DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN
Escuela Técnica Superior de Edificación

**INFLUENCIA DE LA DOSIFICACIÓN Y GRANULOMETRÍA DEL
CAUCHO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) Y DE LAS
DIMENSIONES FÍSICAS EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS,
ACÚSTICAS Y MECÁNICAS DE PLACAS DE MORTERO DE
YESO-CAUCHO**

TESIS DOCTORAL

Autor

Sofía Herrero del Cura

Arquitecta

Director

Pablo Luís Mayor Lobo

Doctor Arquitecto. Profesor Titular de Universidad

2016

A mi familia.

Gracias.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia el estímulo y apoyo que me han ofrecido en todo momento.

Agradecer también a todas las personas, instituciones y empresas que de una u otra forma han colaborado en la elaboración de esta tesis.

A mi Director y amigo, D. Pablo Luis Mayor Lobo, que siempre me animó a continuar y aportó su buen humor a las tareas más difíciles.

De manera especial al catedrático D. Francisco Hernández Olivares, que me guio y me regaló su tiempo, sus conocimientos y sus ideas originales con una generosidad difícil de encontrar.

Agradecer también a la ETSEM permitirme utilizar el material y las instalaciones de los laboratorios de materiales, física y acústica. Al personal de los mismos Javier, Santiago y Emilia por su imprescindible ayuda en el desarrollo de los ensayos y a Rafael Bermejo de la ETSIAE por su aportación en la elaboración de moldes.

A la empresa Renecal que me suministró y caracterizó el caucho necesario para esta investigación.

Gracias a todos los profesores que me ayudaron y aconsejaron, en especial a David Caballol, Alfonso García y David Sanz.

Por último gracias a los amigos y compañeros que se interesaron por mi trabajo y me ayudaron en la medida de sus posibilidades: Oscar, Rafa, Fernando, Javier, Fidel y Ramón.

Resumen

El origen de este trabajo está en el interés en la reutilización de materiales aprovechando sus características para mejorar las propiedades de los conglomerantes utilizados habitualmente en construcción para la fabricación de elementos constructivos.

La investigación se centra en el estudio experimental de probetas y placas de escayola con adición de diversas fracciones volumétricas de caucho, procedentes de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso, en tres granulometrías diferentes (0-0,6 mm, 0,5-2,5 mm y 2,5-4,0 mm nominal).

Se describen los materiales empleados, las dosificaciones y sus propiedades físicas, mecánicas, de medida de conductividad térmica, su comportamiento acústico, elástico y frente al agua. Se comparan las medidas experimentales obtenidas para las probetas con adición de caucho NFU, con otras similares realizadas sobre probetas de escayola de idénticas características sin ningún tipo de adición, evaluándose la influencia de la granulometría y la dosificación. La variable geométrica se considera únicamente en el estudio de aislamiento acústico mediante la modificación de las placas sometidas a ensayo.

Se aprecia una reducción de las resistencias mecánicas a medida que se incrementa la proporción de caucho, así como un incremento en la porosidad. Sin embargo se ha obtenido una mejora en el comportamiento térmico y acústico y una minoración en la densidad.

De la combinación óptima de los tres aspectos considerados: dosificación, granulometría del caucho y espesor de placas se propone un nuevo material con mejoras en la densidad, tenacidad y en el comportamiento térmico, acústico y frente al agua manteniendo la resistencia dentro de unos límites aceptables para las aplicaciones que se proponen.

Abstract

This dissertation is based on the reuse of certain materials, taking advantage of its characteristic features, with the purpose of improving the properties of the binders commonly used in construction with the aim of using them for the industrial production of building elements.

The research is focused on the experimental study of plaster test samples and boards with the addition of various volumetric rubber fractions from mechanical grinding of end-of-life tires (ELT), in three different particle size gradations (0-0,6 mm, 0,5-2,5 mm y 2,5-4,0 mm nominal diameter).

All the materials and proportions used, as well as their physical and mechanical properties, thermal conductivity, acoustic and elastic behavior and performance in the presence of water are described throughout the text. Experimental results obtained for specimens with addition of recycled rubber, are compared with similar ones carried out on specimens of plaster of identical features without any addition, evaluating the influence of the particle size and proportion. The geometric variable is applied only in the acoustic insulation test, by changing the size of the testing boards.

A reduction in the mechanical strength, as well as a higher porosity is observed with the increase in the proportion of rubber. Nevertheless, an improvement in both acoustic and thermal behavior has been achieved together with a decrease in density.

From the optimal combination of the three considered facts: proportion, rubber granulometry and plasterboards thickness, a new material is proposed which includes improvements in density, endurance, thermal and acoustic behavior and performance in the presence of water, maintaining its mechanical strength within acceptable limits for the proposed applications.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL YESO	3
1.1.1 Proceso de transformación del yeso	5
1.1.1.1 El proceso de deshidratación. Fases del sistema sulfato cálcico-agua.....	5
1.1.1.2 Fases del sistema sulfato cálcico-agua	6
1.1.1.3 El proceso de hidratación: fraguado del yeso.....	8
1.1.2 El yeso de construcción.	9
1.1.2.1 Fabricación del yeso.....	10
1.1.2.2 Productos en polvo	11
1.1.2.3 Aditivos	15
1.1.2.4 Agregados o adiciones	17
1.1.3 Propiedades del yeso.....	17
1.1.3.1 Características de los productos en polvo.....	18
1.1.3.2 Características de las pastas.....	19
1.1.3.2.1 Fraguado del yeso	20

