Gráfica 55. Series 08CE y serie de referencia.

En la Gráfica 56 se muestra un resumen de las propiedades estudiadas en los compuestos 09CE.

Gráfica 56. Series 09CE y serie de referencia.

Estos compuestos obtienen valores de densidades muy similares a la serie de referencia. Las durezas superan a la de referencia entre un 14-19%. Las resistencias mecánicas son todas superiores a la serie que no incorpora ningún residuo y obtienen sus valores máximos en el compuesto 09CE15 cuya resistencia a flexotracción llega a superar a la referencia en un 54% y a la resistencia a compresión en un 42%.

El mejor compuesto es 09CE15. Sin embargo, ninguno de los compuestos estudiados cumplen los valores exigidos en la norma en cuanto a mesa de sacudidas.

6.3.1.4. Influencia de la relación A/E

En este análisis se observa de manera general la influencia del agua en los compuestos, es decir, las interacciones entre la relación A/E y otras variables como el porcentaje de CA, CT y CE no se han tenido en cuenta en este análisis, es por ello que los coeficientes de determinación son muy bajos.

a) Densidades

Las densidades son menores con relaciones A/E de 0.7, 0.8 y 0.9 (Gráfica 57).

Como en los estudios realizados por Del Río, en su tesis doctoral, se puede observar que aumentando la relación A/E se consigue compuestos más ligeros (del Río Merino, 1999).

Toda la bibliografía encontrada las incorporaciones de agua mayores producen densidades menores (Francisco Javier González Madariaga, 2008; Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012; Oteiza, 1993; Romaniaga Piñeiro, 2016).

Aunque la finalidad de esta Tesis no es aligerar la escayola con este residuo, sino darle una utilidad posterior, se pretende no incrementar en exceso la densidad del compuesto final con respecto a la escayola sin adiciones para conseguir un material competitivo.

Gráfica 57. Densidades (g/cm³) según A/E.

Las mayores densidades se obtienen en los compuestos que corresponden a las series 06 siendo menores las de 07, 08 y 09, con alguna excepción que corresponde a la adición del tipo de residuo factor muy significativo en el ANOVA realizado en el Anexo 1, con pvalores inferiores a 0,005.

También se presentan las relaciones A/E por separado en las Gráficas 58 donde se observa la baja relación lineal que hay entre las densidades y el % de residuo incorporado como además lo corrobora el análisis estadístico realizado en el Anexo 1.

Gráficas 58. Densidades (g/cm³) según A/E.

b) Durezas Shore C

En la Gráfica 59 se representan todos los compuestos diferenciados por las distintas A/E.

Como en los trabajos de Del Río (1999), las durezas obtenidas son en general superiores en relaciones con menos agua de amasado, es decir, siguen la tendencia general encontrada en la bibliografía (del Río Merino, 1999). En todas las relaciones A/E se consiguen durezas superiores a las durezas de las series de referencia, además se puede observar en la Gráfica 59 que hay compuestos que corresponden a la serie 07 que obtienen durezas iguales a la referencia de la serie 06 que corresponde a la de mayor dureza por ser la que incorpora menos agua de amasado.

Gráfica 59. Durezas Shore C según A/E.

El compuesto que incorpora el 20% de CE con una relación A/E 0,7 consigue la misma dureza superficial que una escayola sin adiciones y con menos agua de amasado (A/E=0,6).

En las Gráficas 60 se puede observar que las durezas en general son muy similares o aumentan según va aumentando la incorporación de residuo, sin embargo en la serie 0,9 la incorporación del 20% de residuos provoca una reducción de dureza en todos los tipos de residuos.

Gráficas 60. Durezas Shore C según A/E.

En un compuesto la dureza Shore C disminuye con la reducción de la densidad, debido al mayor porcentaje de poros, y por tanto a la posibilidad de ser penetrado o rayado, y a la resistencia superficial de la adición (Sara Gutiérrez González, 2012). Sin embargo, las incorporaciones de CE que obtienen densidades superiores también incrementan las durezas superficiales.

c) Resistencia a flexotracción

Los resultados de resistencia a flexotracción de los distintos compuestos se representan en la Gráfica 61, diferenciados por las distintas A/E.

Conforme a otros autores como Del Río (1999), Gutiérrez González et al. (2012) y Romaniega (2016), las resistencias a flexotracción son mayores cuando la cantidad de agua de amasado es menor (del Río Merino, 1999; Sara Gutiérrez González, 2012; Romaniega Piñeiro, 2016). Como se puede observar (Gráfica 61) a medida que aumenta el agua de amasado disminuyen las resistencias a flexotracción. Las líneas de tendencia indican una bajada de resistencias más acusada en relación A/E 0,6 que en las otras relaciones. Se puede observar que los compuestos que añaden CE en cualquiera de las cuatro relaciones de A/E obtienen mejores resistencias que las incorporaciones de los otros residuos, y en las series 07, 08 y 09 superan las resistencias de la serie de referencia.

Gráfica 61. Resistencias a flexotracción (MPa) según A/E.

Todas las resistencias a flexotracción obtenidas son superiores a la requerida por la normativa UNE EN 13279-2 de 1MPa.

Se representan en las Gráficas 62 las resistencias a flexotracción de las relaciones A/E estudiadas. Se observa que la incorporación de residuo afecta a las resistencias a flexotracción.

Gráficas 62. Resistencias a flexotracción (MPa) según A/E.

d) Resistencia a compresión

En la Gráfica 63 se representan los resultados de resistencia a compresión de todos los compuestos diferenciados por las distintas A/E. Además se representan sus líneas de tendencia en cada relación A/E.

Conforme a otros autores como Del Río y Romaniega, las resistencias a compresión son mayores cuando la cantidad de agua de amasado es menor (del Río Merino, 1999; Romaniega Piñeiro, 2016). Las líneas de tendencia indican una bajada brusca de resistencias en compuestos con A/E 0,6, al igual que ocurre con la resistencia a flexotracción. El resto de relaciones A/E tienen un comportamiento similar y en general disminuyen las resistencias.

Gráfica 63. Resistencias a compresión (MPa) según A/E.

Todas las resistencias a compresión obtenidas son superiores a la requerida por la normativa UNE EN 13279-2 de 2 MPa.

Gráficas 64. Resistencias a compresión (MPa) según A/E.

6.3.1.5. Influencia del tipo y % de residuo

a) Densidades

En la Gráfica 65 se representan las densidades de todos los compuestos estudiados y las referencias de las distintas A/E.

Gráfica 65. Densidades (g/cm³) según CA, CT, CE.

De los tres residuos incorporados CA, CT y CE, el residuo que consigue aligerar más es CA con una disminución máxima del 9% con respecto a la densidad de referencia en el compuesto 09CA20. Todos los compuestos con incorporación de CA reducen la densidad con respecto a la referencia.

El residuo CE obtiene densidades similares y no obtiene en ningún caso disminuciones de densidad. Los compuestos realizados con CT obtienen compuestos más ligeros en todos los casos excepto en relación A/E 0,6.

Las densidades obtenidas se encuentran entre los valores 0,9 y 1,25 (g/cm³), por lo que se insiste en la poca variación de ésta en los compuestos estudiados. Por lo tanto las incorporaciones de residuo de CA, CT y CE a la escayola no consiguen compuestos más ligeros.

b) Durezas Shore C

En la Gráfica 66 se representan las durezas Shore C de todos los compuestos estudiados y las referencias de las distintas A/E.

Gráfica 66. Durezas Shore C según CA, CT, CE.

Como conclusión podemos decir que los tres residuos dan durezas superiores a la de referencia, la incorporación de CA obtiene aumentos de durezas del 14% en la relación A/E

0,9. El compuesto que obtiene mejores resultados es el que incorpora CE llegando a un aumento del 19% con respecto a la referencia con incorporaciones del 20% de CE (09CE20).

c) Resistencia a flexotracción

En la Gráfica 67 se representan las resistencias a flexotracción de los compuestos ensayados.

En cuanto al comportamiento de los compuestos en resistencia a flexotracción, se puede concluir tal y como se observa en la Gráfica 67, que los que incorporan el residuo en formato CE obtienen mejores resistencias que la serie de referencia en un 54%,

Los compuestos que incorporan CT y CA no mejoran la serie de referencia y obtienen reducciones del 51% como máximo.

Gráfica 67. Resistencias a flexotracción según CA, CT, CE.

d) Resistencia a compresión

Las resistencias a compresión sufren reducciones con las distintas incorporaciones de CA y CT, ya que se reducen las resistencias a compresión en un 70% en el caso más desfavorable. Sin embargo el compuesto CE se comporta mejor, ya que aumenta las resistencias a compresión en un 59% en el caso más favorable.

Gráfica 68. Resistencias a compresión según CA, CT, CE.

Como se puede observar los compuestos con incorporaciones de CA y CT disminuyen las resistencias a compresión con respecto a cada una de las referencias, esto se debe a que los

residuos CA y CT son fibras que no tienen resistencia a compresión (Oteiza 1999). Sin embargo los compuestos que incorporan CE aumentan las resistencias a compresión, el compuesto 09CE20 consigue un aumento del 59% con respecto a la serie de referencia.

Por lo tanto se puede concluir que las incorporaciones de CE a la escayola obtienen compuestos más resistentes a compresión.

6.3.2. Resultados de los ensayos realizados en la FASE 2

En esta fase se relacionan las densidades de los compuestos sus propiedades mecánicas. En base a ello se seleccionan los compuestos que han obtenido buena trabajabilidad en el ensayo de consistencias y en base a ello los compuestos que cumplen con las resistencias mecánicas que exige la normativa y cuyas densidades sean similares a la referencia. Se seleccionan los compuestos que cumplen el diámetro de la mesa de sacudidas de 165 ± 5 mm.

Además se analiza la absorción de agua por capilaridad de los compuestos y se realizan ensayos de adherencia superficial y comportamiento térmico a una serie de compuestos.

6.3.2.1. Densidad vs Dureza Shore C

En la Gráfica 69 se pueden observar las densidades de todos los compuestos con relaciones AE de 0,7, 0,8 y 0,9 y sus durezas superficiales. En función de las consistencias obtenidas en la mesa de sacudidas, del residuo CA el compuesto que obtiene la mejor dureza y un 7% menos de densidad es el 07CA10. En CT las mejores durezas son las del compuesto 07CT20 y cumple las exigencias de la mesa de sacudidas, al igual que el compuesto 07CE15.

Gráfica 69. Densidad vs Dureza Shore C en series CA, CT, CE.

6.3.2.2. Densidad vs Resistencia a flexotracción

En la Gráfica 70 se representa la relación entre la densidad de los compuestos y la resistencia a flexotracción.

Se han representado todos los compuestos ensayados y se han marcado con línea discontinua el mínimo exigido por la normativa UNE EN 13279-2 en color rojo.

Gráfica 70. Densidad vs Resistencia a Flexotracción en series CA, CT, CE.

Como se puede observar en la Gráfica 70 todos los compuestos ensayados obtienen resistencias superiores al valor mínimo exigido por la normativa.

Los compuestos que obtienen densidades menores son los que incorporan CA en porcentajes 10% y 15%. Además la tendencia de los compuestos es lineal según el residuo del que se trate, es decir que a mayor densidad las resistencias a flexotracción van aumentando. Las mejores resistencias a flexotracción se obtienen en las incorporaciones de CE seguidas de CT y CA.

En la Gráfica 71 se representan los compuestos con las máximas incorporaciones de CA, CT y CE y en relaciones de AE 0,7, 0,8 y 0,9.

Gráfica 71. Densidad vs Resistencia a Flexotracción en series CA, CT, CE.

Los compuestos que obtienen el máximo aumento en resistencia a flexotracción y que además cumplen la normativa en cuanto al ensayo de consistencias son el 07CA10, 07CT20 y 07CE15.

6.3.2.3. Densidad vs Resistencia a compresión

En la Gráfica 72 se representa la relación que hay entre la densidad de los compuestos y la resistencia a compresión.

Gráfica 72. Densidad vs Resistencia a Compresión en series CA, CT, CE.

Todas las resistencias a compresión son superiores al valor mínimo exigido por la normativa UNE EN 13279-2. Los compuestos que se comportan mejor en cuanto a compresión son los que incorporan CE al igual que en flexotracción.

Los compuestos con incorporaciones de CA y CT en porcentajes de 6, 8 y 10% de residuo que tienen densidades mayores, obtienen resistencias a compresión como los compuestos que incorporan CE con menores densidades.

La mejora del comportamiento mecánico de la escayola se suele conseguir de dos formas distintas, una de ellas es introduciendo en su masa fibras, sin embargo la fibra CA y CT no obtienen estos incrementos de resistencias.

Otra forma de optimizar las resistencias es utilizando aditivos. Algunas de estas adiciones son reductores de agua, porque eliminar el agua es fundamental para aumentar la resistencia (Gao & Shao 2012). Es el caso de la adición de CE, ya que este residuo contiene muy poca humedad y al confeccionar las probetas absorbe el agua de amasado consiguiendo incrementos en las resistencias tanto a flexotracción como a compresión.

En la Gráfica 73 se representan los compuestos con las máximas incorporaciones de CA, CT y CE en relaciones de AE 0,7, 0,8 y 0,9.

Gráfica 73. Densidad vs Resistencia a Compresión en series CA, CT, CE.

Los compuestos que obtienen el máximo aumento en resistencia a compresión y que además cumplen la normativa en cuanto a la mesa de sacudidas son el 07CA10, 07CT20 y 07CE15.

6.3.2.4. Absorción de agua por capilaridad

Se realiza el ensayo en probetas con incorporaciones de CA, CT y CE y en distintas series AE. Los resultados de todos los compuestos se representan en la Gráfica 74.

Como se puede observar de todos los compuestos los que tienen menor incremento en peso son 07CA10, 07CA15 y 07CT20. En general la serie 0,7 tiene menos incremento de peso en sus compuestos, seguida de la serie 0,9 y 0,6. Los compuestos que tienen un incremento mayor son los de la serie 0,8 y el compuesto 09CE15.

Gráfica 74. Absorción de agua por capilaridad.

Los resultados del ensayo de capilaridad son los que se presentan en la Tabla 59, Tabla 60, y Tabla 61.

DENOMINACIÓN	06CE6	06CA8	06CT8	06CE8
Peso inicial (g)	308,4	296,1	298,9	311,1
Peso final (g)	329,3	314,0	319,5	333,6
Δ (%)	6,8	6,0	6,9	7,2
Absorción (mm/min)	63	58	65	65

Tabla 59. Resultados serie 0,6 absorción de agua por capilaridad.

DENOMINACIÓN	07CA10	07CA15	07CT15	07CE15	07CA20	07CT20
Peso inicial (g)	268,2	150,5	139,4	285,7	139	259,7
Peso final (g)	285,2	167,1	154,6	305,7	159,2	277,4
Δ (%)	6,3	11	10,9	7	14,5	6,8
Absorción (mm/min)	58	57	68	57	68	55

Tabla 60. Resultados serie 0,7 absorción de agua por capilaridad.

DENOMINACIÓN	08CA15	08CT15	09CA20	09CT20	09CE15
Peso inicial (g)	124,8	124,4	219,6	231,2	254,5
Peso final (g)	148,6	149,7	242,1	256,1	298,2
Δ (%)	9,1	20,3	10,2	10,8	17,2
Absorción (mm/min)	71	76	64	73	90

Tabla 61. Resultados series 0,8 y 0,9 absorción de agua por capilaridad.

Los resultados del ensayo muestran menor tendencia a absorber agua de los compuestos a pesar de lo previsible, que según González Madariaga 2008, sería al contrario debido a las diferencias de estructura entre un material compuesto y un material homogéneo (Gráfica 75)

Gráfica 75. Absorción de agua por capilaridad.

Cuando la proporción de agua en el amasado es mayor al evaporarse durante el fraguado deja más huecos o poros que tienden a llenarse de agua durante el ensayo de absorción (de Villanueva Domínguez & García Santos, 2001). Por tanto los compuestos menos porosos son los que incorporan CA, como se comprueba en el apartado 6.4.4.1.

A la vista de los resultados obtenidos en este capítulo, se opta por realizar nuevas series de probetas de escayola-residuo de arroz, y realizar ensayos de adherencia superficial y de comportamiento térmico. Estos ensayos se realizan a los compuestos que como se ha podido comprobar se han ido seleccionando a lo largo de todo el capítulo en función del ensayo de consistencia y de las propiedades tanto físicas como mecánicas del material.

Se realizan ensayos de adherencia y conductividad térmica en muestras de relación A/E=0,8 y A/E=0,7. Se analizan compuestos de relación AE=0,8 con el fin de determinar algunas aplicaciones para éstos que no cumplen las exigencias de la normativa en cuanto al ensayo de consistencias.

6.3.2.5. Adherencia superficial

Uno de los temas fundamentales de la escayola es el estudio de su porosidad, ya que esta característica determina su comportamiento mecánico. Cuando se utilizan fibras para reforzar la escayola, su adherencia está directamente relacionada con la porosidad de la matriz; se considera importante profundizar en este tema, buscando la mejora de la adherencia fibra matriz, mediante la reducción de porosidad. Es posible que a través de la compactación o de la reducción del agua de amasado se logre una mayor adherencia. El autor concluye que la adherencia de la fibra de sisal a la matriz de escayola está en relación inversa con la cantidad de agua de amasado, siendo mayor la adherencia cuanto menor es la cantidad de agua. Cuanto más compacta sea la matriz, mayor fuerza de adherencia fibra-matriz (Oteiza, 1993).

Los resultados promedio obtenidos en el ensayo de adherencia se muestran en la siguiente tabla 41.

Donde la rotura Tipo A es la rotura que se produce por adhesión (en la interfase yeso-soporte) y la rotura Tipo B es la rotura que se produce por cohesión (en la masa del yeso).

DENOMINACIÓN	TIPO DE ROTURA	Fu (N)	Ru (N/mm ²)	Δ adherencia (%)
07REF	TIPO A	745	0,38	0

DENOMINACIÓN	TIPO DE ROTURA	Fu (N)	Ru (N/mm ²)	Δ adherencia (%)
07CA10	TIPO B	630	0,32	-15,79%
07CT20	TIPO B	905	0,46	+21,05%
07CE15	TIPO A	980	0,50	+31,58%

Tabla 62. Resultados de ensayos mecánicos en probetas ensayadas a resistencia a la adherencia.

Como se observa en los resultados obtenidos en los ensayos, los compuestos realizados con el residuo CA en incorporaciones del 10% del peso de escayola obtienen unas resistencias inferiores a los resultados de la referencia en un 15,79%. La rotura producida en estas mezclas es rotura por cohesión o rotura tipo B que se produce en la masa de escayola-CA, lo que significa que los valores de resistencia de adherencia son superiores a los obtenidos en el ensayo.

Sin embargo los compuestos realizados con CT y CE obtienen resistencias a la adherencia superiores a los valores de la escayola sin aditivar. Con incorporaciones de CT se aumenta la adherencia en un 21,05% y con adición de CE incrementa en un 31,58% con respecto a la referencia. En los compuestos con CT se observa también rotura por cohesión, es decir que los valores de la resistencia a adherencia son superiores a los del ensayo. Con CE la rotura es por adhesión.

Se realiza además en la relación A/E=0,8 ensayos de adherencia con los distintos residuos y con incorporaciones del 10%. Los resultados obtenidos son los de la Tabla 63

DENOMINACIÓN	TIPO DE ROTURA	Fu (N)	Ru (N/mm ²)	Δ adherencia (%)
08REF	TIPO A	580	0,30	0
08CA10	TIPO B	576	0,29	-3,3%
08CT10	TIPO B	719	0,37	+23,3%
08CE10	TIPO A	692	0,35	+16,67%

Tabla 63. Resumen de resultados de adherencia en serie 08.

Como se observa en los resultados obtenidos en los ensayos, los compuestos realizados con el residuo CA en incorporaciones del 10% del peso de escayola obtienen unas resistencias inferiores a los resultados de la referencia en un 3,3%. La rotura producida en estas mezclas es rotura por cohesión o rotura tipo B que se produce en la masa de escayola-CA, lo que significa que los valores de resistencia de adherencia son superiores a los obtenidos en el ensayo.

Sin embargo los compuestos realizados con CT y CE obtienen resistencias a la adherencia superiores a los valores de la escayola sin aditivar. Con incorporaciones de CT se aumenta la adherencia en un 23,3% y con adición de CE incrementa en un 16,67% con respecto a la referencia. En los compuestos con CT se observa también rotura por cohesión, es decir que los valores de la resistencia a adherencia son superiores a los del ensayo, con CE la rotura es por adhesión.

Como se puede observar ambos los compuestos que incorporan CA obtienen pérdidas de resistencia a la adherencia, además se observa en la rotura como la escayola queda totalmente desprendida de la cáscara una vez rota la probeta. Sin embargo los residuos de CT y CE incrementan la resistencia a la adherencia.