Índice

1.1.3.3 Propiedades del yeso endurecido	24
1.1.3.3.1 Propiedades físicas y mecánicas.....	24
1.1.3.3.2 Comportamiento térmico del yeso	30
1.1.3.3.3 Comportamiento frente a la humedad y el vapor de agua del yeso	35
1.1.3.3.4 Comportamiento acústico del yeso	37
1.1.3.3.5 Comportamiento frente al fuego del yeso	42
1.2 . EL CAUCHO NFU	43
1.2.1 Marco legal.....	44
1.2.2 Gestión y tratamiento de los NFU	47
1.2.3 Tratamientos mecánicos. Tecnologías de reducción de tamaño.	49
1.2.4 Aplicaciones de los Neumáticos Fuera de Uso	52
1.2.5 El caucho.....	56
1.2.6 Características del polvo de caucho (CEDEX).....	57
1.3 . ESTADO DE LA CUESTIÓN	61
1.3.1 Incorporación de diferentes tipos de cargas a matrices de yeso o escayola.	61
1.3.1.1 Incorporación de cargas aligerantes y/o reforzantes.....	62
1.3.1.2 Incorporación de cargas procedentes de reciclado	66
1.3.2 Incorporación de caucho NFU a morteros de cemento y hormigones.....	68
1.3.3 Incorporación de caucho NFU a una matriz de yeso.....	80
2. OBJETIVOS GENERALES	83
3. MATERIALES	85
3.1 CONGLOMERANTE	85
3.2 . POLVO DE CAUCHO.....	86
4. MÉTODO EXPERIMENTAL	91

4.1	SERIES REALIZADAS: COMPOSICIÓN Y DENOMINACIÓN..	92
4.2	CONFECCIÓN DE MUESTRAS.....	94
4.3	ENSAYOS REALIZADOS.....	98
4.4	CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS	100
4.4.1	Relación agua/yeso.....	100
4.5	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS	104
4.5.1	Densidad seca y variación de masa.....	104
4.5.2	Dureza Shore C.....	104
4.5.3	Resistencia a flexión	105
4.5.4	Resistencia a compresión	106
4.6	ENSAYO DE LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA....	108
4.6.1	Fundamentos teóricos: la transmisión de calor	108
4.6.2	Equipo empleado	112
4.6.3	Procedimiento seguido en el ensayo.....	114
4.7	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO.....	119
4.7.1	Ensayo de medida de reducción de presión sonora a ruido aéreo y a ruido de impacto.....	119
4.7.1.1	Medida del Aislamiento Acústico	120
4.7.1.2	Equipo empleado	125
4.7.1.3	Procedimiento seguido en el ensayo.....	129
4.7.2	Ensayo de medida de absorción acústica	131
4.7.2.1	Coeficiente de absorción acústica	132
4.7.2.2	Equipo empleado	135
4.7.2.3	Procedimiento seguido en el ensayo.....	139
4.8	COMPORTAMIENTO ELÁSTICO	141
4.8.1	Módulo de elasticidad dinámico	141
4.8.2	Módulo de elasticidad estático.	143

Índice

4.9	COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA	147
4.9.1	Porosidad abierta	148
4.9.2	Coeficiente de absorción por inmersión	149
4.9.3	Coeficiente de absorción por capilaridad	150
4.9.4	Estimación del tamaño del poro y su distribución.....	152
4.9.5	Expansión volumétrica por absorción de agua.....	155
5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	157
5.1	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPUESTO FRESCO.....	159
5.1.1	Determinación de la relación A/Y	159
5.2	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS..	
		162
5.2.1	Aspecto físico de las muestras.....	162
5.2.2	Peso al desmoldar y peso seco.....	163
5.2.3	Determinación de la densidad seca	166
5.2.4	Determinación de la dureza Shore C	169
5.2.5	Determinación de la resistencia a flexión	174
5.2.6	Determinación de la resistencia a compresión	181
5.3	DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	191
5.3.1	Análisis comparativo de la conductividad térmica experimental y la teórica en función de su densidad.	202
5.4	COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	209
5.4.1	Aislamiento a Ruido aéreo	209
5.4.2	Ruido de impacto	216
5.4.3	Coeficiente de absorción acústica.....	219
5.5	COMPORTAMIENTO ELÁSTICO	223
5.5.1	Módulo de elasticidad dinámico	223
5.5.2	Módulo de elasticidad estático. Curvas de tensión-deformación.....	228

5.6	COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA	233
5.6.1	Porosidad abierta, densidad aparente y coeficiente de absorción por inmersión	233
5.6.2	Coeficiente de absorción por capilaridad	239
5.6.3	Tamaño de poro y número de poros	247
5.6.4	Microestructura.....	256
5.6.5	Expansión volumétrica por absorción de agua.....	265
6.	CONCLUSIONES	267
6.1	CONCLUSIONES GENERALES	268
6.2	SELECCIÓN DE COMPUESTOS	275
6.3	APLICACIONES	276
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	279
8.	BIBLIOGRAFIA	281

Índice de tablas

Tabla 1.1. Clases de piedra de yeso, de acuerdo con su proporción en Sulfato Cálcico. (UNE 102-001-86).....	4
Tabla 1.2. Tipos de aljez, de acuerdo con su tamaño. (UNE 102-001-86).....	4
Tabla 1.3. Familia de los yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción (UNE 13279-1:08).....	11
Tabla 1.4. Designación de los tipos de yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción.....	12
Tabla 1.5. Correspondencia entre las denominaciones anteriores y las actuales de los tipos de yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción.....	13
Tabla 1.6. Agua de amasado para diferentes productos. Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid	21
Tabla 1.7. Relación entre el agua de amasado y la densidad. (1) Datos tomados del S.N.F.I.P. "Chaiers Techniquers", 1973-74, París. (2) E. BLACHERE: Saber construir, Barcelona 1967 (3) Datos tomados de COLLOMB y DALIGAND: Comunicación a la Comisión Científico-técnica de Eurogysum. Lyon, 1971. "Boletín Informativo del Yeso", núm. 4. Madrid, enero 1972. (4) COLOMB: Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico. "Boletín Informativo del Yeso", núm. 14. Madrid, junio 1974.....	22
Tabla 1.8. Módulo de elasticidad. Villanueva Dominguez,Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid	25
Tabla 1.9. Valores establecidos en la Norma Europea EN 13279-2 que deben cumplir: (a) yesos para la construcción tipo B1 a B7 (b) yeso para la construcción para aplicaciones especiales C1 a C7.....	26