6.3.2.6. Comportamiento térmico

La conductividad térmica es una propiedad que está ligada a la densidad de los materiales, es por esto que los materiales más ligeros suelen obtener coeficientes de conductividad menores.

En la Tabla 64 se puede apreciar como algunos materiales que son más densos que otros tienen una conductividad menor. Esto se debe a que existe una amplia dispersión de características físicas entre materiales semejantes, ya que para un mismo material se pueden medir conductividades diferentes en función de la humedad, de la temperatura de ensayo y dirección del flujo de calor.

TIPO DE PARED	Densidad (g/cm ³)	λ (W/m ² *K)
Hormigón celular sin áridos	0,305	0.09
Hormigón de fibra de madera	450	0.08
Hormigón en masa arcilla expandida L	500	0.12
Enlucido de yeso con perlita	570	0.18
Hormigón con áridos ligeros L	600	0.17
Enlucido de yeso	800	0.30
Hormigón con áridos ligeros M	1000	0.33
Hormigón en masa arcilla expandida P	1500	0.55
Hormigón en masa áridos ligeros	1600	0.73
Mortero de cal o bastardo	1600	0.87
Hormigón en masa sin vibrar	2000	1,16
Mortero de cemento	2000	1.40
Arcilla	2100	0.93
Hormigón en masa vibrado	2400	1.63
Hormigón armado normal	2400	1.63

Tabla 64. Coeficiente conductividad térmica de algunos materiales.

Los datos de la Tabla 65 son los obtenidos en los ensayos no normalizados en compuestos 08 e incorporaciones de CA, CT y CE.

TIPO DE PARED	Densidad (g/cm ³)	λ (W/m ² *K)	Δ coeficiente de conductividad (%)
08REF	1,02	0.196	0
08CA7	0,99	0.131	-33
08CA10	0,95	0.221	13
08CA15	0,98	0.186	-5
08CT7	0,97	0.146	-26
08CT10	1,02	0.203	4
08CT15	0,96	0,249	27
08CE7	1,06	0.208	6
08CE10	1,07	0.192	-2
08CE15	1,03	0,107	-45

Tabla 65. Resumen de resultados de conductividad térmica en serie 08.

Como se puede observar, no hay una tendencia lineal entre la densidad y la conductividad térmica. Además todos los compuestos ensayados en esta investigación son menos porosos que la muestra de referencia.

En cuanto a las incorporaciones de CA los coeficientes de conductividad térmica no siguen ninguna tendencia. Los valores obtenidos en el compuesto con CA puede que tenga variabilidades debidas a la humedad del residuo y a la disposición de éste dentro de la matriz.

Gráfica 76. Conductividades térmicas de las series 0,8-CA.

Las incorporaciones de CT aumentan el coeficiente de conductividad térmica a medida que aumenta el % de residuo, sin embargo las densidades no siguen la misma tendencia. Es decir no hay relación entre las variables densidad y coeficiente de conductividad térmica.

Gráfica 77. Conductividades térmicas de las series 0,8-CT.

Gráfica 78. Conductividades térmicas de las series 0,8-CE.

Los compuestos que incorporan CE a la escayola disminuyen su coeficiente de conductividad térmica con incorporaciones mayores de CE. Sin embargo tampoco existe relación entre las densidades y los coeficientes de conductividad térmica, al igual que ocurre con los compuestos con residuo CT.

Los compuestos que incorporan CA y CT consiguen reducciones de λ cuando el porcentaje de residuo es inferior (7%), sin embargo en adiciones de CE las mayores disminuciones se producen cuando el porcentaje de residuo es elevado (15%).

Por lo tanto, para la relación $A/E=0,8$ los coeficientes de conductividad térmica no siguen una tendencia según el porcentaje de residuo incorporado, esto puede que se deba al porcentaje de humedad que tenga el compuesto en el ensayo.

Los compuestos realizados con relación $A/E=0,7$ obtienen en todos los compuestos ensayados disminuciones del coeficiente de conductividad térmica.

A partir de los datos obtenidos en el ensayo se pueden obtener los coeficientes de conductividad térmica, en la Tabla 66 se representan estos resultados.

TIPO DE PARED	Densidad (g/cm ³)	λ (W/m*k)	Δ coeficiente de conductividad (%)
P07REF	1,1	0,40	0
P07CT20	1,04	0,25	-37,5
P07CA10	1,01	0,328	-18
P07CE15	1,11	0,27	-32,5

Tabla 66. Resultados coeficiente conductividad térmica en compuestos finales.

Gráfica 79. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.

Según la norma EN-12664 la conductividad térmica en función de la densidad del material seco aplicado en interiores es la siguiente:

- Para densidades de 600 kg/m³ corresponden $\lambda=0,18$ W/mK.
- Para densidades de 800 kg/m³ corresponden $\lambda=0,26$ W/mK.

Algunos datos de conductividades térmicas de otros investigadores son los de la Tabla 67.

TIPO DE PARED	λ
Enlucido de yeso con perlita	0.1800
Enlucido de yeso	0.3000
Hormigón con áridos ligeros	0.3300
Y	0.3057
Y0,5PA	0.2624
Y1PA	0.2419
Y2PA	0.1902
Y3PA	0.1418
Y4PA	0.1397
Y0,5PG	0.2931
Y1PG	0.2626
Y2PG	0.1828
Y3PG	0.1105
Y4PG	0.1014
Y0,5PW	0.3160
Y1PW	0.2701

TIPO DE PARED	λ
Y2PW	0.1861
Y3PW	0.1285
Y4PW	0.1039

Tabla 67. Resultados coeficiente conductividad térmica (Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012).

Las conductividades térmicas obtenidas en los materiales propuestos mejoran con respecto a la escayola de referencia. El compuesto que reduce el coeficiente de conductividad térmica en un mayor porcentaje es el que incorpora CE y CT con una reducción de λ del 33% y de 38% con respecto a la escayola sin adiciones. Los compuestos con adiciones de CA reducen la conductividad térmica en un 18%.

Los valores tabulados de conductividad térmica por la norma UNE 102011:2013 son los que aparecen en la Tabla 68.

Densidad (kg/m ³)	λ (W/m*k) a 23° y 50% de humedad relativa
600	0,18
700	0,22
800	0,26
900	0,30
1000	0,34
1100	0,39
1200	0,43
1300	0,47
1400	0,51
1500	0,56

Tabla 68. Valores tabulados de conductividad térmica para yesos y escayolas de construcción (UNE 102011:2013).

6.3.3. Consideraciones sobre los compuestos

En este capítulo se han realizado compuestos de escayolas con distintas cantidades de agua de amasado e incorporaciones progresivas de residuos CA, CT y CE para poder comprobar la viabilidad de obtener con cada uno de los residuos un compuesto que cumpla con las especificaciones requeridas por la norma UNE-EN 13279.

Se ha observado que las distintas variaciones de comportamiento que tiene la escayola en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas son debidas a la incorporación de dichos residuos.

Además, se comprueba que las consistencias de los compuestos se ven afectadas por el aumento de los residuos y por las características de estos. En el caso de las incorporaciones de CA hay cierta variabilidad en los resultados, esto es debido a que es un residuo orgánico y que además tiene un % de humedad que influye claramente en la consistencia de los compuestos, además, el volumen que ocupa la CA es muy grande y unido a la dureza del residuo, cuando se incorporan % elevados de éste la consistencia de los compuestos es muy seca. Sin embargo con incorporaciones de CT las consistencias son más fluidas al estar el residuo triturado hace que se maneje con más facilidad, ya que se aumenta la superficie de contacto con el agua y se genera menor fricción entre partículas. El residuo CE es el que menos % de humedad tiene, es por esto que hace que los compuestos sean los que menor trabajabilidad tienen cuando los % de residuo son elevados.

En general, no se obtienen grandes diferencias en las densidades de los compuestos con los distintos residuos pero los compuestos más ligeros son los que incorporan CA.

Las disminuciones de resistencias a flexotracción en compuestos que incorporan CT y CA son, confirmado con el SEM, debidas a que se generan menos cristales de hidratación en la interfase del residuo y la matriz de escayola.

En la rotura a flexotracción de los compuestos que incorporan CA se observa que los dos lados de la probeta ensayada quedan completamente cosidos y al separar las dos partes de la probeta hay fibras que quedan totalmente descubiertas, es decir que no se produce la rotura por agotamiento de la fibra a tracción.

Sin embargo el residuo CE incrementa sus resistencias a flexotracción con la incorporación progresiva de residuo. Sin embargo la adición de residuo está limitado ya que la CE absorbe agua de amasado y la resistencia empieza a reducirse. Es por ello que, en futuras investigaciones se trate de obtener un rango de trabajo para estos compuestos y se incorporen aditivos que permitan incorporar más cantidad de residuo.

Se observa cierta dispersión de los resultados de resistencias a flexotracción en las incorporaciones de CT y CE que pueden ser debidas al reparto heterogéneo de las partículas de residuo que en algunos casos llegan a formar pegotes y si la línea de fractura pasa por ellos los resultados de las resistencias son inferiores.

La resistencia a compresión se reduce con incorporaciones de CA y CT, además en los compuestos con alto porcentaje de CA y CT se observa que en la rotura a compresión las probetas al tocarlas se desmoronan. Este efecto es mucho mayor en las relaciones A/E que contienen más agua.

Los compuestos que incorporan CE y CA obtienen en general mejoras en la dureza superficial, esto puede ser debido a que las compacidades de los compuestos son mayores.

Tanto en adherencia como térmicamente la serie 0,7 es la que mejor resultados ha obtenido, además la absorción de agua por capilaridad de los compuestos de la serie 0,7 no es mayor que la de las otras series.

A la vista de los resultados se caracterizan tres compuestos, uno de cada residuo, que cumplen los requisitos de la normativa.

6.4. COMPUESTOS SELECCIONADOS: APLICACIONES

En este apartado se pretende analizar las posibles aplicaciones de los compuestos seleccionados, como son falsos techos y revestimientos. Para ello se realizan los ensayos físicos y mecánicos correspondientes para estudiar el comportamiento de dichos compuestos en base a estas aplicaciones.

De la fase experimental (FASE 2) se tienen los datos de la Tabla 69.

DENOMINACIÓN	PESO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	DUREZA	R. FLEXIÓN (MPa.)	R.COMPRESIÓN (MPa.)	Ø DE ESCURRIMIENTO (mm)
07 REF	281,233	1,099	84	5,159	13,128	-
07 CA 10	258,56	1,01	88	3,543	7,888	165
07 CT 20	263,68	1,03	86	4,257	7,137	166
07 CE 15	284,16	1,11	91	5,688	14,095	164,5

Tabla 69. Resultados medios de las series realizadas con relación A/E 0,7.

Como se puede observar en la Tabla 69 las máximas incorporaciones de residuo que cumplen las especificaciones de la normativa para yesos son los compuestos con A/E=0,7 y residuo de CA en un 10%, residuo de CT en un 20% y residuo de CE en un 15%.

La Gráfica 80 muestra las diferencias con respecto a la referencia A/E=0,7, obtenidas en cada uno de los ensayos realizados en la fase 3 de los compuestos 07CA10, 07CT20 y 07CE15.

Gráfica 80. Series 0,7 realizadas con CA, CT, CE.

De estos compuestos seleccionados como compuestos finales de cada residuo (07CA10, 07CT20 y 07CE15) se realiza a continuación un estudio comparativo para definir de cada uno de ellos las aplicaciones finales en función de sus propiedades.

6.4.1. Caracterización de los compuestos en estado fresco

6.4.1.1. Consistencia de las pastas

Los tres compuestos seleccionados cumplen las exigencias de la normativa en cuanto al ensayo de consistencia por el método de la mesa de sacudidas. Los datos obtenidos se encuentran en la Tabla 69.

6.4.1.2. Principio de fraguado

Se realiza el método de la aguja de Vicat para obtener el tiempo del principio de fraguado de los compuestos.

En la Tabla 70 aparecen los datos del ensayo para en el compuesto 07CA10. Como se puede observar en los resultados el principio de fraguado de la referencia se produce a los nueve minutos y quince segundos y con incorporaciones del 10% de CA se produce a los ocho minutos y medio. Este compuesto inicia el fraguado un 9% antes con respecto a la serie de referencia, esto puede deberse a que en este compuesto que incorpora CA si la aguja al intentar penetrar en la pasta cae en cáscara, no podrá descender debido a la dureza de este residuo como hemos comentado con anterioridad.

SERIE	Tiempo (minutos)
REFERENCIA	9,15
07CA10	8,30
07CT20	11,45
07CE15	9,45

Tabla 70. Resultados del método de Vicat.

Gráfica 81. Series 0,7 realizadas con CA, CT, CE y REF.

Para el compuesto 07CT20 el tiempo de inicio de fraguado es de once minutos y cuarenta y cinco segundos. Por tanto, la incorporación de CT en las pastas de escayola retrasa el principio de fraguado en un 25% con respecto a la serie de referencia, esto puede deberse a que la CT absorbe agua de amasado que luego va cediendo durante el proceso de fraguado.

Al aumentar el tiempo de inicio de fraguado podrían modificarse las propiedades reológicas del material, de tal forma que, mejoran los tiempos de aplicación del yeso y se disminuyen las retracciones plásticas (Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012; Oteiza, 1993).

Por tanto el residuo de CT se puede utilizar como regulador de fraguado en pastas de escayola.

De los datos del ensayo para el compuesto 07CE15 se deduce que con incorporación de CE se retrasa el principio de fraguado en un 3% con respecto a la serie de referencia. El inicio de fraguado es muy similar al de la serie de referencia, aunque este residuo absorbe agua de amasado.

6.4.2. Caracterización de los compuestos en estado endurecido

6.4.2.1. Caracterización estructural

Se hace un estudio de la macroestructura interna de los compuestos mediante el microscopio electrónico de barrido. A continuación se analizan una serie de imágenes SEM de los distintos residuos CA, CT y CE en secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) que nos aportan información morfológica en el primer caso y composicional en el caso de BSE de los compuestos 07CA10, 07CT20, 07CE15 y de la serie de referencia para poder hacer un análisis comparativo.

a) Escayola de referencia

En la Figura 38 se aprecian perfectamente los cristales de hidratación del yeso.

Figura 38. Imagen SEM en SE a 1000x de la escayola de referencia.

La composición química de la escayola es 27,54% de CO_2 , 42,62% de SO_3 y 29,85% de CaO .

b) Compuesto escayola-CA

En la Figura 39 podemos observar el compuesto formado por escayola-CA.

Figura 39. Imagen SEM en BSE a 250x del compuestos 07CA10.

Se aprecia la adherencia entre el residuo CA y los cristales de yeso, sin embargo el residuo es de un tamaño muy superior a los cristales de yeso y en algunas zonas se observa como la cáscara se despega de la escayola dejando su forma en la matriz (Figura 40). También se aprecian cristales de celestina en blanco y algún poro de $\varnothing$ superiores en la matriz como son los indicados en la Figura 40 como Poro1 de $\varnothing=0,35\text{mm}$ y Poro 2 de $\varnothing=0,15\text{mm}$.

Figura 40. Imagen SEM en SE a 50x del compuestos 07CA10.

Si observamos la muestra más aumentada (Figura 41) se puede apreciar las zonas en las que la adherencia entre la matriz y la CA es menor, ya que los cristales de yeso van formando un molde con la superficie rugosa de la cáscara pero no existe unión íntima entre los dos elementos. La distancia entre la matriz y la CA es en algunos casos de $9,3\mu\text{m}$.

Figura 41. Imagen SEM en SE a 1000x del compuestos 07CA10.

c) Compuesto escayola-CT

En la Figura 42 se puede observar una imagen del compuesto 07CT20 de 20x, en la que se aprecian los trozos fracturados de la cáscara de arroz y sus distintas composiciones dependiendo de la zona de la cáscara fracturada.

Figura 42. Imagen SEM en SE a 20x del compuestos 07CT20.

No se observa buena adherencia entre el residuo y la matriz ya que los trozos que sobresalen de la matriz de escayola en la rotura no están partidos, este efecto se produciría si existiera una buena adherencia entre residuo y matriz. Aunque también se ha comentado anteriormente con el residuo CA que puede que la rotura no se produzca no por la falta de adherencia sino porque la dureza del residuo es superior a la de la escayola.

Figura 43. Imagen SEM en BSE a 250x del compuestos 07CT20.

Al analizar una zona de la matriz en el compuesto se obtiene que la composición química puntual es del 53,43% de SO_3 y del 46,57% de CaO , composición que varía con respecto a la escayola de referencia, ya que no presenta CO_2 y aumentan las cantidades de SO_3 y CaO .

Se observan poros de tamaño $70\ \mu\text{m}$ e inferiores. También se aprecia que hay más adherencia entre la parte inorgánica de la cáscara (silicio) en la Figura 43 que en la parte orgánica (carbono) en la Figura 44.

Figura 44. Imagen SEM en BSE a 1000x del compuestos 07CT20.

d) Compuesto escayola-CE

En la Figura 45 se presenta una imagen SEM del compuesto escayola con CE. En ella se puede apreciar la buena adherencia entre el residuo y la matriz de escayola. Esta característica se manifiesta en las resistencias mecánicas obtenidas con el compuesto escayola-CE en todas las probetas ensayadas. El compuesto tiene poros de tamaño 0,2mm e inferiores.

Figura 45. Imagen SEM en SE a 50x del compuestos 07CE15.

Al analizar una zona de la matriz en el compuesto se obtiene que la composición química puntual es del 54,89% de SO_3 y del 45,11% de CaO , composición que varía con respecto a la escayola de referencia, ya que no presenta CO_2 y aumentan las cantidades de SO_3 y CaO .

Figura 46. Imagen SEM en SE a 500x del compuestos 07CE15.

Figura 47. Imagen SEM en SE a 1000x del compuestos 07CE15.

En las Figura 46 se observa la clara unión entre el residuo CE y la matriz de escayola, se pueden ver los cristales de yeso introduciéndose a través de las irregularidades que conforman la superficie de la CE (Figura 47).

6.4.3. Caracterización física

6.4.3.1. Porosidad

La porosidad de un material es una de las características más importantes de los materiales de construcción, ya que está relacionada con su capacidad de absorber agua y su comportamiento frente al deterioro.

La **porosidad** de un material es el volumen de espacios abiertos que contiene relativo a su volumen total. Los **poros** son pequeños espacios abiertos existentes en los materiales rellenos por soluciones acuosas y/o gaseosas (aire). Los poros pueden estar abiertos (i.e.,

intercomunicados) o cerrados, y ser grandes o pequeños. El tamaño de poro medio y el grado de intercomunicación entre los poros determinan el tipo y grado de movimiento de soluciones líquidas y gaseosas por el interior de los materiales. Esto controla en gran parte su durabilidad. Los poros pueden clasificarse en función de su tamaño en:

- Megaporos: _____ 256-0.062 mm
- Macrocapilares: _____ 0.062-0.0001 mm
- Microcapilares: _____ <0.0001 mm

Otra medida de la porosidad se puede obtener mediante pesada hidrostática, que define la **porosidad abierta** o accesible al agua. El material se sumerge en agua (u otro líquido de densidad conocida) hasta su saturación, calculándose la porosidad a partir de la masa del material seco, saturado y saturado por pesada hidrostática. Esta porosidad se calcula según las especificaciones de metodología descrita en el apartado 5.3.2.15.

En la Gráfica 82 se presentan los valores obtenidos en la porosidad abierta de los compuestos y de la serie de referencia. Como se puede observar todos los compuestos tienen porosidades inferiores a la serie de referencia. El compuesto con menos porosidad abierta es el que incorpora residuo CT, dato que confirma su menor absorción de agua por capilaridad, como se verá más adelante.

Gráfica 82. Porosidad en series realizadas con CA, CT, CE.

En cuanto a los resultados de densidades Tabla 71 en los compuestos realizados se puede concluir que no hay mucha variación entre los tres, pero la densidad aparente disminuye un 7% con respecto al valor de referencia con CA y CT y aumenta con CE.

DENOMINACIÓN	DENSIDAD (g/cm³)
07 REF	1,10
07 CA 10	1,01
07 CT 20	1,03
07 CE 15	1,11

Tabla 71. Valores densidad aparente de los compuestos y la serie de referencia.

La relación entre la porosidad y la densidad aparente en un compuesto es una relación inversa, es decir, cuando la cantidad de poros es menor, el compuesto tiene mayor densidad. Como se puede observar en la Gráfica 83, esta relación inversa entre densidad aparente y porosidad no se cumple. Esto se debe a que la densidad real de los residuos CE (3,65 g/cm³) y CA (2,13 g/cm³) que estamos incorporando, tienen un valor superior a la densidad real de la escayola (1,96 g/cm³) y por lo tanto, aumentamos su densidad con respecto a la serie de referencia. Sin embargo con el compuesto que incorpora CT, (1,85 g/cm³) esto no ocurre, ya que la densidad real de este residuo es menor que la de la escayola.