Indice

Tabla 1.10. Humedad de equilibrio de diferentes productos para distintos ambientes, en % en volumen. Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid.....	28
Tabla 1.11. Pérdida de resistencia del yeso por contenido en humedad. F. ARREDONDO: Estudio de materiales, II. El Yeso. Madrid, 1963.....	28
Tabla 1.12. Valores de coeficientes de conductividades térmicas del yeso en función de sus densidades.....	31
Tabla 1.13. Valores de conductividad térmica según la NBE-CT 79.....	31
Tabla 1.14. Valores de conductividad térmica según la NBE-CT 79.....	32
Tabla 1.15. Coeficientes de conductividad térmica de cálculo según la NBE-CT79.....	32
Tabla 1.16. Valores del coeficiente de fricción para diversos materiales de construcción. E. DIAMANT: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967.....	33
Tabla 1.17. Inercia térmica, velocidad de propagación de la onda térmica y factor de amortiguamiento. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción.1975.....	33
Tabla 1.18. Valores del coeficiente de penetración térmica para diferentes materiales. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción.1975.....	34
Tabla 1.19. Valores del coeficiente de penetración térmica para el yeso en estado seco y en función de la densidad. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción.1975.....	34
Tabla 1.20. Resistividad al vapor de agua de diversos materiales, según la NBE-CT 79.....	35
Tabla 1.21. Coeficiente de absorción de agua en tendidos de yeso. Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid	36
Tabla 1.22. Valores experimentales de aislamiento acústico en tabiques simples de placas de yeso para diferentes frecuencias y valor medio. Datos del Laboratorio INCE. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las	

Propiedades del Yeso en la Construcción. Boletín informativo del yeso nº 19. 1975.....	40
Tabla 1.23. Valores experimentales de aislamiento acústico en tabiques compuestos en los que interviene el yeso, para diferentes frecuencias y valor medio. Datos del Laboratorio INCE. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. Boletín informativo del yeso nº 19. 1975.....	40
Tabla 1.24. Valores medios experimentales de aislamiento acústico para distintos materiales con y sin guarnecido de yeso. (1) W.HENN: Tabiques. Barcelona. 1971.	40
Tabla 1.25. Valores del coeficiente de absorción acústica para diversos materiales de construcción. E. NEUFERT: Arte de proyectar en Arquitectura. Barcelona, 1942. R.CADIERGUES: Aislamiento y protección de las construcciones. Barcelona, 1957.....	41
Tabla 1.26. Fuente SIGNUS ECOVALOR Y TNU.....	44
Tabla 1.27. Caracterización de los productos según tecnologías empleadas. Fuente: Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Autores: Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M..	49
Tabla 1.28. Estadísticas NFU 2004 en España. Fuente: SIGNUS ECOVALOR.....	55
Tabla 1.29. Estadísticas NFU 2004 en la Unión Europea. Fuente: BLIC.....	56
Tabla 1.30. Composición ponderal aproximada de los neumáticos de turismo y camión en la UE. Fuente: Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Autores: Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M.(Fuente: ETRA, European Tyre Recycling Association).....	58
Tabla 1.31. Composición química de los neumáticos usados. Fuente: Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Autores: Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M. (Fuente: OFEFP).....	59
Tabla 3.1. Características técnicas de la escayola, según especificaciones técnicas del fabricante.....	85

Indice

Tabla 3.2. Caucho reciclado en polvo: Propiedades físicas y análisis químico...	86
Tabla 3.3. Denominación comercial polvo de caucho por granulometrías.....	87
Tabla 3.4. Estadísticas NFU 2004 en la Unión Europea. Fuente: BLIC.....	87
Tabla 3.5. Análisis granulométrico polvo de caucho 0,6mm -2,5mm.....	88
Tabla 3.6. Análisis granulométrico polvo de caucho 2,5mm-4,0mm.....	89
Tabla 4.1. Denominación de las series en función del tamaño de partícula de caucho NFU y % en peso de caucho sobre escayola E-35	93
Tabla 5.1. Determinación de la relación A/Y.....	160
Tabla 5.2. Variación de peso al desmoldar a peso seco para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría	165
Tabla 5.3. Densidad húmeda y seca de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.....	166
Tabla 5.4. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.0-0.6mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40,50 y 60% (unidades Shore C).....	171
Tabla 5.5. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.5-2.5 mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40,50 y 60% (unidades Shore C).....	172
Tabla 5.6. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40 y 50% (unidades Shore C).....	173
Tabla 5.7. Resistencia a flexión serie de referencia y compuestos escayola-caucho para todas las granulometrías.	180
Tabla 5.8. Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 0-0.6mm.....	188
Tabla 5.9. Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 0.5- 2.5 mm.....	189
Tabla 5.10. Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm.....	190
Tabla 5.11. Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 0.0-0.6 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: e=2 cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).....	199

Tabla 5.12. Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 0.6-2.5 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: $e=2$ cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).....	199
Tabla 5.13. Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: $e=2$ cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).....	200
Tabla 5.14. Conductividad térmica del compuesto, experimental y teórica considerando comportamiento en serie y en paralelo.	206
Tabla 5.15. Aislamiento experimental y según la ley de masas para placas de 2 cm y 3 cm de espesor.	211
Tabla 5.16. Ruido de impacto. Presión sonora en el recinto receptor para placas de 2 cm y 3 cm.....	216
Tabla 5.17. Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola caucho por granulometrías.....	227
Tabla 5.18. Módulo de elasticidad estático a flexión de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría. Porcentaje de reducción respecto a muestra de referencia.....	232
Tabla 5.19. Densidad aparente, absorción y porosidad abierta para serie de referencia y las correspondientes a la granulometría de 0.6 para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.....	236
Tabla 5.20. Densidad aparente, absorción y porosidad abierta para serie de referencia y las correspondientes a la granulometría de 2.5 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.....	237
Tabla 5.21. Densidad aparente, absorción y porosidad abierta para serie de referencia y las correspondientes a la granulometría de 4.0 para adiciones de caucho de 30, 40 y 50% en peso.....	238
Tabla 5.22. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6. Valores medios de peso, incremento de masa y absorción por capilaridad en función del tiempo para tres muestras de las series de referencia y las correspondientes a la granulometría más fina de 0.6 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.	244
Tabla 5.23. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5. Valores medios de peso, incremento de masa y absorción por capilaridad en función del	

Indice

tiempo para tres muestras de las series de referencia y las correspondientes a la granulometría medio de 2.5 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.....	245
Tabla 5.24. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 4.0. Valores medios de peso, incremento de masa y absorción por capilaridad en función del tiempo para tres muestras de las series de referencia y las correspondientes a la granulometría de 4.0 mm para adiciones de caucho de 30, 40 y 50% en peso.....	246
Tabla 5.25. Coeficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%	247
Tabla 5.26. Coeficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%.	248
Tabla 5.27. Coeficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%	249
Tabla 5.28. Radio medio de megaporo y número de ellos para muestras de referencia y para las tres granulometrías estudiadas con adiciones de caucho del 30%, 40%, 50% y hasta 60% en peso. Resultados obtenidos a diferentes intervalos de tiempo.....	253
Tabla 5.29. Valores de superficies de cristales y poros y coeficiente de forma de cristales individualizados de las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0.....	267
Tabla 5.30. Valores medios de superficies y coeficientes de forma de cristales y de superficies de poros para las tres zonas estudiadas de la muestra C-40-0.6.....	268
Tabla 5.31. Expansión volumétrica por absorción de agua series de referencia y adiciones de caucho del 30%, 40%, 50% y hasta 60% en peso para todas las granulometrías. Los valores A y B se corresponden con las dimensiones de la sección transversal de las muestras (40 mm x 40 mm) y el valor H con la dimensión longitudinal o altura.....	270
Tabla 6.1. Resultados de : relación A/Y, densidad, dureza Shore C, resistencia a flexión y a compresión, conductividad térmica, aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impacto, coeficiente de absorción acústica NCR, módulo de elasticidad estático y dinámico, coeficiente de absorción por inmersión y por capilaridad, porosidad abierta y deformación por absorción de agua, para los compuestos analizados.....	283

Índice de figuras

Fig. 1.1. Piedra de yeso.....	3
Fig. 1.2. Diagrama de fases en función contenido de agua combinada y la temperatura.	6
Fig. 1.3. Medida del proceso de fraguado por diversos indicadores físicos.....	20
Fig. 1.4. Influencia del agua de amasado sobre distintas propiedades del yeso.	23
Fig. 1.5. Expansión de fraguado con relación al tiempo.....	23
Fig. 1.6. Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad.....	27
Fig. 1.7. Influencia del agua de amasado sobre la dureza Shore C.....	29
Fig. 1.8. Comportamiento acústico de los materiales de acuerdo a la Ley de masas. Aislamiento sonoro de una pared en función de su masa.....	37
Fig. 1.9. Aislamiento acústico para elementos de una sola hoja, en función de la masa por unidad de superficie.	39
Fig. 1.10. Neumáticos depositados en vertedero.....	43
Fig. 1.11. Recauchutado de neumáticos.....	48
Fig. 1.12. Uso de neumáticos enteros para taludes.....	52
Fig. 1.13. Neumáticos en trozos para relleno de terraplenes.....	52
Fig. 3.1. Conglomerante: Escayola E-35	85
Fig. 3.2. Polvo de caucho 0,0mm-0,6mm. Análisis granulométrico.....	87
Fig. 3.3. Polvo de caucho 0,6mm-2,5mm. Análisis granulométrico.....	88

Indice

Fig. 3.4. Polvo de caucho 2,5mm-4,0mm. Análisis granulométrico.....	89
Fig. 4.1. Sección de muestras clasificadas por tamaño de partículas de caucho y % de adición.....	92
Fig. 4.2. Moldes para ensayos físicos y mecánicos.....	94
Fig. 4.3. Moldes para ensayos térmicos y acústicos.....	94
Fig. 4.4. Moldes para ensayo de absorción acústica.....	94
Fig. 4.5. Mezcla en seco de caucho y escayola.....	95
Fig. 4.6. Pesaje de probetas.....	97
Fig. 4.7. Introducción de muestras en estufa para su secado.....	97
Fig. 4.8. Amasado manual de compuestos.....	101
Fig. 4.9. Amasadora planetaria.....	101
Fig. 4.10. Mesa de sacudidas y molde troncocónico.....	101
Fig. 4.11. Molde troncocónico relleno y enrasado.....	101
Fig. 4.12. Formación de galleta para medida de su diámetro.....	102
Fig. 4.13. Medida con calibre del diámetro de la galleta.....	102
Fig. 4.14. Medida de Dureza Shore C con durómetro.....	104
Fig. 4.15. Ensayo de flexión.....	105
Fig. 4.16. Ensayo de compresión.....	106
Fig. 4.17. Transmisión de calor por convección del paramento de un muro al interior del recinto que cierra el muro.....	109
Fig. 4.18. Ley de Fourier aplicada a un muro compuesto.....	111
Fig. 4.19. "Casa térmica" con termostato y termopar.....	113
Fig. 4.20. Termopar con dos sondas.....	113
Fig. 4.21. Ordenadores registrando temperaturas.....	114
Fig. 4.22. Interior casa térmica con muestra para ensayo y sensores de temperatura.....	115