Gráfica 83. Relación porosidad-densidad aparente de los compuestos y la serie de referencia.

6.4.3.2. Comportamiento ante el agua

La durabilidad de las fibras vegetales ha sido objeto de diversas investigaciones, en especial cuando se introducen en matrices de cemento. En cambio y según Oteiza el estudio de la durabilidad de las fibras en matrices de yeso o de escayola no se conocen trabajos, debido probablemente a la limitación del uso de la escayola para espacios interiores y protegidos del medio ambiente y a su función no estructural en la construcción (Oteiza, 1993).

En este apartado se analiza la capacidad de retención de agua considerando que el mejor comportamiento del compuesto ante el agua redundará en su mayor durabilidad. Para ello se realizan los siguientes ensayos mencionados en la metodología experimental:

- Cámara húmeda
- Ciclo agua-estufa
- Capilaridad
- Heladicidad

a) Capacidad de retención de agua

A continuación en la Tabla 72 se presentan las densidades aparentes de los compuestos en estado húmedo y la densidad seca a los 7 días, además de los resultados obtenidos sobre la capacidad de retención de agua de los diferentes compuestos y la referencia.

Denominación	A/E	Peso húmedo (g)	Densidad (g/cm³)	Peso desecado (g)	Densidad (g/cm³)	Retención de agua (%)	Δ retención de agua (%)
07 REF	0,7	407,970	1,594	281,233	1,099	45,00	0
07CA10	0,7	372,33	1,454	258,56	1,01	43,96	-2
07CT20	0,7	366,51	1,432	263,68	1,03	39,00	-13
07CE15	0,7	397,82	1,554	284,16	1,110	40,00	-11

Tabla 72. Valores densidad aparente húmeda y seca de los compuestos y la serie de referencia.

Como se observa en la Tabla 72 entre los tres compuestos seleccionados el que incorpora el 20% de CT es el que menos capacidad de retención de agua tiene, un 13% menos que la serie de referencia. El compuesto con un 15 % de CE y 10% de CA disminuyen con respecto a la escayola sin aditivar un 11% y 2% respectivamente.

b) Comportamiento ante la humedad

La humedad continua, rebaja la resistencia debido a cambios cristalinos y estructurales; aparece una recristalización como consecuencia de sus cambios estructurales (del Rio Merino, 1999).

Se comprueba con este ensayo el "Efecto Marín" que es la capacidad que tiene el yeso de recuperar su dureza superficial y resistencias mecánicas, después de la acción eventual del agua y una vez seco el material (Blanco Álvarez 2009).

Después de realizar las probetas según normativa se introducen en cámara húmeda junto con las probetas de referencia y se anotan los pesos de las mismas cada día. De esta forma se pretende comprobar si el compuesto con los residuos tiene mayor capacidad de absorción a la humedad que la escayola sin aditivar.

Los resultados obtenidos son los de la Tabla 73 donde se muestra el incremento de peso de los compuestos y de la probeta de referencia.

DENOMINACIÓN	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Δ PESO (g)
07REF	278,3	279,4	279,6	279,6	279,7	279,7	+1,4
07CA10	263,2	266,1	267,0	267,5	267,8	267,8	+4,6
07CT20	275,9	280,0	281,6	283,1	284,1	284,1	+8,2
07CE15	292,2	294,6	295,1	295,4	295,6	295,6	+3,4

Tabla 73. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

Como se puede observar (Tabla 73), los incrementos de peso son mayores en las probetas que incorporan residuos de arroz, siendo la CT la adición que obtiene el mayor incremento de peso.

Posteriormente se obtiene la pérdida de peso, la dureza superficial y se ensayan a flexotracción y compresión obteniendo los resultados de la Tabla 74

	DENOMINACIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)	DUREZA Shore C	R.FLEXOTRACCIÓN (MPa)	R.COMPRESIÓN (MPa)
PROBETAS DE REFERENCIA	07REF	1,09	86	5,618	13,17
	07CA10	1,04	87	3,644	6,84
	07CT20	1,08	85	3,492	5,84
	07CE15	1,14	93	5,616	14,49
PROBETAS ENSAYO HUMEDAD	07REF	1,09	86	5,617	13,81
	07CA10	1,03	89	3,156	6,73
	07CT20	1,08	86	3,476	6,20
	07CE15	1,14	92	4,442	14,85

Tabla 74. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

Como se puede observar en la Tabla 74 las probetas que se han sometido al ensayo de humedad mantienen densidades similares antes y después del ensayo. En cuanto a las durezas superficiales se mantienen e incluso aumentan en algunos casos. Las resistencias mecánicas son similares en cuanto a flexotracción y compresión, confirmando la teoría del efecto Marín.

c) Ciclo agua-estufa

Los datos obtenidos con un ciclo agua-estufa son los de la Tabla 75

MEDIDAS OBTENIDAS	07REF	07CA10	07CT20	07CE15
Peso seco (g)	276	260,2	265,03	290,03
Un ciclo agua-estufa (g)	243,1	237	247,8	266,2
R. Flexotracción (MPa)	1,293	1,918	4,49	3,398
R. Compresión (MPa)	2,29	3,01	2,3	6,47

Tabla 75. Resultados un ciclo agua-estufa de las series realizadas con relación A/E 0,7

Los datos obtenidos con dos ciclos agua-estufa son los de la Tabla 76

MEDIDAS OBTENIDAS	07REF	07CA10	07CT20	07CE15
Peso seco (g)	276	260,2	265,03	290,03
Dos ciclos agua-estufa (g)	257,2	261,25	264,85	288,2
R. Flexotracción (MPa)	3,482	2,203	2,891	4,468
R. Compresión (MPa)	7,59	4,697	5,44	12,94

Tabla 76. Resultados dos ciclos de agua-estufa de las series realizadas con relación A/E 0,7

Las probetas de referencia 07REF después de dos ciclos obtienen un incremento de peso de 0,35g/cm³, es decir, ganan un poco de peso con respecto a un sólo ciclo. El peso obtenido después de todo el ciclo disminuye 2 g con respecto al peso inicial del ensayo. En cuanto a las resistencias que se obtienen son más elevadas que las obtenidas en un solo ciclo.

El compuesto 07CA10 después de dos ciclos obtienen un incremento de peso de 0,41g/cm³, es decir, ganan un poco de peso con respecto a un sólo ciclo. El peso obtenido después de todo el ciclo aumenta 1g con respecto al peso inicial del ensayo. En cuanto a las resistencias que se obtienen son más elevadas que las obtenidas en un solo ciclo.

El compuesto 07CT20 después de dos ciclos obtienen un incremento de peso de 0,26 g/cm³, es decir, ganan un poco de peso con respecto a un sólo ciclo. El peso obtenido después de todo el ciclo disminuye 1g con respecto al peso inicial del ensayo. En cuanto a las resistencias a compresión son más elevadas que las obtenidas en un solo ciclo pero las de flexotracción son más bajas.

El compuesto 07CE15 después de dos ciclos obtienen un incremento de peso de 0,41g/cm³, es decir, ganan un poco de peso con respecto a un sólo ciclo. El peso obtenido después de todo el ciclo disminuye 1g con respecto al peso inicial del ensayo. En cuanto a las resistencias que se obtienen son más elevadas que las obtenidas en un solo ciclo.

d) Absorción de agua por capilaridad

El principal inconveniente de las fibras naturales es que son altamente hidrófilas, es decir, la presencia de grupos hidroxilos y grupos con oxígeno presentes en su formulación atraen a las moléculas de agua estableciéndose puentes de hidrógeno, por tanto el estudio de la absorción de agua en los composites, la evaluación de los mecanismos de absorción y de los niveles de saturación máxima son factores fundamentales a tener en cuenta para el diseño de los composites y la determinación del ciclo de vida con fibras naturales . (Moriarty 2010)(M.S. Sreekala, S. Thomas / Composites Science and Technology 63 (2003) 861–869)

En este ensayo se toma medida de la altura que asciende el agua (cm) cada minuto hasta 10 minutos y se prolonga el ensayo hasta los 60 y 90 minutos.

Las medidas se realizan sobre la referencia 07REF y los compuestos elegidos de cada uno de los residuos, que son 07CA10, 07CT20 y 07CE15.

La Gráfica 84 muestra los valores obtenidos en el ensayo de absorción de agua por capilaridad. Las probetas de referencia son las que tienen más absorción por capilaridad, el resto de los compuestos diseñados en esta tesis obtienen reducciones de absorción. El compuesto que menos absorción muestra es el que incorpora CT, seguido de CE y CA. Sin embargo, a partir de los primeros 35 minutos y hasta los 90 minutos que dura el ensayo el compuesto que incorpora CA absorbe menos agua que CE. Es decir, el compuesto que incorpora CA absorbe agua más rápidamente al principio.

A pesar de la estructura de material compuesto que tienen las muestras con respecto a la estructura de material homogéneo de la escayola, los nuevos materiales tienen menos tendencia a absorber agua. Los compuestos analizados absorben menos cantidad de agua que la escayola sin aditivar, por tanto se confirma la ausencia de estructuras porosas. Por lo

tanto al disminuir la absorción de agua por capilaridad en los tres compuestos los tiempos de trabajabilidad son más cortos.

Gráfica 84. Series realizadas con CA, CT, CE.

e) Heladicidad

Los resultados de la Tabla 77 son los pesos obtenidos cada día después de cada ciclo de hielo-deshielo. En primer lugar aparece el peso inicial de las probetas antes de iniciar los ciclos. Se realizan 5 ciclos en total.

DENOMINACIÓN	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Δ PESO (g)
07REF	278,3	377,8	381,1	380,9	383,1	383,5	+105,2
07CA10	269,0	369,5	373,1	372,4	374,1	374,0	+105
07CT20	275,3	368,2	370,5	368,8	369,1	369,4	+94,1
07CE15	292,2	381,9	385,2	388,5	387,5	387,4	+95,2

Tabla 77. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

Como se puede observar en la Tabla 77 las probetas que obtienen menor incremento de peso después de 5 ciclos de hielo-deshielo son las que incorporan CT y CE.

Al término de los ciclos las probetas presentan aristas redondeadas, además las que incorporan CE adquieren una tonalidad más oscura y las que incorporan CA y CT presentan algunas partículas con un tono oscuro que podría ser un comienzo de creación de moho.

Foto 63. Probetas después del ciclo de hielo.

Una vez que las probetas han perdido el agua adquirida durante el ensayo, se obtiene su dureza superficial y se realizan ensayos de flexotracción y compresión. Los datos se presentan en la Tabla 78 además de los resultados de las referencias de cada compuesto que no han sido sometidas al ensayo de heladicidad.

	DENOMINACIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)	DUREZA Shore C	R.FLEXOTRACCIÓN N (MPa)	R.COMPRESIÓN (MPa)
Probetas de referencia	07REF	1,09	86	5,618	13,17
	07CA10	1,04	87	3,644	6,84
	07CT20	1,08	85	3,492	5,84
	07CE15	1,14	93	5,616	14,49
Probetas ensayo heladicidad	07REF	1,08	86	6,044	13,27
	07CA10	1,04	87	2,835	6,24
	07CT20	1,07	84	3,334	5,64
	07CE15	1,14	92	5,378	14,95

Tabla 78. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

Como se aprecia en la Tabla 78 los compuestos ensayados a heladicidad obtienen densidades similares a las de referencia. Las durezas superficiales Shore C también se mantienen y las resistencias mecánicas son similares.

f) Consideraciones del comportamiento al agua

Una vez realizados los distintos ensayos, se observa que las probetas con los residuos de arroz se comportan de forma diferente dependiendo del tipo de exposición al agua. Si se trata de absorción por capilaridad la escayola de referencia es la que más absorbe seguida de los compuestos que incorporan CE, CA y CT. En cuanto a humedad ambiente el comportamiento del compuesto CT es el que incrementa más su peso, seguido de CA, CE y REF. Esto es posiblemente por ser mayor el volumen de poros abierto que el de poros inaccesibles.

Por otro lado, las probetas que incrementan más su peso cuando se realizan los ciclos hielo-deshielo son REF y CA seguidas de CT y CE. Esto se debe a que las probetas REF y CA, como se ha visto con anterioridad tienen más volumen de poros abiertos o accesibles que las probetas que incorporan CT y CE.

En el ensayo de heladicidad los compuestos que menos incremento de peso obtienen son CE y CT. Las probetas de CE tienen un tono más oscuro al finalizar el ensayo.

6.4.4. Comportamiento mecánico

6.4.4.1. Dureza superficial Shore C

En cuanto a la dureza Shore C (Tabla 79) los valores obtenidos por estos compuestos no varían con respecto a la serie sin adición de residuo. Se aprecia que el residuo CE obtiene mayores durezas (3%) que los otros dos residuos que tienen valores que también superan a la referencia.

DENOMINACIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)	DUREZA Shore C
07 REF	1,099	84
07 CA 10	1,01	88
07 CT 20	1,03	86
07 CE 15	1,11	91

Tabla 79. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

6.4.4.2. Ensayos mecánicos

Los resultados de resistencia a flexotracción de los tres compuestos estudiados en este apartado se muestran en la Tabla 80. Se observa que el compuesto con adición de CE es el que mayores resistencias obtiene y del mismo valor que la serie de referencia. La adición de un 20% de CT obtiene resistencias que superan a la muestra que incorpora un 10% de CA en 1Mpa.

DENOMINACIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)	RESISTENCIA FLEXIÓN (MPa.)	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa.)
07 REF	1,099	5,159	13,128
07 CA 10	1,01	3,543	7,888
07 CT 20	1,03	4,257	7,137
07 CE 15	1,11	5,688	14,095

Tabla 80. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.

En los resultados de resistencia a compresión que se muestran en la Tabla 80 se puede observar que la resistencia a compresión con adiciones de CE aumenta en 10 Mpa con respecto a los compuestos realizados con los otros residuos y es un 7% superior a la serie de referencia.

6.4.4.3. Adherencia superficial

Como se ha observado en el apartado 6.6.1 la adherencia de las mezclas seleccionadas tienen buen comportamiento con respecto a la referencia (Tabla 81).

DENOMINACIÓN	TIPO DE ROTURA	Fu (N)	Ru (N/mm ²)	Δ adherencia (%)
07REF	TIPO A	745	0,38	0
07CA10	TIPO B	630	0,32	-15,79%
07CT20	TIPO B	905	0,46	+21,05%
07CE15	TIPO A	980	0,50	+31,58%

Tabla 81. Resultados adherencia superficial sobre soporte cerámico A/E 0,7.

En este apartado se ensayan los mismos compuestos sobre soporte de hormigón para comparar su comportamiento con respecto al soporte cerámico. Los resultados se presentan en la

DENOMINACIÓN	TIPO DE ROTURA	Fu (N)	Ru (N/mm ²)	Δ adherencia (%)
07REF	TIPO A	1425	0,73	0
07CA10	TIPO B	830	0,42	-42,47%
07CT20	TIPO B	1008	0,51	-30,14%
07CE15	TIPO B	2444	1,24	+69,86%

Tabla 82. Resultados adherencia superficial sobre bloque de hormigón A/E 0,7.

Todas las roturas se producen por cohesión o rotura tipo B, es decir, en la masa de yeso, por tanto los valores de resistencia de adherencia son superiores a los indicados por el dispositivo.

La resistencia a la adherencia sobre soporte de bloques de hormigón es menor que sobre soporte cerámico, excepto en el compuesto 07CE15 que obtiene un incremento de resistencia a adherencia de casi un 70%. Esto se debe a que la superficie porosa del bloque de hormigón hace que esta mezcla se adhiera mejor.

6.4.4.4. Módulo de Young

Una de las desventajas de la escayola es que es un material frágil, es decir cuando se aplica una carga que induce a la rotura, ésta se produce de forma brusca.

Al incorporar fibras a la escayola es posible obtener un material con mejoras en cuanto a resistencias a tracción y a su fragilidad, un material que permite una mayor deformación antes de la rotura, es decir aumentando la tenacidad de la escayola sin adiciones (Oteiza 1992).

Por tanto si se reduce el módulo de elasticidad de la escayola, se puede disminuir la probabilidad de agrietarse y su rotura frágil.

El valor del módulo de Young es característico para distintos materiales, por lo que puede utilizarse para comparar las características mecánicas de los mismos.

a) Módulo de Young estático

Los datos obtenidos en el ensayo son los de la Tabla 83.

DENOMINACIÓN	E compresión (MPa)	Δ módulo de Young (%)
07REF	7711	0
07CA10	6242	-19%
07CT20	4960	-36%
07CE15	10462	+36%

Tabla 83. Resultados de ensayos módulo de elasticidad estático.

Como se puede observar el módulo de Young aumenta con respecto a la referencia en el compuesto que adiciona cenizas, es decir conseguimos que el material aumente su rigidez (36%). Sin embargo en los compuestos que adicionan CA y CT el módulo de Young disminuye con respecto a la referencia, esto implica que el material es más elástico que la escayola de referencia, esta elasticidad es mayor en el compuesto 07CT20 con un 36% y de un 19% en el compuesto 07CA10.

b) Módulo de elasticidad dinámico (ultrasonidos)

En los valores obtenidos de los compuestos se observa al igual que el módulo de elasticidad dinámico que los compuestos que consiguen más elasticidad son los que incorporan CA (22%) y CT (35%). Siendo el de mayor elasticidad el compuesto 07CT20. También se obtienen valores superiores en el compuesto que incorpora CE al igual que en el módulo de elasticidad estático, pero este incremento es menor ya que es menos elástico en un 17% con respecto a la referencia.

DENOMINACIÓN	MOE ultrasonidos (MPa)	Δ módulo de Young (%)
07REF	6606	0
07CA10	5154	-22
07CT20	4302	-35
07CE15	7748	+17

Tabla 84. Resultados de ensayos módulo de elasticidad dinámico.

Gráfica 85. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.

Flores Medina et al. 2016 define la relación entre el MOE, la resistencia a compresión y la densidad. Cuanto mayor es el módulo de Young mayor es la resistencia de compresión y la densidad. Como se puede observar en la Gráfica 85 excepto el compuesto que incorpora la CA el resto de los compuestos y la referencia cumplen la relación definida por Flores Medina et al. 2016, es decir a medida que aumenta la densidad del compuesto lo hace el MOE. Además el coeficiente R^2 es de 0,81. En la Gráfica 86 se representa la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, en ella se observa la relación lineal

directa entre ambas variables, es decir, a mayor MOE mayor resistencia a compresión, en este caso el coeficiente R^2 es de 0,88, algo superior al de las densidades.

Gráfica 86. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.

6.4.4.5. Comportamiento ante el impacto de un cuerpo duro

Se realizan revestimientos sobre un soporte cerámico realizado con ladrillo de dimensiones 60cmx60cm. Los revestimientos tienen un espesor de 8 mm y se han realizado con escayola sin aditivar, escayola con CE, escayola con CA y escayola con CT, todos con relación A/E=0,7 e incorporaciones de un 10% de CA, un 15% de CE y un 20% de CT (Foto 64).

Una vez que el revestimiento está seco se obtiene la dureza superficial y se someten al siguiente ensayo: se lanza una bola de acero de 45 mm de diámetro y 200 g de peso desde una altura de 345 mm sobre la probeta colocada horizontalmente. Se determina la energía de impacto para producir la huella dejada por la bola.

Foto 64. Revestimiento sobre soporte cerámico

También se realizan ensayos de impacto sobre revestimientos de 8 mm de espesor sobre soporte de bloque de hormigón (Foto 65).

Foto 65. Revestimiento sobre bloque de hormigón.

Se observa que las muestras realizadas sobre bloque de hormigón fraguan y endurecen más rápido que sobre soporte cerámico.

Sobre soporte cerámico se observa que el revestimiento realizado con escayola sin residuo presenta fisura coincidiendo con la junta del soporte realizado (Foto 66). El resto de compuestos no presenta ningún defecto aparente.

Foto 66. Fisura en revestimiento de escayola sobre soporte cerámico.

Se realiza ensayo de dureza Shore C sobre los revestimientos y se obtienen los datos de la Tabla 85

Se realizan ensayos no normalizados de impacto sobre los revestimientos y se obtienen los resultados de diámetro y profundidad de la huella dejada por el impacto de la bola de acero al caer.

Tipo de soporte	Denominación	Dureza Shore C	Diámetro de la huella (mm)	Profundidad de la huella (mm)
Cerámico	07REF	93	8,7	0,40
	07CA10	82	8,6	0,39
	07CT20	88	9	0,43
	07CE15	92	8,3	0,37
Bloque de hormigón	07REF	85	9,5	0,48
	07CA10	80	9	0,43
	07CT20	79	9	0,43
	07CE15	89	9,4	0,47

Tabla 85. Resultados del ensayo de dureza Shore C y de impacto.

Si la bola rebota, como es nuestro caso, la fuerza de impacto es mayor que la de cálculo.

El diámetro de la huella ante un impacto es similar en todos los compuestos, sin embargo con incorporaciones de CA y CT la profundidad de la huella es algo menor. Además por la rugosidad de la superficie la huella del impacto apenas se aprecia (Foto 67).

Al igual que sobre soporte cerámico, las huellas sobre CA y CT tienen menos profundidad y son menos apreciables a simple vista que las huellas de REF y CE cuya superficie es muy lisa (Foto 68).

Foto 67. Huellas de impacto en revestimiento sobre soporte cerámico de REF-CT-CA y CE.

Foto 68. Huellas de impacto en revestimiento sobre bloque de hormigón de REF-CT-CA y CE.

Posteriormente a este ensayo no normalizado, se realizan un enlucido con yeso fino sobre la zona de la probeta sin impacto. Se observa que en cualquiera de los soportes los revestimientos de CA y CT, debido a su rugosidad, el enlucido se ejecuta con una gran facilidad, llegando a obtener una superficie lisa con mayor rapidez que con la REF y CE, debido a su buena adherencia (Foto 70 y Foto 71).

Como se puede observar en la Foto 70, Foto 71 y Foto 72, los revestimientos realizados con escayola y residuos de cáscara de arroz, con dos capas de enlucido posteriores y por último una mano de pintura obtienen terminaciones similares a la escayola sin aditivar. Incluso se comporta mejor a la posible aparición de fisuras.

Foto 69. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de REF.

Foto 70. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CA.

Foto 71. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CT.

Foto 72. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CE.

Sobre los bloques de hormigón el comportamiento es similar.

Foto 73. Revestimiento de escayola en cuatro capas sobre bloque de hormigón.

Foto 74. Revestimiento de escayola-CA en cuatro capas sobre bloque de hormigón.

Foto 75. Revestimiento de escayola-CE en cuatro capas sobre bloque de hormigón.

Foto 76. Revestimiento de escayola-CT en cuatro capas sobre bloque de hormigón.

6.4.5. Conclusiones de los compuestos seleccionados

En este capítulo se han dosificado escayolas con las mismas cantidades de agua de amasado e incorporaciones de residuos CA, CT y CE en 10%, 20% y 15% que cumplen con las especificaciones requeridas por la norma UNE-EN 13279.

Se ha observado en las distintas incorporaciones de residuo que las variaciones que sufre la escayola en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas son debidas a la incorporación de estos residuos.

Las consistencias de todos los compuestos cumplen con las exigencias del ensayo de consistencias de la norma UNE-EN 13279.

En general, no se obtienen grandes diferencias en las densidades de los compuestos con los distintos residuos. Los compuestos más ligeros son los que incorporan CA. Se podrían incorporar aditivos tipo aireantes para conseguir densidades menores, pero el objetivo de este trabajo no es incorporar más materiales sino disminuir la utilización de materia prima yeso por la incorporación de un residuo para su reutilización.

Las disminuciones de resistencias a flexotracción en compuestos que incorporan CT y CA son probablemente debidas a que se generan menos cristales de hidratación en la interfase del residuo y la matriz de escayola, en cualquier caso, en la rotura de los compuestos los dos lados de la probeta ensayada quedan completamente cosidos y al separar las dos partes de la probeta hay fibras que quedan totalmente descubiertas, es decir que no se produce la rotura por agotamiento de la fibra a tracción. Además se obtienen compuesto más elásticos que la serie de referencia.

Sin embargo el residuo CE incrementa sus resistencias a flexotracción, pero su rotura es frágil y más brusca que la producida en la escayola sin adiciones.

Las reducciones de resistencia a compresión con incorporaciones de CA y CT son las mismas, además se observa que en la rotura a compresión las probetas al tocarlas se desmoronan.

La incorporación de residuos CA, CT y CE produce una reducción de porosidad en los compuestos y una menor capacidad de absorción de agua por capilaridad, de modo similar a los aditivos hidrófugos que se incorporan para este fin.

Los tres compuestos obtienen en general mejoras en durezas, esto puede ser debido a que la compacidad de los compuestos es mayor.

Los tres compuestos analizados 07CA10, 07CT20 y 07CE15, cumplen las especificaciones de la norma en cuanto a la mesa de sacudidas y las de mínimas resistencias requeridas para el yeso B1 por la norma UNE-EN 13279-2. Con estas premisas el mejor compuesto de los tres estudiados es el que incorpora CE como sustituto de parte de la escayola, ya que con un aumento del 3% en densidad las características del material obtenido mejoran las propiedades de una escayola sin aditivar.

Los compuestos propuestos se pueden aplicar en los siguientes casos, dependiendo de las características de cada compuesto, en:

- Paneles y placas prefabricadas para particiones interiores.
- Placas prefabricadas para falsos techos interiores, desmontables o continuos.
- Revestimientos horizontales y verticales en interiores.
- Tabiquería en formato bloque.

Se ha comprobado que la incorporación de CA y CT inducen a la eliminación de rotura frágil por flexotracción en todos los compuestos ensayados con estos residuos. Por lo tanto se consideran compuestos adecuados para la fabricación de elementos prefabricados, elementos prefabricados de gran esbeltez o grandes luces, como tabiques y placas de falso techo, ya que no se produce desprendimiento después de la rotura. Sin embargo si los elementos prefabricados exigen características mecánicas elevadas sería necesario aditivar los compuestos para conseguir estas prestaciones.

Los valores de adherencia superficial en compuestos con CT y CE son superiores a la escayola sin aditivar, es por ello que se propone el uso de estas pastas con incorporación de CT y CE en la proyección de revestimientos gruesos (guarnecidos) horizontales y verticales. Además ambos compuestos obtienen tiempos de inicio de fraguado superiores a la escayola sin adiciones, por lo que los hace aptos para este uso.

El compuesto que incorpora CE se pueden utilizar en prefabricados que requieran mejores propiedades mecánicas y durezas que los que se comercializan actualmente (placas AD), sin necesidad de ningún aditivo ni componente especial para ello, por ejemplo en paneles prefabricados para divisiones interiores y cielorrasos modulares prefabricados. Al obtener valores de resistencias mecánicas superiores a los otros compuestos y a la escayola, se proponen placas para falsos techos que disminuyan su espesor y que aumenten sus dimensiones, para reducir el uso de perfilera metálica en su colocación en obra.

Los compuestos propuestos mejoran el comportamiento térmico hasta en un 35%, en el caso de la adición de CE, por tanto los elementos prefabricados con escayola y residuos de CE reúnen las exigencias de ahorro energético en materiales constructivos.

Dado que el compuesto CT da valores de absorción de agua menores se propone su uso en zonas interiores que estén expuestas a humedades, ya que su comportamiento ante la humedad no requiere de aditivos hidrófugos, como es el caso de las placas HR.

Se ha mostrado a lo largo de esta tesis que las propuestas de aplicación de los compuestos obtenidos son una alternativa de reciclaje de los residuos de cáscara de arroz.

6.5. ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Son cada vez más las empresas que concienciadas por la reducción del impacto medioambiental incluyen un departamento de I+D para estudiar la viabilidad de nuevos materiales obtenidos a partir de residuos generados por otros materiales utilizados en la construcción. La empresa Knauff, que con el lema de Cradle to Cradle reutiliza paneles de yeso.

Los beneficiarios de esta investigación son el sector de la construcción, los fabricantes de yesos, escayolas y prefabricados de yeso o escayola y por supuesto el medioambiente.

Compuesto	Materiales	Materiales		Probeta 4x4x16 cm		% Reducción de materia prima
		Peso (g)	% Total	Peso (g)	Volumen (cm³)	
07 REF	Escayola	900	58,82%	234,81	119,80	-
	Agua	630	41,18%	164,39	164,39	
	Residuo	0	0%	0	0	
07 CA 10	Escayola	900	55,56%	211,35	107,83	10%
	Agua	630	38,88%	147,90	147,90	
	Residuo CA	90	5,56%	21,15	9,93	
07 CT 20	Escayola	900	52,63%	189,68	96,78	19,22%
	Agua	630	36,84%	132,77	132,77	
	Residuo CT	180	10,53%	37,95	20,51	
07 CE 15	Escayola	900	54,05%	216,15	110,28	7,95%
	Agua	630	37,84%	151,32	151,32	
	Residuo CE	135	8,11%	32,43	8,88	

Tabla 86. Reducción del consumo de materia prima con respecto a la probeta de referencia.

La Tabla 86 muestra la reducción de escayola de los compuestos finales obtenidos en esta investigación en comparación a la escayola de referencia. Como se puede observar conseguimos reducir el impacto medioambiental con los nuevos materiales propuestos. En el caso de la escayola con cáscara de arroz (CA) en un 10% el ahorro de materia prima es de un 10%. Cuando añadimos ceniza de cáscara de arroz (CE) en un 15% se consigue reducir el consumo de materia prima en un 8%. En el caso del residuo de cáscara de arroz triturada (CT) si se sustituye un 20% de escayola se ahorra un 20% de materia prima.

Por tanto se consigue ahorrar materia prima en la fabricación de prefabricados de escayola y además se eliminan posibles aditivos necesarios como los retardadores de fraguado si se incorporan el residuo en formato CT, ya que este residuo retrasa el inicio de fraguado en las pastas de escayola.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES FINALES

En este capítulo se presentan las conclusiones de acuerdo a los objetivos establecidos.

CONCLUSIONES OB.1 "Caracterizar el residuo procedente de la producción de arroz"

- Una vez analizados los residuos de arroz, queda constancia de que las propiedades no difieren de las encontradas en la bibliografía.

CONCLUSIONES OB.2"Analizar la viabilidad de obtener compuestos de yeso con residuos procedentes de la producción de arroz como alternativa a las cargas que se utilizan actualmente en los materiales de construcción y que han sido motivo de otras investigaciones".

- Las adiciones de residuos CA, CT y CE son una alternativa a los agregados que se incorporan a la escayola. En compuestos con densidades similares se obtienen durezas y resistencias muy competitivas, si los comparamos con aquellos.
- Con adiciones de CA, CT y CE a la escayola no se consiguen compuestos más ligeros, debido a que las densidades de los residuos son similares o superiores a la escayola.
- Los compuestos que admiten más cantidad de residuo son los que incorporan CT.
- Con adiciones de CA y CE se obtienen aumentos de durezas superiores a la referencia con respecto a otro tipo de agregados.
- Cuando se incorpora residuo de arroz las resistencias a flexotracción disminuyen, pero con CE y otras cargas, son similares a la referencia.
- Los compuestos con CE tienen las mejores resistencias a compresión, superando a la referencia y a otras cargas ligeras como la AR.

CONCLUSIONES OB.3 "Caracterizar las mezclas de escayola con residuo de la producción de arroz mediante un estudio experimental".

- En los compuestos que incorporan CA se consiguen materiales más tenaces.
- Las imágenes SEM nos permiten concluir que las disminuciones de resistencias a flexotracción en compuestos con CT y CA, son debidas a que se generan menos cristales de hidratación en la interfase del residuo y la matriz de escayola.
- Los compuestos que incorporan CE y CA obtienen mejoras en la dureza superficial. Esto se debe a que las compacidades de los compuestos son mayores. Como consecuencia, la absorción de agua por capilaridad en estos compuestos es menor.
- El porcentaje de residuo no es un factor influyente en las propiedades analizadas. El tipo de residuo y la cantidad de agua, si son factores influyentes en las propiedades de los compuestos analizados. De hecho, a medida que aumenta la proporción de agua disminuyen las propiedades del compuesto.
- Los compuestos con mejor adherencia, comportamiento térmico y menor absorción de agua por capilaridad, corresponden a la serie 0,7.

CONCLUSIONES OB.4"Proponer y analizar algunas aplicaciones de los compuestos obtenidos".

- Los compuestos con incorporación de residuos de arroz son una alternativa para la fabricación de elementos constructivos prefabricados y revestimientos, debido a que obtienen compuestos con densidades similares. Con adiciones de CA y CE se mejoran las durezas superficiales y en el caso de la CE además, se mejoran las resistencias mecánicas.
- No se han conseguido compuestos más ligeros, ni mejoras en el comportamiento mecánico de los compuestos. A excepción del residuo CE que sí obtiene incrementos de resistencias, en el ensayo a compresión.

- Los compuestos con incorporación de residuos CA, CT y CE tienen menor porosidad y capacidad de absorción de agua por capilaridad. Su comportamiento es similar al de los aditivos hidrófugos que se incorporan para este fin.
- De los compuestos seleccionados, los de CT requieren menos cantidad de agua para una buena consistencia de la pasta. La absorción de agua por capilaridad es menor que los otros compuestos y la serie de referencia.
- El tiempo de inicio de fraguado con CT es superior al de la referencia y por tanto se puede utilizar en aplicaciones "in situ" como guarnecidos. Además, aumenta la adherencia superficial con respecto a la escayola sin adiciones.
- La mejora de la tenacidad con adiciones de CA y CT hace viable su uso en placas para prefabricados.
- La adición de CE obtiene compuestos con mejoras en la dureza superficial, la adherencia superficial y la resistencia a flexión y compresión.

CONCLUSIONES OB.5"Estudiar el impacto medioambiental de los compuestos seleccionados".

- La incorporación de residuos de CA, CT y CE reducen el consumo de materia prima escayola y a su vez disminuye el vertido de residuo, reutilizando éste en la fabricación de un nuevo material de construcción.

CAPITULO 8

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación realizado abre las siguientes líneas para futuros proyectos de investigación relacionados con esta área:

- Se ha realizado en esta tesis, estudios de compuestos que incorporan residuos de arroz y escayola E-35. Sería conveniente estudiar el comportamiento y la compatibilidad de los residuos de arroz con yesos tipo B y tipo C.
- Este estudio se puede completar con el análisis de compuestos con escayola con tratamiento previo de los residuos de CA y CT (limpieza, lavado, etc.).
- Estudio del comportamiento térmico, acústico y frente al fuego de los compuestos objeto de esta Tesis.
- Estudio estadístico más amplio de la muestra.
- Realización de placas para prefabricados como tabiques, trasdosados, falsos techos, y/o bloques como elemento separador de estancias.
- En esta tesis no se ha utilizado ningún aditivo ni plastificante, por tanto una futura línea de investigación sería utilizar aditivos para poder incorporar residuo CE en mayor porcentaje.
- Análisis del ciclo de vida.
- Estudio en profundidad de la conductividad térmica del material.

BIBLIOGRAFIA

La bibliografía se clasifica en tres apartados: La bibliografía referenciada en la Tesis Doctoral, la bibliografía consultada y aquella generada a lo largo del desarrollo del trabajo.

Bibliografía referenciada

- Abbas, S., Kazmi, S. M., & Munir, M. J. (2017). Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. *Construction and Building Materials*, 132, 61-70.
- Abenza Ruiz, B. (2009). Aplicación del yeso en exteriores: análisis de dosificaciones en laboratorio y estudio de campo en la ciudad de Cuenca. Paper presented at the Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción Valencia.
- AENOR. (2009a). RP 35.00, Reglamento particular de la marca AENOR para yesos y escayolas de construcción, sus prefabricados y productos afines. Requisitos comunes. . Madrid.
- AENOR. (2009b). RP 35.02, Reglamento particular para yesos y escayolas de construcción. . In AENOR (Ed.).
- UNE-EN 13279-1, Gypsum binders and gypsum plasters. Part 1: Definitions and requirements. (2009c).
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V., & Cincotto, M. (2005). Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 527-536.
- Águila, I. (2001). Cementos puzolánicos, una alternativa para Venezuela. *Tecnología y Construcción*. IDEC-FAUUCV, Caracas, 27-34.
- Águila, I. (2016). Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 23(4).
- Ahumada, L., & Rodríguez-Páez, J. (2006). Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio. *Revista Acad. Coloma. Cien*, 30(117), 581-594.
- Ajiwe, V., Okeke, C., & Akigwe, F. (2000). A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash. *Bioresource Technology*, 73(1), 37-39.
- Alameda, L., Calderón, V., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2015). Reciclado de placas de yeso laminado aligeradas con residuos de poliuretano= Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, 1(1), 33-39.
- Alcaide, N. (1992). Yeso reforzado con fibra de vidrio y fluidificante. Cátedra de materiales de construcción. ETSAM.
- Ali, M. A., & Grimer, F. J. (1969). Mechanical properties of glass fibre-reinforced gypsum. *Journal of Materials Science*, 4(5), 389-395.
- Almagro, A., & Arce, I. (1996). El alcazar Omeya de Amman, crisol de técnicas constructivas.
- Amigó, V., Salvador, M., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2008). Valorización de residuos de fibras vegetales como refuerzo de plásticos industriales. Paper presented at the I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.

- Antonio Gonzalo. (2011). Bioemergy International. Bioemergy International, 10.
- Aranberri-Askargorta, I., Lampke, T., & Bismarck, A. (2003). Wetting behavior of flax fibers as reinforcement for polypropylene. *Journal of colloid and interface science*, 263(2), 580-589.
- Arcos, C. A., Macías Pinto, D., & Rodríguez Páez, J. E. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(41), 7-20.
- Arikan, M., & Sobolev, K. (2002). The optimization of a gypsum-based composite material. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1725-1728.
- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., & Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy*, 23(3), 171-179.
- Asadi, F., Shariatmadari, H., & Mirghaffari, N. (2008). Modification of rice hull and sawdust sorptive characteristics for remove heavy metals from synthetic solutions and wastewater. *Journal of hazardous materials*, 154(1), 451-458.
- Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. (2017). Producción y Gestión de RCD en España, 2011-2015
- Azulejos Geoglass. (2017). Empresa Azulejos Geoglass, from <http://materialesinnovadoresti.blogspot.es/1447633719/azulejos-geoglas-a-partir-de-vidrio-reciclado/>
- Baoid, D., & Remedios, J. (1989). Yeso reforzado con tejidos y velos de fibra de vidrio E. Cátedra de materiales de construcción. ETSAM.
- Barreto, A. C. H., Rosa, D. S., Fachine, P. B. A., & Mazzetto, S. E. (2011). Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(5), 492-500.
- Basha, E. M. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., & Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19(6), 448-453.
- Basha, E. M. A., Hashim, R., & Muntohar, A. S. (2003). Effect of the cementrice husk ash on the plasticity and compaction of soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8(1), 1-8.
- Başpınar, M. S., & Kahraman, E. (2011). Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3327-3333.
- Behak, L., & Peres Núñez, W. (2008). Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. *Revista ingeniería de construcción*, 23(1), 34-41.
- Berná Serna, J. M. (2013). Evolución de las propiedades mecánicas de los morteros aditivados de yeso con vermiculita.
- Bhattacharya, S., Bal, S., Mukherjee, R., & Bhattacharya, S. (1994). Functional and nutritional properties of tamarind (*Tamarindus indica*) kernel protein. *Food chemistry*, 49(1), 1-9.
- Biney, P. O., Gyamerah, M., Shen, J., & Menezes, B. (2015). Kinetics of the pyrolysis of arundo, sawdust, corn stover and switch grass biomass by thermogravimetric analysis using a multi-stage model. *Bioresource technology*, 179, 113-122.

- Bizzotto, M., Natalini, M., & Gómez, G. (1998). Minihormigones con cascarilla de arroz natural y tratado como adición granular. Paper presented at the Primer Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. Universidad Nacional del Nordeste. Buenos Aires, Argentina.
- Blogdelarroz. (2017). El ciclo del arroz: ¿cómo se elabora nuestro cereal preferido? , from <http://arroz.es/news/origen-ciclo-del-arroz/>
- Borreguero, A. M., Garrido, I., Valverde, J. L., Rodríguez, J. F., & Carmona, M. (2014). Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules. *Energy and Buildings*, 76, 631-639.
- Borreguero, A. M., Sánchez, M. L., Valverde, J. L., Carmona, M., & Rodríguez, J. F. (2011). Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy*, 88(3), 930-937.
- Cadena, C., & Bula, A. (2002). Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. *Ingeniería y desarrollo: revista de la División de Ingeniería de la Universidad del Norte*(12), 1-9.
- Camarini, G., & De Milito, J. A. (2011). Gypsum hemihydrate–cement blends to improve renderings durability. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4121-4125.
- Canchig, J., & del Rocío, S. (2007). Uso del adobe como material de construcción.
- Capdevila, V., Gely, C., Pagano, A., & Kafarov, V. (2015). Simulación del proceso fermentativo para la obtención de bioetanol a partir de residuos de arroz. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(2).
- CEDEX. (2016). Catalogue of construction and demolition waste that can be used in construction (Catálogo de residuos que pueden utilizarse en construcción). Madrid.
- Çolak, A. (2001). Characteristics of acrylic latex-modified and partially epoxy-impregnated gypsum. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1539-1547.
- Çolak, A. (2006). Physical and mechanical properties of polymer-plaster composites. *Materials Letters*, 60(16), 1977-1982.
- Contreras-Velásquez, L., Pereda-Reyes, I., & Romero-Romero, O. (2012). Aprovechamiento energético de residuos arroceros por bioconversión. Caso de estudio cuba. *Revista DYNA Energía y Sostenibilidad*, 1(1), 1-11.
- Cook, D. (1986). Rice husk ash. *Concrete technology and design, cement replacement materials*, 3, 171-195.
- Cortes, K. (1999). Estudio de la descomposición microbiológica de la cascarilla de arroz. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Unillanos.
- Chao, C. Y., Kwong, P. C., Wang, J., Cheung, C., & Kendall, G. (2008). Co-firing coal with rice husk and bamboo and the impact on particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbon emissions. *Bioresource technology*, 99(1), 83-93.
- Charca, G., Guzman, B., & Flora, R. (2007). Estudio para la obtencion de silice amorfa a partir de la cascara de arroz. *Acta Microsc.*, 16, 212-213.
- Chen, S.-Y., Chou, P.-F., Chan, W.-K., & Lin, H.-M. (2017). Preparation and characterization of mesoporous bioactive glass from agricultural waste rice husk for targeted anticancer drug delivery. *Ceramics International*, 43(2), 2239-2245.