Fig. 4.23. Fijación del extremo del termopar a centro de cara exterior.....	116
Fig. 4.24. Medición y obtención de gráficas.....	116
Fig. 4.25. Ejemplo de gráfica correspondiente a T ^a interior caja y cara interior placa (T1).....	117
Fig. 4.26. Ejemplo de gráfica correspondiente a T ^a superficie de contacto placa-poliestireno (T2) y cara exterior poliestireno (T3).....	117
Fig. 4.27. Distribución del ruido incidente.....	120
Fig. 4.28. Vía de transmisión del sonido entre dos recintos.....	121
Fig. 4.29. Aspecto interior caja diseñada para medida aislamiento acústico...	126
Fig. 4.30. Calibrador-emisor.....	127
Fig. 4.31. Sonómetro.....	128
Fig. 4.32. Colocación de sonómetro en el orificio de la caja para efectuar las mediciones. Cronómetro.....	130
Fig. 4.33. Campo directo y campo reverberante. Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido" elaborada por el Instituto Eduardo Torroja. IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.....	132
Fig. 4.34. Esquema de montaje de instrumento para medida del coeficiente de absorción acústica. Norma UNE-EN ISO 105342.....	136
Fig. 4.35. Tubo de kundt: instrumento para medida del coeficiente de absorción acústica.....	137
Fig. 4.36. Muestras utilizadas en los ensayos de medida de la absorción acústica.....	137
Fig. 4.37. Ejemplo medición del coeficiente de absorción acústica de una muestra de material.....	139
Fig. 4.38. Equipo ultrasonidos.....	141
Fig. 4.39. Calibrado de equipo de ultrasonidos.....	142
Fig. 4.40. Medición de muestra con equipo de ultrasonidos.....	142
Fig. 4.41. Extensómetro para medida de flecha.....	144

Fig. 4.42. Muestras sumergidas para obtención de peso saturado.....	149
Fig. 4.43. Ensayo de absorción por capilaridad.....	151
Fig. 4.44. Cantidad y movilidad de agua en función del tamaño de los poros.....	152
Fig. 4.45. Límites de medidas del tamaño de los poros con distintas técnicas porométricas.....	153
Fig. 5.1. Relación A/Y para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.	161
Fig. 5.2. Sección de probetas para los tres tamaños de grano.....	162
Fig. 5.3. Porcentaje disminución de peso húmedo a seco para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría	163
Fig. 5.4. Densidad en seco para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.....	167
Fig. 5.5. Densidad en seco. Valores porcentuales en relación a la serie de referencia	168
Fig. 5.6. Dureza Shore C para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría. Valor mínimo establecidos por normativa.....	169
Fig. 5.7. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.0-0.6 mm....	171
Fig. 5.8. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.5-2.5 mm....	172
Fig. 5.9. Dureza Shore C series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm....	173
Fig. 5.10. Resistencia a flexión series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola diferenciados por granulometrías.....	174
Fig. 5.11. Resistencia a flexión de las series correspondiente a los compuestos caucho-escayola. Comparativa por granulometrías y % caucho en peso y valor mínimo admisible establecido por normativa	175
Fig. 5.12. Resistencia a flexión de las series correspondientes a los compuestos caucho-escayola. Curvas de tendencia por granulometrías en función del % en peso del caucho.....	175
Fig. 5.13. Rotura a flexión muestra de referencia.....	177
Fig. 5.14. Rotura a flexión muestra C-30-2.5.....	177

Fig. 5.15. Rotura a flexión muestras C-50-0.6(a) y C-60-2.5 (b).....	177
Fig. 5.16. Rotura a flexión muestras C-50-4.0.....	178
Fig. 5.17. Resistencia a compresión series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola por granulometrías	181
Fig. 5.18. Resistencia a compresión de las series correspondiente a los compuestos caucho-escayola. Comparativa por granulometrías y % caucho en peso y valor mínimo admisible establecido por normativa	182
Fig. 5.19. Resistencia a compresión de las series correspondientes a los compuestos escayola-caucho. Curvas de tendencia por granulometrías en función del % de caucho en peso	183
Fig. 5.20. Rotura a compresión muestra de referencia	184
Fig. 5.21. Rotura a compresión muestras C-30-0.6 (a) y C-40-0.6 (b)	185
Fig. 5.22. Rotura a compresión muestras C-30-2.5 (a) y C-30-4.0 (b).....	185
Fig. 5.23. Rotura a compresión muestra C-40-2.5	186
Fig. 5.24. Rotura a compresión muestras C-50-0.6 (a), C-60-0.6 (b), C-50-2.5 (c) y C-60-2.5 (d)	187
Fig. 5.25. Ejemplo de tablas de temperaturas de los 30 minutos seleccionados y gráfica para una placa.	193
Fig. 5.26. Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en el interior de la caja.	194
Fig. 5.27. Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la cara interior de la placa.	195
Fig. 5.28. Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la superficie de contacto entre placa y poliestireno.	196
Fig. 5.29. Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la cara exterior de poliestireno	197
Fig. 5.30. Variaciones de temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el periodo seleccionado	198
Fig. 5.31. Conductividad térmica experimental series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola por granulometrías.....	200

Fig. 5.32. Comportamiento en serie del compuesto.	203
Fig. 5.33. Comportamiento en paralelo del compuesto..	205
Fig. 5.34. Conductividad térmica experimental, teórica en serie y teórica en paralelo.....	207
Fig. 5.35. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor	209
Fig. 5.36. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 3 cm de espesor.(a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor	210
Fig. 5.37. Aislamiento acústico bruto experimental y de acuerdo a ley de masas. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm y 3 cm de espesor. Colocamos la cara lisa de la placa hacia el emisor.....	214
Fig. 5.38. Aislamiento acústico bruto experimental y de acuerdo a ley de masas. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm y 3 cm de espesor. Colocamos la cara rugosa de la placa hacia el emisor.....	215
Fig. 5.39. Aislamiento a ruido de impacto. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor..	217
Fig. 5.40. Aislamiento a ruido de impacto. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 3 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor..	218
Fig. 5.41. Coeficiente de absorción acústica. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso. Muestras sin raspar.....	221
Fig. 5.42. Coeficiente de absorción acústica. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso. Muestras raspadas	222
Fig. 5.43. Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometría, en función de su porcentaje de adición.....	226
Fig. 5.44. Curvas de tendencia módulo de elasticidad elástico por granulometrías.....	226

Fig. 5.45. Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola caucho por granulometría, en relación a (a) su resistencia a compresión (b) su densidad aparente.....	226
Fig. 5.46. Curvas tensión-deformación en flexión para series de referencia y ecuaciones de tendencia lineal de compuestos escayola-caucho para granulometría (a) 0-0.6 mm, (b) 0.5-2.5 mm y (c) 2.5-4.0 mm.....	231
Fig. 5.47. Módulo de elasticidad estático a flexión de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.....	232
Fig. 5.48. Valores medios de densidad aparente de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías.....	239
Fig. 5.49. Valores medios de coeficiente de absorción de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías.....	239
Fig. 5.50. Valores medios de porosidad abierta de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías en relación a la adición de caucho en peso.....	240
Fig. 5.51. Valores medios de porosidad abierta de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías en relación a la proporción A/Y de cada serie.....	240
Fig. 5.52. Absorción por capilaridad series de referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos.	247
Fig. 5.53. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30,90,180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos.	247
Fig. 5.54. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos.	248

Indice

Fig. 5.55. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30,90,180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos	248
Fig. 5.56. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 4.0, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos.....	249
Fig. 5.57. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 4.0, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30,90,180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos	249
Fig. 5.58. Radio de poro referencia y diferentes granulometría para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de tamaño de poro frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.	254
Fig. 5.59. Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 0.0-0.6 mm y adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso	255
Fig. 5.60. Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 0.6-2.5 mm y adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso	256
Fig. 5.61. Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 2.5-4.0 mm y adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso	257
Fig. 5.62. Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y C-40-0.6 para grano fino, C-50-2.5 para grano medio y C-50-4.0 para grano grueso.....	258
Fig. 5.63. Micrografía SEM serie C-30-0.6 (x30 500 μm).....	260
Fig. 5.64. Micrografía SEM serie C-30-2.5. (a) x100. (b) x500. (c) x1000. (d) x2500.....	261

Fig. 5.65. Micrografías SEM serie C-30-4.0. (a) Zona 1: Escayola. x1000. (b) Zona 2: Interfase escayola-caucho. x1000.....	262
Fig. 5.66. Individualización cristales y poros de las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0 (a) Zona 1. (b) Zona 2. (c) Zona 3.....	263
Fig. 5.67. Distribución normal de las superficies de cristales para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0.....	266
Fig. 5.68. Distribución normal de los coeficientes de forma de los cristales para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0.....	266
Fig. 5.69. Distribución normal de las superficies de poros para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0.....	267

1. INTRODUCCIÓN

La eliminación de residuos ha constituido un problema a lo largo del tiempo, que en las últimas décadas ha ido en aumento debido tanto a su toxicidad como al incremento en la cantidad generada.

Entre los residuos de difícil eliminación y con un volumen creciente con el tiempo, se encuentran los neumáticos fuera de uso (NFU), que debido a su alto poder calorífico, difícil compactación y facilidad, por su forma, para acumular gases y lixiviados no hacen recomendable su depósito en vertedero. Si añadimos que no son degradables y son resistentes al ozono, la luz y las bacterias se entiende que sea un residuo catalogado por la UE como residuo tóxico y peligroso (Lista Europea de Residuos. Código: 16.01.03).

A raíz de este problema han surgido diversas normativas para su gestión, fomentando, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y valorización energética. Surgieron en primer lugar a nivel de la Unión Europea, posteriormente a nivel nacional y, por último, en diversas Comunidades Autónomas también se han desarrollado normas específicas

Se ha observado un importante incremento de las publicaciones sobre temas de reciclado en general y del reciclado de neumáticos fuera de uso en particular. Tanto a nivel nacional como internacional se ha podido constatar el interés de las

CAPÍTULO 1: Introducción

investigaciones en este ámbito a través de la creación de grupos de investigación en diferentes universidades e institutos de investigación.

Así mismo, dentro del sector, han surgido un gran número de empresas interesadas en el reciclado de materiales y en el estudio de sus aplicaciones. Como consecuencia, se han desarrollado diversos procedimientos para el reciclado de neumáticos, que dan lugar a diferentes productos, pero debido a la complejidad y alto coste de los mismos se recicla un porcentaje muy pequeño. Se pone así de manifiesto la necesidad de estudiar y proponer nuevas aplicaciones que hagan rentable su reciclado.

Por otro lado, en el acondicionamiento térmico y acústico de interiores, hay que recurrir al uso de materiales aislantes y/o absorbentes que impidan la transmisión de frío o calor desde el exterior y que disminuyan y amortigüen el nivel de presión sonora de las fuentes emisoras a valores aceptables. Resulta interesante, por tanto, investigar las posibilidades de desarrollo de nuevos materiales que, manteniendo sus propiedades mecánicas dentro de los márgenes establecidos por la normativa vigente, constituyan soluciones innovadoras en el campo de la mejora del acondicionamiento térmico y acústico.

Teniendo en cuenta la necesidad de aumentar las posibles aplicaciones de los materiales reciclados y la de creación de nuevos materiales con propiedades que mejoren la habitabilidad, se propone el presente trabajo con el objetivo de contribuir en ambos aspectos, en concreto mediante la utilización del caucho NFU como producto granulado y en polvo para la elaboración de un nuevo material, aprovechando sus propiedades elásticas, de baja densidad y estabilidad química. El inconveniente más importante de los NFU se encuentra en su comportamiento frente al fuego: alto poder calorífico y generación de gases nocivos durante la combustión.

Aunque se analizó la posibilidad de utilizar otro conglomerante, valorando sus ventajas e inconvenientes, finalmente se eligió el yeso por diversos motivos. En primer lugar por tratarse de un material económico debido a su abundancia en España y bajo coste de fabricación, que han hecho que sea un material muy empleado en construcción para muy diversas aplicaciones.

Debido a sus propiedades es un material idóneo para la construcción. Es de fácil trabajabilidad, muy moldeable, de fraguado rápido y con alta resistencia inicial. Una vez endurecido presenta una resistencia mecánica y una dureza superficial apropiadas

para sus usos, teniendo en cuenta que en ningún caso se utiliza como elemento estructural y es suficiente para soportar los esfuerzos propios de las particiones. Entre sus ventajas también se encuentran su buen comportamiento para el acondicionamiento térmico, higrotérmico, acústico y lumínico y la buena protección frente al fuego. Entre sus inconvenientes podemos citar su fragilidad y su mal comportamiento frente al agua.