- Chen, Z., Hu, M., Zhu, X., Guo, D., Liu, S., Hu, Z. et al. Laghari, M. (2015). Characteristics and kinetic study on pyrolysis of five lignocellulosic biomass via thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 192, 441-450.
- Chindaprasirt, P., Boonserm, K., Chairuangsi, T., Vichit-Vadakan, W., Eaimsin, T., Sato, T., & Pimraksa, K. (2011). Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3193-3203.
- de San Antonio González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2015). Procedimiento para la obtención de un material de construcción a base de yeso.
- de Sensale, G. R. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158-160.
- de Sensale, G. R. (2010). Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 718-725.
- de Villanueva Domínguez, L. (1996). Yaserías españolas: propuesta de tipología histórica. Paper presented at the Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996.
- de Villanueva Domínguez, L. (2004). Evolución histórica de la construcción con yeso. *Informes de la Construcción*, 56(493), 5-11.
- de Villanueva Domínguez, L., & García Santos, A. (2001). Manual del yeso: Cie Inversiones Editoriales Dossat.
- de Villanueva, L. (2009). El yeso: material de construcción primitivo y actual. *Boletín yesocemento*, 2.
- del Aguila Montilla, D. (2001). Efecto del periodo crítico de competencia de malezas en el rendimiento de arroz (*oryza sativa*) variedad capiróna al trasplante en el Bajo Mayo.
- del Río Merino, M. (1999). Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- del Río Merino, M. (2005). Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación. Paper presented at the III Encuentro Eurocork, Huelva.
- del Río Merino, M., & Comino Almenara, P. (2002). Análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en la escayola, como alternativa a los refuerzos monofibras (homogéneos). *Materiales de Construcción*, 52(268), 33-42.
- del Río Merino, M., & Comino, P. (2002). Análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en la escayola, como alternativa a los refuerzos monofibras (homogéneos). *Materiales de Construcción*(268), 33-42.
- del Río Merino, M., Olivares, F. H., & Almenara, P. C. (2004). Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E. *Informes de la Construcción*, 56(493), 33-37.
- del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., & Hernandez Olivares, F. (1999). Patente ES2170612A1 Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción.

- Deng, Y.-H., & Furuno, T. (2001). Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers. *Journal of Wood Science*, 47(6), 445-450.
- Desirello, C., Cerini, S., Charadía, R., Scalfi, R., Liberman, C., & Stefani, P. (2004). Efecto de las condiciones de procesamiento sobre las propiedades mecánicas de aglomerados de cáscara de arroz. Paper presented at the Congreso Nacional de Metalurgia y Materiales de Chile y las Jornadas Argentinas de Materiales Santiago de Chile.
- Dhakal, H., Zhang, Z., & Richardson, M. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7), 1674-1683.
- Errasti Cabrera, M., Werner de Dios Ortega, A., Sánchez Rodríguez, A. A., & Fernández-Aballí Altamirano, C. (2015). Diseño de un sistema para el aprovechamiento integral de la cáscara de arroz. *Ingeniería Energética*, 36(1), 50-60.
- Ersöz, G. (2014). Fenton-like oxidation of Reactive Black 5 using rice husk ash based catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, 353-358.
- Etxabide, A., Leceta, I., Cabezudo, S., Guerrero, P., & de la Caba, K. (2016). Sustainable fish gelatin films: From food processing waste to compost. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(9), 4626-4634.
- European Commision. (2013). Eurostat statistics for waste flow generation Retrieved Diciembre, 2013, from <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- European Parliament. (2008). Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (pp. 3-30). Official Journal of the European Union.
- European Parliament. (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. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 5, 06-09.
- F. Martí, L. R., M. Ventura y M.A. Valera. (2015). Comportamiento mecánico de Composites de PP/yute. <http://www.aemac.org/wp/wp-content/uploads/2015/05/MATCOMP05completo.pdf>
- FAO. (2017). Seguimiento del Mercado del Arroz (SMA) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations
- FAOSTAT. (2017). Statistical Database from Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Faraldos, M., & Goberna, C. (2002). Técnicas de Análisis y caracterización de materiales. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Farias, J., & Recena, F. (1990). Study for Brazilian rice husk ash cement. Paper presented at the Proceedings of the second international RILEM symposium. Salvador.
- Fischer, C., Werge, M., & Reichel, A. (2009). EU as a Recycling Society Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU. Bruselas: European Topic Centre on Resource and Waste Management.
- Forero, A., Medrano, L., & Díaz, S. (2009). Obtención de silicio metalúrgico a partir de mezclas de ceniza de cascarilla de arroz y arena silicea. *Rev. LatinAm. Metal. Mat*, 3, 1349-1352.

- Francucci, G., Ollier, R., Faguaga, E., Rodríguez, E., & Alvarez, V. (2011). Mitigación del deterioro de propiedades mecánicas en materiales compuestos por absorción de agua mediante el agregado de nanoarcillas. Paper presented at the 11° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, Argentina.
- Fuentes Molina, N., Tarifa, O. I. F., & Mendoza, L. V. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 99-116.
- Gadea Sainz, J., Calderón Carpintero, V., Rodríguez Saiz, Á., Garabito López, J., Campos De La Fuente, P., & Gutiérrez González, S. (2013). Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado.
- García, C., & Mesias, J. (2016). Estudio comparativo de las propiedades mecánicas y reológicas de compuestos de polietileno de alta densidad con cascarilla de arroz y bagazo de caña. Tesis de Grado. Espol. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/10672>
- García Marín, R. (2000). Patente ES 2 151 441. Tablero de aglomerado de cascarilla de arroz de densidad media.
- García Santos, A. (2004a). Caracterización de compuestos de escayola reforzados, en relación con el tipo de refuerzo y la relación A/Y. *Informes de la Construcción*, 56(493), 19-31.
- García Santos, A. (2004b). Patente ES2187301B2 "Material de construcción reforzado con fibra" Priority Date 15-11-2001 Spain Patent No.
- García Santos, A. (2009). PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construcción*, 59(293), 105-124.
- Gencel, O., del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksai, F., Rabanal, F. A., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2014). Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. *Energy and Buildings*, 70, 135-144.
- Genciz, O. (2009). Effects of pozzolan incorporation and curing conditions on strength and water resistance of natural gypsum pastes. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: a review. *Journal of American science*, 6(3), 157-165.
- Gobierno de España. (2001). Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. (pp. 3507 - 3521). Official state bulletin (BOE).
- Gobierno de España. (2008a). II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (2008-2015). (pp. 19938-19948). Boletín Oficial del Estado (BOE): Ministerio de Medio Ambiente.
- Gobierno de España. (2008b). Real Decreto 105/2008, de 1 de Febrero, por el que se Regula la Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición. "Royal Decree 105/2008, of February 1, on the Production and Management of Construction and Demolition Waste" (pp. 7724-7730). Official state bulletin (BOE).
- Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) Ministerio de Industria, Turismo y Comercio., 2020 C.F.R. (2011).

- Gobierno de España. (2015). Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) (2016-2022). Boletín Oficial del Estado (BOE): Ministerio de Medio Ambiente.
- González de la Cotera, M. (1982). Morteros ligeros de cáscara de arroz. IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Lima, Perú, 1-10.
- González Madariaga, F. J. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción*, 60(509), 35-43.
- González Madariaga, F. J., & Lloveras Macia, J. (2005). Plaster mixtures for producing construction elements, contain expanded spherical plastic granules Spain Patent No.
- Gutiérrez González, S. (2012). Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos, Burgos.
- Gutiérrez González, S., Alonso, M., Gadea, J., Rodríguez, A., & Calderón, V. (2013). Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, 38, 407-412.
- Gutiérrez González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M., & Calderón, V. (2012). Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and building materials*, 34, 179-185.
- Gutiérrez González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*.
- Gutiérrez González, S., Gadea Sáinz, J., Calderón Carpintero, V., Rodríguez Sáiz, A., Junco Petrement, C., Alameda Cuenca-Romero, L., & Serna Avendaño, S. (2013). Patente. Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuo de poliamida en polvo.
- Gutiérrez, J., Cadena, C., & Bula, A. (2014). Thermal insulation produced from rice husk agglomerated using starch produced by *saccharomyces cerevisiae*. *Dyna*, 81(184), 138-143.
- Haselein, C., Calegari, L., Alberti, L., Minello, A., da Silva, P., & Pintos, R. (2002). Manufacturing gypsum-bonded-particleboard with recycled paper and Pine wood particles. *Ciência Florestal (Brazil)*.
- Hernández, C., & Fuertes, A. (2011). Biomasa vegetal no alimentaria producida en España con posibilidad de uso energético. *Información Técnica Económica Agraria*, 103(3), 209-225.
- Hernández, M. S., Hernández, C. S., Fuentes, A. G., Elorza, E., Carrera-Rodríguez, M., & Alquiza, M. J. P. (2014). Silica from rice husks employed as drug delivery for folic acid. *Journal of sol-gel science and technology*, 71(3), 514-521.
- HIRU. (2017). Portal educativo del País Vasco, 2017, from www.hiru.eus
- Hu, J., & Stroeven, P. (2004). Properties of the interfacial transition zone in model concrete. *Interface Science*, 12(4), 389-397.
- Hubadillah, S. K., Othman, M. H. D., Harun, Z., Ismail, A., Rahman, M. A., & Jaafar, J. (2017). A novel green ceramic hollow fiber membrane (CHFM) derived from rice husk ash as combined adsorbent-separator for efficient heavy metals removal. *Ceramics International*, 43(5), 4716-4720.

- Ismail, M. S., & Waliuddin, A. (1996). Effect of rice husk ash on high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 10(7), 521-526.
- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A., & García Navarro, J. (2014). New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146-152.
- Jobbins R. (2001). Composiciones de yeso de bajo peso.
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364.
- Joseph, K., Tolêdo Filho, R. D., James, B., Thomas, S., & Carvalho, L. H. d. (1999). A review on sisal fiber reinforced polymer composites. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3(3), 367-379.
- Joshi, S. V., Drzal, L., Mohanty, A., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(3), 371-376.
- Juárez Alvarado, C. A. (2002). Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lechugilla), como materiales para construcción en México.
- Junco Petrement, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra. Universidad de Burgos.
- Jung, D. S., Ryou, M.-H., Sung, Y. J., Park, S. B., & Choi, J. W. (2013). Recycling rice husks for high-capacity lithium battery anodes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12229-12234.
- Jurado, P., Mutuberría, J., Oliver, N., Charadía, R., Bruhl, S., & Garcia, N. (2003). Diseño de un proceso de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. Paper presented at the Jornadas SAM/CONAMET/simposio materia.
- Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (2002). An improved method for production of silica from rice hull ash. *Bioresource technology*, 85(3), 285-289.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Abbas, S., Saleem, M. A., Khitab, A., & Rizwan, M. (2016). Development of lighter and eco-friendly burnt clay bricks incorporating sugarcane bagasse ash. Paper presented at the International Conference on Advanced Materials and Emerging Technologies (ICAMET 2016), Lahore.
- Keller, A. (2003). Compounding and mechanical properties of biodegradable hemp fibre composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1307-1316.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A., & El-Shahat, M. (2013). Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. *Materiales de Construcción*, 63(312), 529-537.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A., & El-Shahat, M. (2014). Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. *Construction and building materials*, 68, 580-586.
- Kim, S. (2009). Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. *Industrial crops and products*, 29(2), 381-387.

- Krishnarao, R., Subrahmanyam, J., & Kumar, T. J. (2001). Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(1), 99-104.
- Kuryatnyk, T., Chabannet, M., Ambroise, J., & Pera, J. (2010). Leaching behaviour of mixtures containing plaster of Paris and calcium sulphoaluminate clinker. *Cement and Concrete Research*, 40(8), 1149-1156.
- Kwon, J. H., Ayilimis, N., & Han, T. H. (2013). Enhancement of flexural properties and dimensional stability of rice husk particleboard using wood strands in face layers. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 728-732.
- Li, J., Li, G., & Yu, Y. (2007). The influences of gypsum water-proofing additive on gypsum crystal growth. *Materials Letters*, 61(3), 872-876.
- López, L. J. M. (1991). Efectos de la aplicación de ceniza de cascarilla de arroz en la composición química y mineralógica de dos Oxisoles de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 8(2), 322-335.
- Loredo, J. C., Morales, L. V., & García, M. I. (2014). Elaboración de placas de compuesto de fibra cemento aprovechando residuos industriales como cascarilla de arroz y lodos del proceso de fabricación de papel blanco, como material de construcción de bajo costo. *Industrial Data*, 17(2), 91-98.
- Luan, T. C., & Chou, T. C. (1990). Recovery of silica from the gasification of rice husks/coal in the presence of a pilot flame in a modified fluidized bed. *Industrial & engineering chemistry research*, 29(9), 1922-1927.
- Luyt, A., & Malunka, M. (2005). Composites of low-density polyethylene and short sisal fibres: the effect of wax addition and peroxide treatment on thermal properties. *Thermochimica Acta*, 426(1), 101-107.
- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy.
- Macías, M., & Navarro, J. G. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87-100.
- Mafla, A. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. *Revista Inventum*(6).
- Mahlberg, R., Niemi, H.-M., Denes, F., & Rowell, R. (1998). Effect of oxygen and hexamethyldisiloxane plasma on morphology, wettability and adhesion properties of polypropylene and lignocellulosics. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(4), 283-297.
- Mahzan, S., Zaidi, A., Mujahid, A., Ghazali, M. I., Yahya, M. N., & Ismail, M. (2009). Investigation on sound absorption of rice-husk reinforced composite.
- MAPAMA. (2017a). Estadísticas del arroz del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, from <http://www.mapama.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/arroz/>
- MAPAMA. (2017b). Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente., from www.mapama.gob.es
- Martin, J. L. (1938). The Desilicification of Rice Hulls and a Study of the Products Obtained. MS Thesis, Louisiana State University, Eunice, LA.

- Martin, M. I., Rincon, J. M., Andreola, F., Barbieri, L., Bondioli, F., Lancellotti, I., & Romero, M. (2011). Glass-ceramic materials of system $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ from rice husk ash. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50(4), 201-206.
- Medina, N. F., Barbero-Barrera, M. M., & Bustamante, R. (2016). Improvement of the properties of gypsum-based composites with recycled isostatic graphite powder from the milling production of molds for Electrical Discharge Machining (EDM) used as a new filler. *Construction and Building Materials*, 107, 17-27.
- Mehta, P. K. (1979). The chemistry and technology of cements made from rice husk ash. Paper presented at the Proc. UNIDO/ESCAP/RCTT Workshop on Rice-Husk Ash Cement, Peshawar, Pakistan.
- Mehta, P. K. (1989). Rice husk ash as a mineral admixture in concrete. Paper presented at the Proceedings of the 2nd international seminar on durability of concrete: aspects of admixtures and industrial by-products, Gothenburg, Sweden.
- Mehta, P. K., & Pirtz, D. (1978). Use of rice hull ash to reduce temperature in high-strength mass concrete. Paper presented at the Journal Proceedings.
- Mejía, J. M., de Gutiérrez, R. M., & Puertas, F. (2013). Rice husk ash as a source of silica in alkali-activated fly ash and granulated blast furnace slag systems. *Materiales de Construcción*, 63(311), 361-375.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromolecular materials and Engineering*, 276(1), 1-24.
- Monier, V., Hestin, M., Trarieux, M., Mimid, S., Domröse, L., Van Acoleyen, M. et al. Mudgal, S. (2011). Study on the management of construction and demolition waste in the EU. Final report for the European Commission.: European Commission
- Mora Portilla, A. (2014). Propuesta de diseño y desarrollo preliminares de un prototipo de baldosa para piso a partir del PET reciclado y la cascarilla de arroz para una vivienda de interés social. *Yachana Revista Científica*, 3(1).
- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C., & Pedreño Rojas, M. A. (2016). Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. *Construction and Building Materials*, 114, 6-14.
- Moshtaghioun, B. M., & Monshi, A. (2007). Hot corrosion mechanism of tundish plaster with steel slags in continuous casting. *Journal of materials science*, 42(16), 6720-6728.
- Mutuk, T., & Mesci, B. (2014). Analysis of mechanical properties of cement containing boron waste and rice husk ash using full factorial design. *Journal of Cleaner Production*, 69, 128-132.
- Natarajan, E., Nordin, A., & Rao, A. N. (1998). Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. *Biomass and bioenergy*, 14(5), 533-546.
- Ochoa, J., Salvador, M. M. B., Rosado, M. V. B., & Bernabeu, J. J. P. (2013). Efecto de un aditivo extraído de la planta Agave americana sobre las propiedades físicas y mecánicas de un yeso. Paper presented at the Materiales de construcción.
- Okeh, O. C., Onwosi, C. O., & Odibo, F. J. C. (2014). Biogas production from rice husks generated from various rice mills in Ebonyi State, Nigeria. *Renewable Energy*, 62, 204-208.

- Olivares Santiago, M., Galán Marín, C., & Roa Fernández, J. (2003). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, 54(484), 45-62.
- Oliver Ramírez, A., García Santos, A., & Neila, F. J. (2010). Caracterización mecánica de la incorporación de materiales de cambio de fase en paneles de escayola para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente. Tesis Doctoral.
- Ordoñez, L. (2007). Reutilización de la Ceniza de Cáscara de Arroz como material de Construcción: Valoración y Optimización de sus Propiedades Puzolánicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Oteiza, I. (1993). Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste. . *Informes de la Construcción*, 45(425-426), 135-144.
- Padhi, B. K., & Patnaik, C. (1995). Development of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$, Si_3N_4 and SiC ceramic materials using rice husk. *Ceramics international*, 21(3), 213-220.
- Paredes, C., Alcides, L., Simbaña, A., & Tapia, C. (2009). Elaboración de tableros aglomerados a partir de residuos lignocelulósicos y resinas termoestables.
- Payá Bernabeu, J., Serrano, T., Borrachero, M., & Monzó, J. M. (2012). Morteros aligerados con cascarilla de arroz: diseño de mezclas y evaluación de propiedades. *Dyna*, 79(175), 128-136.
- Peña Aguado, S., & Orantes Garcia, C. (2009). Desarrollo de productos de protección pasiva frente al fuego que incorporan subproductos industriales.
- Piñeros, Y., & Otálvaro, Á. M. (2010). Evaluación de la producción de etanol a partir de cascarilla de arroz pre-tratada con NAOCL, mediante hidrólisis y fermentación simultaneas. Paper presented at the VIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Pracella, M., Chionna, D., Anguillesi, I., Kulinski, Z., & Piorkowska, E. (2006). Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with hemp fibres. *Composites Science and Technology*, 66(13), 2218-2230.
- Prada-Matiz, A., & Cortés-Castillo, C. E. (2011). Experiencias en la captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz con soluciones alcalinas. *Orinoquía*, 15(1), 16-30.
- Prada, A., & Cortés, C. E. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquía*, 14(2 sup), 155-170.
- Ramírez, A. (2002). La construcción sostenible. *Física y sociedad*, 13, 30-33.
- Rendón, D. M., Ospina, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2009). Evaluación de la sílice obtenida de un subproducto industrial en pastas y morteros de cemento portland. *Informador técnico*(73), 20-26.
- Restrepo, A. H., Burbano, J. C., & Gaitan, O. G. (2004). Diseño, construcción y evaluación de un equipo para el calentamiento de agua mediante la combustión de la cascarilla de arroz.
- Rivero Fernández, L. (1997). Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6).

- Robayo, R., Matthey, P., & Delvasto, S. (2013). Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. *Revista de la Construcción*, 12(2), 139-151.
- Rodríguez, E., & Francucci, G. (2016). PHB coating on jute fibers and its effect on natural fiber composites performance. *Journal of Composite Materials*, 50(15), 2047-2058.
- Rodríguez, J. E., Vivas, G., & Montalvo, L. (1992). Fuentes Biológicas de Silicio: Cascarilla de arroz. *Unicauca Ciencia*, 1-4.
- Roman Aleman, B., & Torres Zacarías, P. (2009). Patente WO/2009/121984 Gypsum mortar with added expanded vermiculite and method for obtaining same.
- Romaniega Piñeiro, S. (2016). Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes del reciclaje de RCD. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Romaniega Piñeiro, S., & del Río Merino, M. (2016). Patente ES2561730B2. Composición de yeso térmicamente aislante.
- Romaniega Piñeiro, S., del Río Merino, M., & Pérez García, C. (2015). New plaster composite with mineral wool fibres from CDW recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- S.G.T del MAGRAMA. (2017). Secretaría General Técnica del MAGRAMA, from http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/funciones-estructura/organizacion-organismos/organigrama/SG_Tecnica.aspx
- Salas, J., & Castro, J. V. (1985). Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cáscara de arroz. *Informes de la Construcción*, 37(372), 53-64.
- San Antonio Gonzalez, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2014). Procedure for obtaining a building material based on plaster Spain Patent No.
- San Antonio Gonzalez, A., Merino, M. D. R., Arrebola, C. V., & Villoria Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63.
- San Antonio González, A., Santos Jiménez, R., del Río Merino, M., González Cortina, M., & Viñas Arrebola, C. (2015). Feasibility of Recycling CDW as Raw Material in Gypsum Composites. *Athens Journal of Technology & Engineering (AJTE)*, January.
- Sánchez Henao, J. C. (2003). Materiales fibrosos de base conglomerada.
- Sánchez, V. (1991). Yeso reforzado con fibra de vidrio en distintos porcentajes. Cátedra de materiales de construcción. ETSAM.
- Santa Cruz Astorqui, J., Del Río Merino, M., & Villoria Sáez, P. (2015). Re-design of plaster prefabricated elements Paper presented at the III International Congress on Construction and Building Research (COINVEDI), Madrid.
- Santos Jiménez, R., San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., González Cortina, M., & Viñas Arrebola, C. (2015). Gypsum Composites with CDW as Raw Material. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 9(7), 835-838.

- Sarchi, T., & Eduardo, L. (2012). Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60000 Kcal/h. SANGOLQUÍ/ESPE/2012.
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., Shankar, S., Rajasekar, R., & Rajini, N. (2013). Characterization of natural fiber and composites–A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(19), 1457-1476.
- Satyanarayana, K., Sukumaran, K., Mukherjee, P., Pavithran, C., & Pillai, S. (1990). Natural fibre-polymer composites. *Cement and Concrete composites*, 12(2), 117-136.
- Serna, Á., del Rio Merino, M., Palomo, J. G., & González Cortina, M. (2012). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35, 633-641.
- Serrano, T., Borrachero, M., Monzó, J. M., & Payá, J. (2012). Con cascarilla de arroz: diseño de mezclas y evaluación de propiedades. *Dyna*, 79(175), 128-136.
- Shen, D., Jin, W., Hu, J., Xiao, R., & Luo, K. (2015). An overview on fast pyrolysis of the main constituents in lignocellulosic biomass to valued-added chemicals: Structures, pathways and interactions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 761-774.
- Sierra Aguilar, J. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía. Universidad de Sucre.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2007). Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 53(1), 57-77.
- Singh, N. B., & Rai, S. (2001). Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 239-243.
- Sinyoung, S., Kunchariyakun, K., Asavapisit, S., & MacKenzie, K. J. (2017). Synthesis of belite cement from nano-silica extracted from two rice husk ashes. *Journal of Environmental Management*, 190, 53-60.
- Sisman, C., Gezer, E., & Kocaman, I. (2011). Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17(1), 40-48.
- Smile Plastics. (2017). Smile Plastics Company, from <https://www.smile-plastics.com/>
- Smith, R., & Kamwanja, G. (1986). The use of rice husk for making a cementitious material. Paper presented at the Proc. Joint Symposium on the Use of Vegetable Plants and their Fibers as Building Material, Baghdad.
- Solarte, S., Ospina, M., Aperador, W., & de Gutierrez, R. M. (2007). Efecto del modo de obtención de la sílice amorfa a partir de la cascarilla de arroz en las propiedades de durabilidad del concreto armado. *Scientia et technica*, 1(36).
- Stahel, W. R., & Reday, G. (1976). The potential for substituting manpower for energy, report to the Commission of the European Communities: Brussels.
- Stefani, P. M., Cyras, V., Tejeira Barchi, A., & Vazquez, A. (2006). Mechanical properties and thermal stability of rice husk ash filled epoxy foams. *Journal of applied polymer science*, 99(6), 2957-2965.

- Stocchi, A., Lauke, B., Vázquez, A., & Bernal, C. (2007). A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(5), 1337-1343.
- Sugita, S., & Shoya, M. (1992). Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. *Special Publication*, 132, 495-512.
- Swamy, R. N. (1986). *Cement replacement materials* (Vol. 3): Surrey University Press.
- Treviño Cardona, B. I., & Gómez de la Fuente, M. I. d. C. (2003). Obtención y caracterización de carburo y nitruro de silicio a partir de cascarilla de arroz. *Ingenierías*, 6(19), 21-27.
- Universidad de Málaga. (2016). Uciencia, 2016, from <http://www.uciencia.uma.es/Coleccion-cientifico-tecnica/Mineralogia/Galeria/Yeso>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2017). Ficha general de inventario de materiales (residuos y subproductos orgánicos) que podrían ser utilizados como enmiendas del suelo y/o sustratos de cultivo en macetas, from <http://www.upv.es/resiagri/ficheros/f067.pdf>
- Valverde, A., Sarria, B., & Monteagudo, J. P. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et technica*, 1(37).
- Varón Camargo, J. (2005). Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. *El Hombre y la Máquina* 25 (Julio - Diciembre), 128-135.
- Vignon, M., Dupeyre, D., & Garcia-Jaldon, C. (1996). Morphological characterization of steam-exploded hemp fibers and their utilization in polypropylene-based composites. *Bioresource Technology*, 58(2), 203-215.
- Vimmrova, A., Keppert, M., Svoboda, L., & Černý, R. (2011). Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 84-89.
- Vinayagamoorthy, R., & Rajeswari, N. (2014). Mechanical performance studies on Vetiveria zizanioides/jute/glass fiber-reinforced hybrid polymeric composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(1), 81-92.
- Visvesvaraya, H. (1986). Recycling of agricultural wastes with special emphasis on Rice Husk Ash. Paper presented at the Use of vegetable plants and their fibers as building materials, Joint Symposium, RILEM. Bagdad, E1-E22.[Links].
- Xiao, B., Sun, X., & Sun, R. (2001). Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw. *Polymer Degradation and Stability*, 74(2), 307-319.
- Yakovlev, G., Khozin, V., Polyanskikh, I., Keriene, J., Gordina, A., & Petrova, T. (2014). Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. Paper presented at the Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE.
- Yakovlev, G., Polyanskikh, I., Fedorova, G., Gordina, A., & Buryanov, A. (2015). Anhydrite and Gypsum Compositions Modified with Ultrafine Man-Made Admixtures. *Procedia Engineering*, 108, 13-21.
- Yeoh, A. K., Bidin, R., Chong, C., & Tay, C. (1979). The relationship between temperature and duration of burning of rice-husk in the development of amorphous rice-husk ash silica.

Paper presented at the Proceedings of UNIDO/ESCAP/RCTT, Follow-up Meeting on Rice-Husk Ash Cement, Alor Setar, Malaysia.

Zhang, M. H., Lastra, R., & Malhotra, V. (1996). Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 963-977.

Zucco, L. L., & Beraldo, A. L. (2008). Effect of the addition of rice husk ash in cement-rice husk mixtures. *Engenharia Agrícola*, 28(2), 217-226.

Bibliografía generada

Artículos internacionales

"Feasibility of plaster composites with rice husk waste"

Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino, Paola Villoria Sáez

Revista: ZKG Drymix Special (Indexada en JCR – Q4)

Marzo 2016 pp 34-40

Libro: "Construction and Building Research" SPRINGER 2014

Capítulo de libro: "Additived plaster with rice husk waste"

Autores: Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino

ISBN 978-94-007-7789-7

Congresos Nacionales e Internacionales

Título: " Escayola aditivada con residuos de cascara de arroz "

Autores: Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino.

Nombre del congreso: 2º Congreso Nacional de Investigación en Edificación.

Tipo de participación: Ponencia

Fecha de realización: 15-16 y 17 Diciembre 2010

Ciudad: Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Título: "Additived plaster with rice husk waste"

Autores: Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino.

Nombre del congreso: 2º International Conference on Construction and Building Research

Tipo de participación: Ponencia

Fecha de realización: 14-16 Noviembre 2012

Ciudad: Valencia. Universitat Politècnica de València.

"Book of abstracts.", ISBN 978-84-8363-956-6

Título: "Plaster additivated with agricultural wastes : husk rice and crushed husk"

Autores: Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino.

Nombre del congreso: 1st International & 3rd National Congress on Construction Sustainable and Eco-efficient Solutions.

Tipo de participación: Ponencia

Fecha de realización: 20-22 Mayo 2013.

Ciudad: Sevilla.

"Book of abstracts.", ISBN 978-84-695-7279-5

Título: "Cáscara de arroz en pastas de escayola"

Autores: Mª José Leiva Aguilera, Mercedes del Río Merino.

Nombre del congreso: Workshop Environmental Impact of Buildings Construction.

Tipo de participación: Póster

Fecha de realización: 25-27 Septiembre 2013

Ciudad: Madrid.

Premios

2012 - Premio a la mejor ponencia presentada en el II International Conference on Construction and Building Research. Universitat Politècnica de Valencia. Noviembre

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

DMR	Directiva Marco de Residuos
PNIR	Plan Nacional Integrado de Residuos
PANER	Plan Nacional de Acción de Energías Renovables
MAPAMA	Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FAOSTAT	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura División de Estadística
SMA	Seguimiento del Mercado de Arroz de la FAO
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente
ATEDY	Asociación Técnica y Empresarial del Yeso
EPS	Poliestireno Expandido
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
WOS	Web of Science
FECYT	Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología
E-35	Escayola E-35
ANAPE	Asociación Nacional del Poliestireno Expandido
NOR	Mezclas sin residuo realizadas según normativa
REF	Mezclas de referencia sin residuo realizadas manualmente
CA	Cáscara de arroz entera
CT	Cáscara de arroz triturada
CE	Ceniza de cáscara de arroz
CO	Carga ligera de corcho natural
AR	Carga ligera de arcilla expandida
PE	Carga ligera de perlita
PO	Carga ligera de poliestireno expandido
SEM	Scanning Electron Microscopy
XRD	X-Ray Diffraction
TGA	Thermo Gravimetric Analysis

LISTADOS DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

Listado de tablas

Tabla 1. Cantidad de residuos generados en cada sector en 2014 (European Commision, 2013).	5
Tabla 2. Producción de arroz en 2014 (FAOSTAT, 2017).	10
Tabla 3. Tabla de dureza de Mohs.	13
Tabla 4. Conductividad térmica de algunos materiales (Cadena & Bula, 2002).	13
Tabla 5. Composición química de la cáscara de arroz (Mehta, 1989).	13
Tabla 6. Composición química de la ceniza de cáscara de arroz (Armesto et al., 2002).	13
Tabla 7. Composición química de la cáscara de arroz (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006). ..	14
Tabla 8. Capacidad Calorífica de algunas sustancias (HIRU, 2017).	15
Tabla 9. Capacidad Calorífica de algunos desechos vegetales (Prada & Cortés, 2010).	15
Tabla 10. Denominación de yesos según la norma europea UNE EN 13279-1 con referencia a la normativa anterior. (AENOR, 2009c)	20
Tabla 11. Valoración de los resultados de los ensayos (AENOR, 2009b).	21
Tabla 12. Composición química de algunas fibras vegetales (Francucci, et al., 2011).	26
Tabla 13. Propiedades físicas de varias fibras naturales (Sathishkumar, et al., 2013).	27
Tabla 14. Resultados encontrados de escayola adicionada con fibras. (M del Río Merino & Comino Almenara, 2002; García Santos, 2004a; Sara Gutiérrez González, 2012; Oliver Ramírez et al., 2010; Oteiza, 1993; Romaniega Piñeiro et al., 2015)	37
Tabla 15. Resumen de densidad y resistencia a la compresión de otros compuestos de yeso obtenidos por otros investigadores con otras adiciones. (Arikan & Sobolev, 2002; Başpınar & Kahraman, 2011; Borreguero et al., 2014; Gencel et al., 2014; Genciz, 2009; S Gutiérrez González et al., 2012; Gutiérrez Gonzalez et al., 2012; Khalil et al., 2013, 2014; Kuryatnyk et al., 2010; Medina, et al., 2016; Singh & Middendorf, 2007; Vimrova et al., 2011; Yakovlev et al., 2014; Yakovlev et al., 2015)	38
Tabla 16. Características de yesos aligerados que se comercializan en la actualidad.	44
Tabla 17. Denominación de las series de referencia (OB.2).	66
Tabla 18. Ejemplo de denominación de los compuestos.	66
Tabla 19. Probetas realizadas con cargas ligeras (OB.2)	66
Tabla 20. Probetas realizadas con incorporación de residuos de arroz.	67
Tabla 21. Denominación de las series realizadas con pasta de escayola-agua (FASE 1).	70
Tabla 22. Probetas realizadas con incorporación de cáscara de arroz.	71
Tabla 23. Probetas realizadas con incorporación de cáscara triturada.	71
Tabla 24. Probetas realizadas con incorporación de ceniza.	71
Tabla 25. Conductividades térmicas de algunos materiales.	75
Tabla 26. Características de la escayola E-35 (Manual Placo).	84
Tabla 27. Características de la perlita (Navarro Pérez S.L.).	85
Tabla 28. Propiedades químicas de la perlita (Francisco Navarro Pérez S.L.)	85
Tabla 29. Características de los diferentes tipos de arcilla expandida (Manual Arlita).	86
Tabla 30. Propiedades físicas de la cáscara de arroz (MAPAMA, 2017a).	87
Tabla 31. Análisis granulométrico de CA.	95
Tabla 32. Análisis granulométrico de CA (MAPAMA, 2017a)	96
Tabla 33. Análisis granulométrico de CT.	96
Tabla 34. Análisis granulométrico de CE.	96
Tabla 35. Contenido en humedad cáscara de arroz.	97
Tabla 36. Resultados de densidad real de CA, CT y CE.	98
Tabla 37. Resultados de densidad aparente de CA, CT y CE.	98
Tabla 38. Pérdidas de masa (%) en el análisis termogravimétrico de los residuos.	98
Tabla 39. Análisis aproximado de los residuos.	102
Tabla 40. Análisis aproximado de la cáscara de arroz en diferentes variedades y por diferentes países (Valverde, et al., 2007)	102
Tabla 41. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.	111

Tabla 42. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.	112
Tabla 43. Resultados medios de las series realizadas con cargas ligeras.	113
Tabla 44. Resultados de las series realizadas con AR, PE, CO, PO y residuos CA, CT y CE.	114
Tabla 45. Resultados medios de las series realizadas con CA.	119
Tabla 46. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 06CA.	120
Tabla 47. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 07CA.	120
Tabla 48. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 08CA.	121
Tabla 49. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 09CA.	122
Tabla 50. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CA y la referencia.	124
Tabla 51. Resultados medios de las series realizadas con CT.	131
Tabla 52. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 06CT.	131
Tabla 53. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 07CT.	132
Tabla 54. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CT y la referencia.	133
Tabla 55. Resultados medios de las series realizadas con CE.	139
Tabla 56. Resultados Ø de escurrimiento medio en serie 06CE.	139
Tabla 57. Resultados Ø de escurrimiento medio en series 07CE, 08CE y 09CE.	140
Tabla 58. Resultados de la densidad húmeda y seca de los compuestos escayola-CE y la referencia.	141
Tabla 59. Resultados serie 0,6 absorción de agua por capilaridad.	156
Tabla 60. Resultados serie 0,7 absorción de agua por capilaridad.	156
Tabla 61. Resultados series 0,8 y 0,9 absorción de agua por capilaridad.	156
Tabla 62. Resultados de ensayos mecánicos en probetas ensayadas a resistencia a la adherencia.	158
Tabla 63. Resumen de resultados de adherencia en serie 08.	158
Tabla 64. Coeficiente conductividad térmica de algunos materiales.	159
Tabla 65. Resumen de resultados de conductividad térmica en serie 08.	159
Tabla 66. Resultados coeficiente conductividad térmica en compuestos finales.	161
Tabla 67. Resultados coeficiente conductividad térmica (Gutiérrez Gonzalez, et al., 2012). ...	162
Tabla 68. Valores tabulados de conductividad térmica para yesos y escayolas de construcción (UNE 102011:2013).	162
Tabla 69. Resultados medios de las series realizadas con relación A/E 0,7.	163
Tabla 70. Resultados del método de Vicat.	164
Tabla 71. Valores densidad aparente de los compuestos y la serie de referencia.	171
Tabla 72. Valores densidad aparente húmeda y seca de los compuestos y la serie de referencia.	172
Tabla 73. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	173
Tabla 74. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	173
Tabla 75. Resultados un ciclo agua-estufa de las series realizadas con relación A/E 0,7.	173
Tabla 76. Resultados dos ciclos de agua-estufa de las series realizadas con relación A/E 0,7.	174
Tabla 77. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	175
Tabla 78. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	176
Tabla 79. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	176
Tabla 80. Resultados de las series realizadas con relación A/E 0,7.	177
Tabla 81. Resultados adherencia superficial sobre soporte cerámico A/E 0,7.	177
Tabla 82. Resultados adherencia superficial sobre bloque de hormigón A/E 0,7.	177
Tabla 83. Resultados de ensayos módulo de elasticidad estático.	178
Tabla 84. Resultados de ensayos módulo de elasticidad dinámico.	178
Tabla 85. Resultados del ensayo de dureza Shore C y de impacto.	180
Tabla 86. Reducción del consumo de materia prima con respecto a la probeta de referencia.	186
Tabla 87. Factores y niveles de la tabla Anova.	- 1 -
Tabla 88. Tabla Anova para la variable DENSIDAD.	- 1 -
Tabla 89. Tabla Anova para la variable DUREZA.	- 3 -
Tabla 90. Tabla Anova para la variable RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.	- 5 -
Tabla 91. Tabla Anova para la variable RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	- 7 -

Listado de gráficos

Gráfica 1. Resultados del análisis térmico (CA).....	99
Gráfica 2. Resultados del análisis térmico (CT).....	99
Gráfica 3. Resultados del análisis térmico (CE).....	100
Gráfica 4. Resultados del análisis aproximado de CA.....	101
Gráfica 5. Resultados del análisis aproximado de CT.....	101
Gráfica 6. Resultados del análisis aproximado de CE.....	102
Gráfica 7. Resultados de la difracción de rayos X-Termogravimetría	103
Gráfica 8. Desviación en porcentaje de los resultados obtenidos con las mezclas de adición ligera en comparación con las probetas referencia.....	112
Gráfica 9. Densidad de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	114
Gráfica 10. Densidad de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	115
Gráfica 11. Densidad de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	115
Gráfica 12. Dureza Shore C de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	115
Gráfica 13. Dureza Shore C de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	116
Gráfica 14. Dureza Shore C de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	116
Gráfica 15. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	116
Gráfica 16. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	117
Gráfica 17. Resistencia a flexotracción de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	117
Gráfica 18. Resistencia a compresión de los compuestos con 6% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	117
Gráfica 19. Resistencia a compresión de los compuestos con 8% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	118
Gráfica 20. Resistencia a compresión de los compuestos con 10% de cargas ligeras y residuos de arroz.....	118
Gráfica 21. Resultados del ensayo de consistencia en series 06CA.....	120
Gráfica 22. Resultados del ensayo de consistencia en series 07CA.....	121
Gráfica 23. Resultados del ensayo de consistencia en series 08CA.....	121
Gráfica 24. Resultados del ensayo de consistencia en series 09CA.....	122
Gráfica 25. Resultados del ensayo de consistencia en series 0,6-0,7-0,8-0,9.....	122
Gráfica 26. Densidad de las series CA y serie de referencia.....	123
Gráfica 27. Dureza de las series CA y serie de referencia.....	124
Gráfica 28. Resistencia a flexotracción de las series CA y de referencia.....	125
Gráfica 29. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CA y de referencia.....	125
Gráfica 30. Resistencia a compresión de las series CA y serie de referencia.....	126
Gráfica 31. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CA y serie de referencia.....	127
Gráfica 32. Serie 06CA y serie de referencia.....	128
Gráfica 33. Serie 07CA y serie de referencia.....	129
Gráfica 34. Serie 08CA y serie de referencia.....	130
Gráfica 35. Serie 09CA y serie de referencia.....	131
Gráfica 36. Densidad de las series CT y serie de referencia.....	132
Gráfica 37. Dureza de las series CT y serie de referencia.....	133
Gráfica 38. Resistencia a flexotracción de las series CT y serie de referencia.....	134
Gráfica 39. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CT y serie de referencia.....	135
Gráfica 40. Resistencia a compresión de las series CT y serie de referencia.....	135
Gráfica 41. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CT y serie de referencia.....	136
Gráfica 42. Series 06CT y serie de referencia.....	136
Gráfica 43. Series 07CT y serie de referencia.....	137
Gráfica 44. Series 08CT y serie de referencia.....	138
Gráfica 45. Series 09CT y serie de referencia.....	138