Se trata también de hacer una aportación a la industria del yeso que durante los últimos años ha buscado nuevas aplicaciones dentro del proceso constructivo y la mejora de algunas propiedades mediante aditivos y agregados. Podemos incluir este trabajo en esta línea de mejora de propiedades mediante la adición de cargas de caucho NFU.

1.1 EL YESO

El yeso es un material de construcción cuya materia prima es una roca sedimentaria de precipitación química llamada aljez o piedra de yeso (Fig 1.1).

La palabra yeso se utiliza, en español, tanto para designar la piedra natural como el producto en polvo obtenido por calcinación y molienda de esta piedra.

La piedra natural, está compuesta químicamente por sulfato de calcio cristalizado con agua, sulfato de calcio con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), denominado **sulfato de calcio dihidrato**. Su origen geológico está en la desecación, por evaporación, de lagos salados o mares interiores poco profundos, dando lugar a una piedra sedimentaria, que forma parte de las evaporitas.

Fig 1.1.
Piedra de yeso.

CAPÍTULO 1: Introducción

Podemos encontrarlo en la naturaleza en distintos estados de cristalización: **selenita**, monocristales hexagonales transparentes; **punta de flecha o rosas del desierto**, maclas; **alabastro**, formaciones policristalinas, variedad muy pura, masiva y compacta; **espato satinado**, fibroso, etc.

Otras formas de sulfato cálcico que también se dan de forma natural son:

- El sulfato cálcico anhidro con el nombre de **anhidrita** natural o **karstenita**. Es compacta, sacaroidea, parecida al alabastro y de color blanco o ligeros tonos grises, rojos o azules.
- El sulfato cálcico semihidrato con el nombre de basanita. Muy raro por ser muy inestable.

Entre sus propiedades están su baja dureza superficial ($H=2$, en la escala Mohs), su bajo peso específico, $2,32 \text{ g/cm}^3$ y su exfoliabilidad. Mecánicamente es algo flexible aunque tiene un periodo elástico pequeño. Es soluble en ácido clorhídrico y en agua caliente ($2,05 \text{ g/l}$ a 20°C). Funde con facilidad y se hace opaco por la pérdida del agua interlaminar. Tiene una microestructura cristalina monoclinica laminar en la que se alternan capas de sulfato cálcico y capas de agua (Mottana, Crespi y Liborio, 1991).

Al producto en polvo obtenido por calcinación y molienda del aljez, le llamamos yeso de construcción (que una vez mezclado con agua, en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en el aire). La temperatura que requiere para su fabricación está entre 200°C para el semihidrato y entre 400 y 700°C para las anhidritas. El proceso de obtención no requiere tanta energía como el de otros materiales, resultando por tanto más barato.

CLASE	Contenido mínimo de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
I Extra	95
I	90
II	80
III	70
IV	60

Tabla 1.1.
Clases de piedra de yeso, de acuerdo con su proporción en Sulfato Cálcico. (UNE 102-001-86)

CLASE	Tamaño de piedra comprendida entre: (mm)
1	0 y 20
2	20 y 50
3	50 y 150
4	0 y 150
5	00 y 300

Tabla 1.2.
Tipos de aljez, de acuerdo con su tamaño. (UNE 102-001-86)

El bajo costo de su fabricación, unido a que el aljez es un material muy abundante en España y de gran calidad (en España muchas canteras por encima del 90% de pureza) hace que sea un material muy utilizado (Villanueva y García, 2001).

Aunque se emplea principalmente en construcción en diversas formas, los usos son muy variados: en agricultura, para modificar suelos; en la industria del papel y la pintura (blanco mineral); en odontología y procesos quirúrgicos; para reproducción de figuras por moldes, etc.

En construcción, el sector en España, tiene una asociación técnica y empresarial ATEDY, miembro de la europea Eurogypsum. La Norma hace referencia a la piedra natural, UNE 102-001-86 "Aljez o piedra de yeso: Clasificación características", distinguiendo cinco clases de piedra de yeso de acuerdo con su proporción en sulfato cálcico (Tabla 1.1) y cinco tipos en función de su granulometría (Tabla 1.2).

1.1.1 Proceso de transformación del yeso

Incluimos en este apartado en primer lugar el proceso de deshidratación mediante el cual la piedra natural se transforma en el producto de construcción, y a continuación el proceso contrario, por el cual el producto cocido y en polvo se transforma en una material de aplicación para la fabricación de elementos constructivos.

1.1.1.1 El proceso de deshidratación. Fases del sistema sulfato cálcico-agua.

En el proceso de deshidratación del yeso influyen numerosos factores. Por una parte hay un grupo de variables propias de la naturaleza del material (factores internos), que se pueden dividir en tres bloques: factores estructurales, texturales (tamaño, distribución granulométrica, morfología, defectos superficiales de los cristales y existencia de maclas) y composicionales (impurezas), y por otra parte factores ambientales (externos), fundamentalmente: temperatura, presión, presión de vapor de agua y velocidad de calentamiento.

Para estudiar el proceso de deshidratación, los científicos, a su vez, han seguido tres vías: la determinación de las estructuras cristalinas de los productos formados a distintas temperaturas, la observación microscópica de la deshidratación, y la medida

CAPÍTULO 1: Introducción

de las tasas de transformación, de unas fases en otras. Todos estos estudios se han realizado variando las condiciones del material (factores internos) y las condiciones ambientales del sistema (factores externos), dando lugar a una abundante literatura sobre el tema, que hacen referencia a diferentes modelos para explicar el proceso de deshidratación.

1.1.1.2 Fases del sistema sulfato cálcico-agua

Se conoce como sistema sulfato cálcico-agua al conjunto de compuestos químicos procedentes de la deshidratación del yeso.