Gráfica 46. Resultados de la mesa de sacudidas en serie 06CE.	139
Gráfica 47. Densidad de las series CE y serie de referencia.	140
Gráfica 48. Dureza de las series CE y serie de referencia.	142
Gráfica 49. Resistencia a flexotracción de las series CE y serie de referencia.	142
Gráfica 50. Densidades vs Resistencia a flexotracción de las series CE y serie de referencia.	143
Gráfica 51. Resistencia a compresión de las series CE y serie de referencia.	143
Gráfica 52. Densidades vs Resistencia a compresión de las series CE y serie de referencia. ..	144
Gráfica 53. Series 06CE y serie de referencia.	144
Gráfica 54. Series 07CE y serie de referencia.	145
Gráfica 55. Series 08CE y serie de referencia.	146
Gráfica 56. Series 09CE y serie de referencia.	146
Gráfica 57. Densidades (g/cm ³) según A/E.	147
Gráficas 58. Densidades (g/cm ³) según A/E.	147
Gráfica 59. Durezas Shore C según A/E.	148
Gráficas 60. Durezas Shore C según A/E.	148
Gráfica 61. Resistencias a flexotracción (MPa) según A/E.	149
Gráficas 62. Resistencias a flexotracción (MPa) según A/E.	149
Gráfica 63. Resistencias a compresión (MPa) según A/E.	150
Gráficas 64. Resistencias a compresión (MPa) según A/E.	150
Gráfica 65. Densidades (g/cm ³) según CA, CT, CE.	151
Gráfica 66. Durezas Shore C según CA, CT, CE.	151
Gráfica 67. Resistencias a flexotracción según CA, CT, CE.	152
Gráfica 68. Resistencias a compresión según CA, CT, CE.	152
Gráfica 69. Densidad vs Dureza Shore C en series CA, CT, CE.	153
Gráfica 70. Densidad vs Resistencia a Flexotracción en series CA, CT, CE.	154
Gráfica 71. Densidad vs Resistencia a Flexotracción en series CA, CT, CE.	154
Gráfica 72. Densidad vs Resistencia a Compresión en series CA, CT, CE.	155
Gráfica 73. Densidad vs Resistencia a Compresión en series CA, CT, CE.	155
Gráfica 74. Absorción de agua por capilaridad.	156
Gráfica 75. Absorción de agua por capilaridad.	157
Gráfica 76. Conductividades térmicas de las series 0,8-CA.	160
Gráfica 77. Conductividades térmicas de las series 0,8-CT.	160
Gráfica 78. Conductividades térmicas de las series 0,8-CE.	160
Gráfica 79. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.	161
Gráfica 80. Series 0,7 realizadas con CA, CT, CE.	164
Gráfica 81. Series 0,7 realizadas con CA, CT, CE y REF.	165
Gráfica 82. Porosidad en series realizadas con CA, CT, CE.	171
Gráfica 83. Relación porosidad-densidad aparente de los compuestos y la serie de referencia.	172
Gráfica 84. Series realizadas con CA, CT, CE.	175
Gráfica 85. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.	178
Gráfica 86. Series realizadas con CA, CT, CE y referencia.	179
Gráfica 87. Densidad-Dureza en series con residuo CA.	- 10 -
Gráfica 88. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CA.	- 10 -
Gráfica 89. Densidad-R. Compresión en series con residuo CA.	- 10 -
Gráfica 90. Densidad-Dureza en series con residuo CT.	- 11 -
Gráfica 91. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CT.	- 11 -
Gráfica 92. Densidad-R. Compresión en series con residuo CT.	- 11 -
Gráfica 93. Densidad-Dureza en series con residuo CE.	- 12 -
Gráfica 94. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CE.	- 12 -
Gráfica 95. Densidad-R. Compresión en series con residuo CE.	- 12 -

Listado de figuras

Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos. (European Parliament, 2008)	2
Figura 2. Economía circular (C. Hernández & Fuertes, 2011).	4
Figura 3. Porcentaje que representan los residuos de cada sector sobre el total generado en UE-28 en el año 2014. (European Commision, 2013).....	7
Figura 4. Porcentaje que representan los residuos de cada sector sobre el total generado en España para el año 2014. (European Commision, 2013)	8
Figura 5. Residuos de las cosechas agrícolas (en materia seca) para los años 2005 a 2007 por grupos de cultivo (C. Hernández & Fuertes, 2011).	8
Figura 6. Promedio de producción de arroz mundial (1994-2014) (FAOSTAT, 2017).	9
Figura 7. Seguimiento de la producción de arroz en Asia (FAO, 2017).	9
Figura 8. Producción Mundial de arroz 1994-2014 (FAOSTAT, 2017).	10
Figura 9. Seguimiento del mercado del arroz de la FAO (FAO, 2017).	11
Figura 10. Producción de arroz en 2014 en UE (FAOSTAT, 2017).....	11
Figura 11. Producción de arroz en t en España por CCAA (2002-2012)(S.G.T del MAGRAMA, 2017).	12
Figura 12. Producción de arroz en t en España por CCAA en 2016 (MAPAMA, 2017b)	12
Figura 13. El ciclo del arroz (Blogdelarroz, 2017).	14
Figura 14. Esquema de fibras naturales (Romaniega Piñeiro, 2016).	25
Figura 15. Esquema de fibras artificiales (Romaniega Piñeiro, 2016).	28
Figura 16. Esquema de fibras artificiales (Romaniega Piñeiro, 2016).	29
Figura 17. Esquema del tablero (Kwon et al., 2013).....	47
Figura 18. Esquema del estereopícnómetro (Quanta Chrome).	61
Figura 19. Difracción de rayos X a través de un cristal (Cuesta 2013).	63
Figura 20. Tipos de cenizas en función de la temperatura de calcinación (I Águila, 2001).	88
Figura 21. Curva granulométrica de la CA.....	95
Figura 22. Curva granulométrica de la CT.....	96
Figura 23. Curva granulométrica de la CE.	97
Figura 24. Imagen SEM en secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) a 15x de la CA.	104
Figura 25. Imagen SEM en BSE a 250x de la cáscara de arroz.	105
Figura 26. Composición química de la cáscara de arroz en el punto indicado en la Figura 25.	105
Figura 27. Imagen SEM en BSE a 250x de la cáscara de arroz.	106
Figura 28. Composición química de la cáscara de arroz en el punto indicado en la Figura 27.	106
Figura 29. Imagen SEM en BSE a 20x de la cáscara de arroz.	106
Figura 30. Imagen SEM en BSE a 100x de la cáscara de arroz.	107
Figura 31. Imagen SEM en SE a 600x de la cáscara de arroz.	107
Figuras 32. Imagen SEM en SE a 150x y 250x de la cáscara de arroz triturada.	108
Figura 33. Imagen SEM en BSE a 1000x de la cáscara de arroz triturada.	108
Figura 34. Imagen SEM en BSE a 50x de la ceniza de cáscara de arroz.	109
Figura 35. Imagen SEM en SE a 250x de la ceniza de cáscara de arroz.	110
Figura 36. Imagen SEM en SE a 1000x de la ceniza de cáscara de arroz.	110
Figura 37. Imagen SEM en SE a 250x de la ceniza de cáscara de arroz.	111
Figura 38. Imagen SEM en SE a 1000x de la escayola de referencia.....	166
Figura 39. Imagen SEM en BSE a 250x del compuestos 07CA10.	166
Figura 40. Imagen SEM en SE a 50x del compuestos 07CA10.....	167
Figura 41. Imagen SEM en SE a 1000x del compuestos 07CA10.	167
Figura 42. Imagen SEM en SE a 20x del compuestos 07CT20.....	168
Figura 43. Imagen SEM en BSE a 250x del compuestos 07CT20.....	168
Figura 44. Imagen SEM en BSE a 1000x del compuestos 07CT20.	169
Figura 45. Imagen SEM en SE a 50x del compuestos 07CE15.	169
Figura 46. Imagen SEM en SE a 500x del compuestos 07CE15.	170
Figura 47. Imagen SEM en SE a 1000x del compuestos 07CE15.	170
Figura 48. Gráfica de medias de densidad en función de AE.	- 2 -
Figura 49. Gráfica de medias de densidad en función del porcentaje.	- 2 -
Figura 50. Gráfica de medias de densidad en función del residuo.....	- 3 -

Figura 51. Gráfica básicas de diagnóstico.....	- 3 -
Figura 52. Gráfica de medias de dureza en función de AE.	- 4 -
Figura 53. Gráfica de medias de dureza en función del porcentaje.	- 4 -
Figura 54. Gráfica de medias de dureza en función del residuo.	- 5 -
Figura 55. Gráficas básicas de diagnóstico.	- 5 -
Figura 56. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función de AE.....	- 6 -
Figura 57. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función del porcentaje.	- 6 -
Figura 58. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función del residuo.....	- 7 -
Figura 59. Gráficas básicas de diagnóstico.	- 7 -
Figura 60. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función de AE.	- 8 -
Figura 61. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función del porcentaje.....	- 8 -
Figura 62. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función del residuo.	- 8 -
Figura 63. Gráficas básicas de diagnóstico.	- 9 -

Listado de fotos

Foto 1. Equipo y tamices utilizados en el análisis granulométrico.....	59
Foto 2. Balanza analítica.	59
Foto 3. Estufa de secado.	59
Foto 4. Equipo Stereopycnometer Quanta Chrome.	60
Foto 5. Medición de la densidad de empaquetamiento de las partículas.	62
Foto 6. Equipo de análisis termogravimétrico.	63
Foto 7. Microbalanza.....	63
Foto 8. Equipo de DRX.....	64
Foto 9. Portamuestras.	64
Foto 10. Microscopio electrónico de barrido utilizado.....	65
Foto 11. Procedimiento de amasado a saturación.	67
Foto 12. Método de la mesa de sacudidas.	68
Foto 13. Determinación de la dureza Shore C.....	68
Foto 14. Máquina para ensayo a flexotracción.	69
Foto 15. Parámetros de ensayo a flexotracción.....	69
Foto 16. Máquina para ensayo a compresión.	69
Foto 17. Ensayo de absorción de agua por capilaridad.....	72
Foto 18. Preparación soporte.	73
Foto 19. Probetas terminadas.....	73
Foto 20. Aparato de tracción.....	74
Foto 21. Probetas preparadas.....	74
Foto 22. Probetas ensayadas.	74
Foto 23. Equipo utilizado	75
Foto 24. Interior del cubo aislado	76
Foto 25. Detalle lateral y tapa.....	76
Foto 26. Detalle de una de las paredes.	77
Foto 27. Obtención de datos del ensayo.	77
Foto 28. Equipo C-Therm TCi.	78
Foto 29. Microscopio electrónico de barrido utilizado.....	79
Foto 30. Método de Vicat en los distintos compuestos.	80
Foto 31. Ensayo para Módulo de Young.....	81
Foto 32. Parámetros obtenidos en el ensayo.....	81
Foto 33. Ensayo de Módulo de Young dinámico por ultrasonidos.	82
Foto 34. Ensayo de impacto.	82
Foto 35. Ciclo de agua.	83
Foto 36. Ciclo de estufa.	83
Foto 37. Período de congelación de probetas.	83
Foto 38. Escayola utilizada en el proceso experimental.....	85
Foto 39. Corcho utilizado en el proceso experimental.	85
Foto 40. Perlita utilizada en el proceso experimental.....	86
Foto 41. Arcilla expandida utilizada en el proceso experimental.	86
Foto 42. Poliestireno expandido utilizado en el proceso experimental.	87
Foto 43. Tipos de residuo utilizados en los ensayos.	87
Foto 44. Peso utilizado	89
Foto 45. Máquina de amasar.	89
Foto 46. Mezcla en seco de la escayola y la cáscara.....	89
Foto 47. Flotación de la cáscara.	90
Foto 48. Mezcla de la cáscara en la pasta agua-escayola.....	90
Foto 49. Mesa de sacudidas.....	90
Foto 50. Relleno de moldes.....	91
Foto 51. Probetas de CA terminadas.....	91
Foto 52. Desmoldado de probetas	91
Foto 53. Probetas a temperatura ambiente.	91
Foto 54. Probetas en estufa.	92
Foto 55. Probetas preparadas para ensayar.	92
Foto 56. Desecador de vidrio.	92

Foto 57. Fotografía tomada a 54x de la ceniza de cáscara de arroz.....	109
Foto 58. Compuestos escayola-corcho	112
Foto 59. Compuestos escayola arcilla expandida y escayola con poliestireno expandido....	113
Foto 60. Rotura a flexotracción de las probetas con incorporación de CA.	126
Foto 61. Rotura a compresión de las probetas con residuo de CA.	128
Foto 62. Realización de probetas con residuo CT.....	136
Foto 63. Probetas después del ciclo de hielo.	175
Foto 64. Revestimiento sobre soporte cerámico	179
Foto 65. Revestimiento sobre bloque de hormigón.	179
Foto 66. Fisura en revestimiento de escayola sobre soporte cerámico.	180
Foto 67. Huellas de impacto en revestimiento sobre soporte cerámico de REF-CT-CA y CE...	181
Foto 68. Huellas de impacto en revestimiento sobre bloque de hormigón de REF-CT-CA y CE.	181
Foto 69. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de REF.	182
Foto 70. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CA.	182
Foto 71. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CT.	182
Foto 72. Revestimiento en cuatro capas sobre soporte cerámico de CE.	183
Foto 73. Revestimiento de escayola en cuatro capas sobre bloque de hormigón.	183
Foto 74. Revestimiento de escayola-CA en cuatro capas sobre bloque de hormigón.	183
Foto 75. Revestimiento de escayola-CE en cuatro capas sobre bloque de hormigón.....	183
Foto 76. Revestimiento de escayola-CT en cuatro capas sobre bloque de hormigón.	184

A

ANEXOS

ANEXO 1. ANALISIS ESTADISTICO DE LAS MUESTRAS

En este apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las probetas ensayadas para poder evaluar la relación entre los factores del diseño experimental y cada una de las variables respuestas estudiadas. Para ello se utiliza el siguiente modelo estadístico en el que es nula la interacción de orden tres.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \text{error aleatorio}$$

Donde:

y_{ijk} representa el valor esperado.

$\mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk}$ representa la parte determinista del modelo.

error aleatorio es el error experimental y que se comporta como una $N(0, \sigma^2)$ e independencia.

En el análisis realizado en este trabajo existen los siguientes tres factores con tres niveles cada uno (Tabla 87).

FACTORES	NIVELES		
RELACIÓN AE	AE07	AE08	AE09
TIPO DE RESIDUO	CA	CT	CE
% DE RESIDUO	10%	15%	20%

Tabla 87. Factores y niveles de la tabla Anova.

Las variables respuestas estudiadas son las siguientes:

- Densidad aparente
- Dureza superficial Shore C
- Resistencia a flexotracción
- Resistencia a compresión

En este modelo los residuos han de cumplir independencia, homocedasticidad y normalidad. La independencia se considera cumplida por el criterio elegido para realizar las probetas y los ensayos en laboratorio.

1. ANOVA DE DENSIDAD APARENTE

Los datos obtenidos en este análisis se presentan en la Tabla 88.

	Sum cuad	G.I.	F	p-valor
AE	2.86164	3	2302.5117	4.405e-12 ***
PORCENTAJE	0.00044	2	0.5353	0.6051
RESIDUO	0.04025	2	48.5761	3.350e-05 ***
AE:PORCENTAJE	0.00172	4	1.0382	0.4444
AE:RESIDUO	0.00012	4	0.0708	0.9891
PORCENTAJE:RESIDUO	0.00254	4	1.5306	0.2815
RESIDUALS	0.00331	8		

Tabla 88. Tabla Anova para la variable DENSIDAD.

Como se puede observar en la Tabla 88 los pvalores correspondientes a los factores AE y residuo son menores que 0,05 y por tanto se consideran significativos. Sin embargo el factor porcentaje tiene un pvalor muy alto que indica que no es significativo en este estudio.

Los pvalores obtenidos para las interacciones de orden 2 no son significativos en ningún caso.

Se puede observar en la gráfica de las medias obtenida para la variable densidad en función del AE (Figura 48) y en función del residuo (Figura 50) la significatividad de estos dos factores. En el caso de la relación AE a medida que aumenta el porcentaje de agua en el compuesto la densidad disminuye. En el caso del factor residuo se puede observar que la incorporación de residuo CE en la escayola produce un ligero aumento de la densidad en los compuestos, sin embargo la adición de CA y CT a la escayola obtiene compuestos cuyas densidades no pueden rechazar la igualdad de medias.

Figura 48. Gráfica de medias de densidad en función de AE.

Figura 49. Gráfica de medias de densidad en función del porcentaje.

Figura 50. Gráfica de medias de densidad en función del residuo.

Sin embargo como se ha comentado, el porcentaje de residuo no es un factor significativo, tal y como se observa en la Figura 49.

Se cumplen las hipótesis del modelo de homocedasticidad, normalidad e independencia en residuos (Figura 51).

Figura 51. Gráfica básica de diagnóstico.

2. ANOVA DUREZA SUPERFICIAL SHORE C

Los datos obtenidos en este análisis se presentan en la Tabla 89

	Sum cuad	G.l.	F	p-valor
AE	20995.6	3	1257.6417	4.928e-11 ***
PORCENTAJE	6.7	2	0.6057	0.5689492
RESIDUO	218.3	2	19.6140	0.0008233
AE:PORCENTAJE	53.0	4	2.3827	0.1376731
AE:RESIDUO	11.5	4	0.5158	0.7269547
PORCENTAJE:RESIDUO	26.4	4	1.1847	0.3869881
RESIDUALS	44.5	8		

Tabla 89. Tabla Anova para la variable DUREZA.

Como se puede observar en la Tabla 89 los pvalores obtenidos en los factores AE y residuo son significativos. Sin embargo el factor porcentaje no es significativo. Las interacciones de orden 2 dan pvalores altos por lo que no son significativas.

Figura 52. Gráfica de medias de dureza en función de AE.

Como se observa en la Figura 52, a medida que aumenta el agua de amasado en los compuestos, la dureza superficial ShoreC disminuye.

Figura 53. Gráfica de medias de dureza en función del porcentaje.

En la Figura 53 se observa que el factor porcentaje no está relacionado con las durezas superficiales de los compuestos ensayados.

Figura 54. Gráfica de medias de dureza en función del residuo.

En la Figura 54 se observa que el factor residuo afecta a la dureza del material ya que con incorporaciones de CE los compuestos obtienen durezas algo superiores a los compuestos que incorporan CA y CT.

Por último, en la se puede observar que los residuos cumplen las hipótesis básicas de homocedasticidad y normalidad (Figura 55)

Figura 55. Gráficas básicas de diagnóstico.

3. ANOVA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN

Los datos obtenidos en este análisis se presentan en la Tabla 90.

	Sum cuad	G.I.	F	p-valor
AE	32.941	3	105.3764	9.042e-07 ***
PORCENTAJE	0.102	2	0.4910	0.6293
RESIDUO	24.179	2	116.0206	1.234e-06 ***
AE:PORCENTAJE	0.742	4	1.7793	0.2261
AE:RESIDUO	0.803	4	1.9275	0.1992
PORCENTAJE:RESIDUO	0.558	4	1.3396	0.3350
RESIDUALS	0.834	8		

Tabla 90. Tabla Anova para la variable RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.

Como se puede observar en la Tabla 90 al igual que con las variables de densidad y dureza, los factores significativos son la relación AE y el tipo de residuo incorporado.

Al igual que en los casos anteriores las relaciones AE influyen en la resistencia a flexotracción (Figura 56), es decir a medida que aumenta la cantidad de agua disminuyen las resistencias a flexotracción del compuesto.

Figura 56. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función de AE.

El factor porcentaje no es significativo con lo que las resistencias a flexotracción no se ven afectadas por este factor como se puede observar además en la gráfica de medias con los IC al 95% de la resistencia a flexotracción (Figura 57).

Figura 57. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función del porcentaje.

En cuanto al tipo de residuo (Figura 58), este factor es significativo, se puede observar que con incorporaciones de CE se obtienen resistencias superiores a los compuestos que incorporan CA y CT.

Figura 58. Gráfica de medias de la resistencia a flexotracción en función del residuo.

Por último, en la se puede observar que los residuos cumplen las hipótesis básicas de homocedasticidad y normalidad (Figura 59)

Figura 59. Gráficas básicas de diagnóstico.

4. ANOVA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los datos obtenidos en este análisis se presentan en la Tabla 91.

	Sum cuad	G.l.	F	p-valor
AE	142.348	3	154.7528	2.013e-07 ***
PORCENTAJE	0.046	2	0.0756	0.927864
RESIDUO	264.621	2	431.5215	7.115e-09 ***
AE:PORCENTAJE	1.552	4	1.2658	0.358730
AE:RESIDUO	0.571	4	0.4655	0.760001
PORCENTAJE:RESIDUO	12.260	4	9.9963	0.003348
RESIDUALS	2.453	8		

Tabla 91. Tabla Anova para la variable RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Al igual que en todas las propiedades comentadas anteriormente, los factores significativos son la relación AE y el tipo de residuo.

En la Figura 60 se puede observar que el factor AE obtiene resistencias menores a medida que se aumenta el agua de amasado de los compuestos.

Figura 60. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función de AE.

Figura 61. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función del porcentaje.

Figura 62. Gráfica de medias de la resistencia a compresión en función del residuo.

El factor porcentaje no es significativo y además en el gráfico de medias Figura 61 se observa que la resistencia a compresión en los tres niveles del factor no pueden rechazar igualdad de medias.

Sin embargo, como en los casos anteriores, el tipo de residuo obtiene resistencias a compresión que rechazan igualdad de medias (Figura 62).

Los residuos pasan homocedasticidad y normalidad (Figura 63).

Figura 63. Gráficas básicas de diagnóstico.

5. RELACIÓN LINEAL O POLINÓMICA DE COMPUESTOS ESCAYOLA-RESIDUO

A continuación se realiza un análisis de la tendencia lineal o polinómica de los distintos compuestos en función del tipo de la densidad y separados por el tipo de residuo adicionado.

Para ello definimos como variable conocida será la densidad del compuesto y las variables que se desean conocer serán las resistencias mecánicas (flexotracción y compresión) y durezas Shore C. Para ello se obtienen las distintas gráficas en función del tipo de residuo.

Para obtener la tendencia de estas variables no se tienen en cuenta las relaciones A/E ni el porcentaje de residuo ya que se estudian en función de las densidades de los compuestos.

5.1. ANÁLISIS ESCAYOLA-CA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD

Los modelos de regresión obtenidos para los compuestos Escayola-CA son los que se presentan a continuación.

La Gráfica 87, Gráfica 88 y Gráfica 89 representan los distintos modelos de regresión obtenidos con los datos de ensayo. Se consiguen sendos modelos de regresión polinómicos del compuesto Escayola-CT, de tal forma que se pueden calcular durezas, resistencias a flexotracción y compresión de compuestos con densidades entre 1,05 y 1,25 (g/cm³). El coeficiente de determinación que indica qué porcentaje de variabilidad de los datos está explicado por el modelo es de 84,5%, 85% y 89% respectivamente.

Gráfica 87. Densidad-Dureza en series con residuo CA.

Gráfica 88. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CA.

Gráfica 89. Densidad-R. Compresión en series con residuo CA.

5.2. ANÁLISIS ESCAYOLA-CT.

Los modelos de regresión obtenidos para los compuestos Escayola-CA son los que se presentan a continuación.

La Gráfica 90, Gráfica 91 y Gráfica 92 representan los distintos modelos de regresión obtenidos con los datos de ensayo. Se consiguen sendos modelos de regresión polinómicos del compuesto Escayola-CT, de tal forma que se pueden calcular durezas, resistencias a flexotracción y compresión de compuestos con densidades entre 1,05 y 1,25 (g/cm³). El coeficiente de correlación que indica qué porcentaje de variabilidad de los datos está explicada por el modelo es de 81%, 88% y 80% respectivamente.

Gráfica 90. Densidad-Dureza en series con residuo CT.

Gráfica 91. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CT.

Gráfica 92. Densidad-R. Compresión en series con residuo CT.

5.3. ANÁLISIS DE LOS COMPUESTOS CON CE.

Los modelos de regresión obtenidos para los compuestos Escayola-CA son los que se presentan a continuación.

La Gráfica 93, Gráfica 94 y Gráfica 95 representan los distintos modelos de regresión obtenidos con los datos de ensayo. Se consiguen sendos modelos de regresión polinómicos del compuesto Escayola-CE, de tal forma que se pueden calcular durezas, resistencias a flexotracción y compresión de compuestos con densidades entre 1,12 y 1,2 (g/cm³). El coeficiente de correlación que indica qué porcentaje de variabilidad de los datos está explicada por el modelo es de 86%, 84% y 93% respectivamente.

Gráfica 93. Densidad-Dureza en series con residuo CE.

Gráfica 94. Densidad-R. Flexotracción en series con residuo CE.

Gráfica 95. Densidad-R. Compresión en series con residuo CE.

A la vista de los resultados obtenidos, los modelos de regresión son tanto para CA, CT y CE polinómicos, sin embargo en algunos casos como son el del compuesto Escayola-CT, se podría obtener un modelo de regresión lineal, ya que la tendencia es muy lineal. También se observa esta tendencia lineal en el compuesto Escayola-CE cuando se relacionan las variables densidad y dureza. En todos estos casos la relación lineal es directa o positiva, es decir, el incremento de densidades provoca incrementos en la variable dependiente (dureza y resistencias mecánicas a flexotracción y compresión).

ANEXO 2. FICHA TÉCNICA “HEAT INSULATION HOUSE”

Related topics

Heat transition, heat transfer, heat conductivity, thermal radiation, hothouse effect, thermal capacity, temperature amplitude attenuation.

Principle and task

A model house with replaceable side walls is used for determining the heat transition coefficients (k values) of various walls and windows and for establishing the heat conductivities of different materials. For this purpose the temperatures on the inside and outside of the walls are measured at a constant interior and outer air temperature (in the steady state).

With a multilayer wall structure the temperature difference over a layer is proportional to the particular thermal transmission resistance. The thermal capacity of the wall material affects the wall temperatures during heating up and temporary exposure to solar radiation.

Equipment

High insulation house	04507.93	1
Thermal regul. f. high insul. house	04506.93	1
Partitions, plastic foam, 5 off	44536.02	1
Lamp socket E27, mains conn.	06751.00	1
Filament lamp, 220 V/120 W, w. refl.	06759.93	1
Temp. meter 2× NiCr-Ni, hand-held	07140.00	2
Thermocouple NiCr-Ni, 500 C max.	13615.02	4
Tripod base -PASS-	02002.55	1
Stopwatch, digital, 1/100 sec.	03071.01	1

Problems

1. Measurement and interpretation of water temperatures during the heating up and during temporary external illumination of the walls.
2. Determination of the heat conductivities of wood and Styropor.
3. Determination of the k values of ordinary glass and insulating glass windows and of wooden walls of different thicknesses, and of walls with wood, Styropor or cavity layers.

Set-up and procedure

Since the measured temperature differences play a part in the evaluation of the experimental results, the agreement of the thermocouples must be checked and any deviations taken into account in the evaluation.

Eight different walls and windows are examined in two measurement series each lasting about 1.5 h. Inner and outer wall and air temperatures have to be measured in each case and in addition the temperatures between the layers in the case of a multilayer wall structure.

Since there will be a temperature gradient from the top downwards in any house, all temperature measurements have to be recorded at the same height. Holes in the corner posts of the model house are used for the insertion of thermocouples to measure the interior and inside wall temperatures. The thermocouple used for measurement of the interior temperature projects about 5 cm into the house.

Fig. 1: Experimental set-up: Heat insulation / Heat conduction.

For measurement of the wall temperatures, the tip of the thermocouple should be firmly secured at the level of the lateral holes and as close as possible to the perpendicular centreline of the wall. The leads must also be secured to the house structure to ensure strain relief.

A 100 W incandescent lamp with a covering cap is used for heating purposes, the interior temperature being kept virtually constant by a heating thermostat. The temperature sensor of the thermostat is secured to the covering cap of the incandescent lamp and connected to the thermostat by means of a 5-pin socket on the floor and on the side of the house. The power supply for heating is introduced via the thermostat plug. The temperature switch is set on the fourth graduated division, thus producing in the steady state an internal temperature in the room of about 60°C.

1. The following walls and windows are used for the first series of measurements:

- wood, $d = 1$ cm in thickness,
- wood, $d = 2$ cm in thickness,
- Styropor, $d = 2$ cm in thickness (large 25×25 cm panel),
- ordinary glass.

The windows are in this case set in a wooden wall, $d = 1$ cm in thickness.

During the heating-up phase:

Measurement of the inside and outside wall temperatures on the wood ($d = 2$ cm) and Styropor ($d = 2$ cm) at intervals of about 5 min. After 30 min, illuminate in succession the wooden wall ($d = 2$ cm), the Styropor wall and the glass window for 5 mm with a 150 W incandescent lamp from a distance of about 15 cm, leaving in each case a 5 min interval between illumination phases. Temperature measurements to be recorded at minute intervals. While the window is illuminated, remove the thermocouple from the outer side of the wooden wall and use it to measure the interior temperature.

After about 70 min heating time (steady state): Measure the inside and outside wall temperatures of the Styropor wall over a period of about 5 min, taking particular note of the effect of the connection and disconnection of the heating. Withdraw the thermocouple measuring the interior temperature and use it for measurement of the external air temperature, then resecure it to the outside of the wooden wall, $d = 2$ cm. Measure the inside and outside wall temperatures on the wooden wall ($d = 2$ cm) during a period when the heating is connected. Open the cover of the model house and reposition the inside wall thermocouples on the wood ($d = 1$ cm) and glass sections, then close the cover. Reposition the outside wall thermocouples on the wood ($d = 1$ cm) and glass sections.

Wait about 15 min, measure the wall temperatures, then check the internal and external air temperatures.

2. The following walls and windows are used for the second series of measurements:

- multilayer wall consisting of 2 cm Styropor (inside) and 2 cm wood (outside),
- multilayer wall consisting of 1 cm wood (inside) 1 cm cavity layer (with a narrow foam strip at the edge) and 2 cm Styropor (a small 21×21 cm panel, inserted in the opening of the wall from the outside)
- wooden wall, $d = 3$ cm in thickness,
- insulating glass windows.

Fig. 2: Heat energy flow through a wall.
Internal and external air and wall temperatures:
 Θ_{Li} , Θ_{La} , Θ_{Wi} , Θ_{Wa} .

First of all measurements are recorded at four points on the wall with the cavity layer: on the wood, on the room side; on the wood, on the cavity layer side; on the Styropor, on the cavity layer side; on the Styropor, on the outside. Care is required while securing the thermocouples, to prevent folding.

After about 70 min heating time (steady state):

The temperatures at the four points on the wall with a cavity layer are kept under observation and measured over a period of a few minutes.

Open the cover of the house and reposition the thermocouples on the multilayer wood/Styropor wall, loosening the tensioning screws as far as necessary and retightening. Measure the temperature at the following three points: on the Styropor, on the room side; at the contact surface between wood and Styropor; on the wooden wall, on the outside. Then close the cover. The fourth thermocouple is used for air temperature measurements. Wait for about 15 min, measure the wall temperature, then measure the internal air temperatures (mean value over the heating period) and the outer air temperatures.

Open the cover of the house and use two thermocouples for measuring the inside wall temperatures of the wooden wall ($d = 3$ cm) and of the insulating glass windows. Close the cover. The other two thermocouples are placed on the outside of the wooden wall ($d = 3$ cm) and on the insulating glass window. Wait about 15 min and measure the wall temperatures.

Theory and evaluation

The thermal energy flow P through a homogeneous, flat wall is determined in the steady state (permanent state) by means of the air-wall heat transfer and the heat conduction in the wall. The energy flow is governed by the surface area of the wall A and the particular temperature differences:

Air-wall heat transfer, internal
(α_i = internal heat transfer coefficient)

$$P = \alpha_i \cdot A \cdot (\Theta_{Li} - \Theta_{Wi}) \quad (1)$$

Wall-air heat transmission, external
(α_a = external heat transfer coefficient)

$$P = \alpha_a \cdot A \cdot (\Theta_{Wa} - \Theta_{La}) \quad (2)$$

Heat conduction in the wall
(d = thickness, λ = heat conductivity)

$$P = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (\Theta_{Wi} - \Theta_{Wa}) \quad (3)$$

Rearrangement and summation of these three equations yields

$$P = k \cdot A (\Theta_{Li} - \Theta_{La}) \quad (4)$$

in which k = heat transition coefficient or k value.

The following formula then applies

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (5)$$

The parameter

$$\Delta = \lambda/d \quad (6)$$

which is governed only by the material and thickness of the wall is known as the thermal transmission coefficient.

The reciprocals α , k and A are thermal resistance values which are designated the heat transfer resistance, the heat transition resistance and the heat transmission resistance. In a wall consisting of successive layers, equation (3) applies as appropriate to all layers, so that the sum of the heat transmission resistance has to be inserted in equation (5).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2} + \dots + \frac{1}{\Lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (7)$$

The phenomena participating in the transfer of heat through a layer of air are the conduction, convection and radiation. Equation (6) yields an approximate value for the heat transmission coefficient of a vertical air layer between non-metallic walls only in the case of small thicknesses ($d < 5$ mm). With an increase in the thickness it is mainly determined by the radiation fraction which, in the case of parallel surfaces, is independent of the distance between them. With layer thicknesses in excess of 5 cm the convection process causes a reduction in the resistance.

Our consideration of the problem has up to now dealt with the steady state. The heating and cooling of a wall accompanying a change of solar radiation is determined by the heat storage capacity C of the wall:

$$C = c \cdot m \quad (8)$$

in which c = specific thermal capacity,
 m = mass of the wall.

Temperature variations on the outside should be reflected as little as possible on the inside. A smaller temperature amplitude on the inside wall is in general accompanied by a correspondingly large phase displacement.

The wood and Styropor wall temperatures recorded during the heating up phase, showed wooden walls of identical thickness to have a higher heat storage capacity. In the Styropor wall steady-state temperatures were reached even after 20 min.

Short-term illumination of the walls gives rise to a very high temperature on the outside wall (heating from about 30° to about 80°C). In the Styropor wall the heating is transmitted with only a very slight time-lag (about 2 min) and a low amplitude to the inner wall (heating by about 7 K). After disconnection of the lamp, the temperatures on both the inside and the outside fall to the initial values within 5 min.

During illumination of the wooden wall the temperature on the inside only rises appreciably after about 2 min, reaching the peak value after a further 8 min. Since the steady-state temperature of the wooden wall has not yet been reached, only a very slight fall in the inside wall temperature occurs on conclusion of the illumination period. The temperature of the outside wall falls back slowly after disconnection of the lamp, reaching the end temperature only after about 30 min.

The entry of light through the window causes the interior temperature to rise initially by about 5 K. The heating comes into operation very much less frequently if at all, so that cooling occurs and the room temperature again falls. A heating of 1–2 K is observed on the inside of wooden and Styropor walls.

In the steady state the interior temperature may vary by about 2 K as a result of the thermostatically controlled heating; it

Table 1

Temperatures of air and insulating materials as well as the values of k and the conductivities of different insulating materials and windows.		Θ_{Li} °C	Θ_{La} °C	Θ_{Wi} °C	Θ_{Wa} °C	P/A W/m ²	k W/Km ²	λ W/Km
Styropor,	2 cm	55.3	22.3	51.6	27.7	44	1.3	0.037
Wood,	1 cm	55.3	22.3	45.1	35.1	109	3.3	0.12
Wood,	2 cm	55.3	22.3	47.3	34.0	95	2.9	0.14
Wood,	3 cm	58.1	23.0	49.1	32.2	75	2.1	0.13
Glass,	5 mm	55.3	22.3	40.7	39.4	139	4.2	0.53
Insulating glass		58.1	23.0	48.7	34.5	93	2.7	–
Values taken from the literature for the thermal conductivities of the materials used:								
Wood (spruce, plywood)		$\lambda = 0.14$ W/Km						
Polystyrene expanded foam,								
Bulk density 15–30 kg/m ³		$\lambda = 0.035$ – 0.041 W/Km						
Glass		$\lambda = 0.7$ – 1.1 W/Km						

also rises by a further 2 K/h after 1 h heating time, so that the interior temperature is slightly higher during the second series of measurements. Measurement of the inside wall temperatures of Styropor walls may reveal a variation of about 0.5 K in parallel with variations in the air temperature, the variation in other types of wall being only 0.1 K (corresponding to 1 digit on the dial).

The thermal energy flow through a wall is determined from the difference in the outside wall and the outside air temperature. The heat transfer coefficient in the case of natural air movement in enclosed rooms is for all wall materials encountered in practice

$$\alpha = 8.1 \text{ W/Km}^2$$

Course of the calculation:

Equation (2) yields P/A

Equation (4) yields k

Equation (3) yields λ

Table 1 contains all the calculated data and measurement results for homogeneous walls and for windows.

The bulk density of the Styropor wall used for this purpose is 20 kg/m^3 . Determination of the thermal conductivity of glass involves a serious error, since the temperature difference across the wall is small.

Equation (5) indicates a linear connection between the heat transition resistance $1/k$ and the wall thickness d , which is reproduced in Fig. 3. The intercept of the axis for $d = 0$ is equal to the sum of the internal and external heat transfer resistance $1/\alpha_i + 1/\alpha_a$; it is obtained by extrapolation of the measurement values for wood (in the model house $\alpha_i > \alpha_a$ as a result of the radiation of heat to the walls from the large radiator). The measurement for Styropor has been entered in the graph in order to make this clear.

The greater the thermal conductivity, the less steep will be the curve. In the case of good heat conductors, the main factor contributing to heat insulation is the heat transfer resistance (due merely to the presence of a wall). The thickness of the wall exerts a considerable influence on the heat transition resistance, especially in the case of bad heat conductors (insulating materials).

The heat transmission coefficient for a vertical layer of air in a wall is calculated from equations (3) and (6) in the following form:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\Delta\Theta \cdot A}{P} \quad (9)$$

in which $\Delta\Theta$ denotes the temperature difference over the air layer and P/A is determined from equation (2).

The measurements on the wood/Styropor wall with a cavity layer yield the following:

$$\frac{P}{A} = 8.1 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2} \cdot (27.8^\circ\text{C} - 23.0^\circ\text{C}) = 39 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{(50.1^\circ\text{C} - 45.1^\circ\text{C})}{39 \text{ W/m}^2} = 0.13 \frac{\text{Km}^2}{\text{W}}$$

Fig. 3: Heat transition resistance $1/k$ as a function of the wall thickness d .

Literature value for an air layer 1 cm in thickness:

$$\frac{1}{\Lambda} = 0.14 \frac{\text{Km}^2}{\text{W}}$$

On a multilayer wall the ratio of the temperature differences is equal to the inverse ratio of the heat transmission resistances:

$$\frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = \frac{\Delta\Theta_1}{\Delta\Theta_2} \quad (10)$$

This expression is frequently used in conjunction with a heat measuring plate having a known heat transmission coefficient to determine the thermal conductivity value of other materials.

Using equation (10), we obtain for the wood/Styropor walls with layers of identical thickness d , used in the experiment:

$$\frac{\Delta\Theta_{\text{wood}}}{\Delta\Theta_{\text{Styropor}}} = \frac{\lambda_{\text{Styropor}}}{\lambda_{\text{Wood}}} \quad (11)$$

Assuming λ_{wood} to be a known quantity, the measurement yields the following value:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Styropor}} &= \frac{34.3^\circ\text{C} - 28.2^\circ\text{C}}{55.4^\circ\text{C} - 34.3^\circ\text{C}} \cdot 0.14 \text{ W/Km} \\ &= 0.040 \text{ W/Km.} \end{aligned}$$

ANEXO 3. CARACTERÍSTICAS DE LA CÁSCARA DE ARROZ

1 - DENOMINACIÓN DEL MATERIAL

Cascarilla de arroz (media)

2 - ORIGEN

Arrocerías Herba, S.A.

Ctra. Almería-Valencia, N-332, Km 244

46 460 Silla (Valencia)

Tfno: 96 120 30 50

3 - GRANULOMETRÍA

4 - PROPIEDADES FÍSICAS

Humedad (%)	8,7
Densidad real (g/cm ³)	1,57
Densidad aparente (g/cm ³)	0,115
Espacio poroso total (% vol)	92,7
Capacidad de aireación (% vol)	79,5
Volumen de agua* (% vol)	13,2
Capacidad de retención total de agua (g/l material)	132
Contracción (% vol)	No apreciable

* A 10 cm de c.a.

5 - PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS

Suspensión acuosa 1/6 (vol/vol)	pH (suspensión):	6,42
	CE (extracto, dS/m):	0,39
Materia orgánica total (%): 83,0	Relación C/N:	48,2
Elementos totales (% s.m.s.)		
N: 0,7	P ₂ O ₅ : 0,66	K ₂ O: 0,52

6 - BIOENSAYOS DE GERMINACIÓN

Extracto 1/10 (p/p)	Extracto puro		Extracto diluido al 75 % (vol/vol)	
	Berro	Lechuga	Berro	Lechuga
Índice de Germinación (% del control)	24	123	122	119