El **sulfato de calcio dihidrato** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), está formado por dos moléculas de agua, de las cuales, $1\frac{1}{2}$ se encuentran débilmente unidas al sulfato de calcio, mientras que $\frac{1}{2}$ de molécula restante se encuentra fuertemente unida.

Al someter el aljez a un proceso térmico, dependiendo de la temperatura, se deshidrata parcial o totalmente obteniéndose el **yeso de construcción** formado fundamentalmente por sulfato de calcio semihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) y anhidritas formadas fundamentalmente por sulfato de calcio anhidro (CaSO_4).

Fig 1.2.

Diagrama de fases en función contenido de agua combinada y la temperatura.

Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso
"Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid

Los productos que se obtienen por deshidratación parcial o total del sulfato cálcico, se denominan fases. Villanueva et al los resumen de manera muy acertada en una tabla con sus características e incluye diagrama de fases en función de la presión y temperatura, en función del agua combinada y la temperatura (fig. 1.2.), y la solubilidad en agua de las diferentes fases en función de la temperatura.

El **Dihidrato o DH** es el material inicial, antes de la deshidratación y el producto final después de la rehidratación. El producto así obtenido es química y estructuralmente igual al inicial, pero algunos autores lo designan como "Rehidrato" (RH), para caracterizar sus diferencias morfológicas de porosidad y densidad, con respecto al DH.

Su fórmula química es la misma ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tiene una microestructura cristalina monoclinica laminar en la que se alternan capas de sulfato cálcico y capas de agua.

Al deshidratarse ligeramente por encima de los 100°C , el sulfato cálcico dihidrato se produce el **Semihidrato (SH)** por rotura de los enlaces más débiles del puente de hidrógeno, obteniéndose dos formas α y β , con la misma composición química y el mismo sistema cristalino romboédrico, pero con características físicas y microestructurales diferentes.

La forma $\text{SH}\alpha$ del Semihidrato se produce bajo presión en autoclave y sus cristales son compactos. Constituye industrialmente los denominados yesos alfa, caracterizados por necesitar muy bajo factor de agua en el amasado (0,3-0,4) y producir rehidratos muy compactos, duros y resistentes.

La forma $\text{SH}\beta$ del Semihidrato se produce en atmósfera normal (marmita) y sus formaciones cristalinas están muy fragmentadas y holgadas. En estado puro constituye la **escayola**, caracterizada por tener un factor agua/yeso de amasado más elevado (0,8) y dar rehidratos más porosos que los α . También puede darse en mezcla con otras fases, en lo que industrialmente se llama yeso multifase o yeso de construcción.

La **Anhidrita III o AnIII** se obtiene por deshidratación total (del dihidrato o del semihidrato) entre 110°C y 290°C . Cristaliza en el sistema hexagonal. Es muy inestable transformándose fácilmente en SH incluso con la humedad ambiente (gran

CAPÍTULO 1: Introducción

avidez de agua). Hay dos formas α y β en función del semihidrato del que provienen. La AnIII β se encuentra en las escayolas junto al SH β y en los yesos de construcción junto con el SH β y la AnII.

La Anhidrita II o AnII (la anhidrita natural pertenece a esta variedad). Se obtiene entre 300°C y 1180°C mediante reacción exotérmica. Cristaliza en el sistema rómbico. Es más estable que la AnIII, incluso algunas variedades necesitan activadores de fraguado para que se produzca la rehidratación. La variedad AnIIi retarda el fraguado y se utiliza mezclada con otras fases (SH β , AnIII) en el yeso multifase o yeso de construcción y la AnIIp es una variedad denominada yeso de pavimentos porque se utiliza como base de solera para pavimentos, sobre todo en Alemania.

Según estudios alemanes hay 3 variedades: AnIIi (difícilmente soluble y producida entre 300°C y 500°C), AnIIi (insoluble y producida entre 500°C y 700°C) y la AnIIp (yeso de pavimentos y producida a temperaturas por encima de los 700°C).

Por encima de los 1180°C se obtiene **la anhidrita I (AnI)**, que no tiene ningún uso industrial, y por encima de los 1400°C se descompone en óxido de cal y anhídrido sulfúrico.

Cuando el mineral contiene impurezas arcillosas o mediante mezclas artificiales se puede obtener yeso hidráulico, capaz de fraguar en agua.

1.1.1.3 El proceso de hidratación: fraguado del yeso

El yeso cocido en polvo se amasa con agua para ser aplicado en obra, dando lugar a una pasta con una viscosidad adecuada al tipo de trabajo que se ha de realizar. Al tratarse de un producto deshidratado formado por fases reactivas al agua se produce un fenómeno de rehidratación, conocido como fraguado, que provoca el endurecimiento de la pasta. El inicio de la reacción de rehidratación, se llama principio de fraguado y su conclusión, final de fraguado.

El estudio experimental y teórico del fraguado del yeso ha sido una constante en la investigación tecnológica de este material. La base del comportamiento mecánico del yeso fraguado se encuentra en las zonas de unión entre los cristales de yeso

rehidratados. El tamaño, la forma y la distribución granulométrica de los cristales tienen una gran incidencia en las propiedades mecánicas de la pasta.

Estas relaciones entre la morfología cristalina y las propiedades mecánicas han sido estudiadas por varios autores. A partir de un encargo de RILEM⁴⁹ en los años 70 el grupo de Murat comenzó a trabajar empleando la microscopía electrónica de barrido (Jeandot, y Murat, 1971) (Murat, Pusztaszeri y Gremion, 1974) y sentaron las bases para posteriores trabajos como los de Caspar et al (1996) y de Jeulin, Monnaie y Péronnet (2001).

Todos los autores citados concluyen que existen dos tipos de factores que influyen en los cambios morfológicos: una serie de factores internos al proceso, y por otra parte factores externos, como son la presencia de esfuerzos mecánicos, los cambios ambientales durante el fraguado y los efectos de adsorción, humidificación y secado.

1.1.2 El yeso de construcción.

Como decíamos anteriormente se denomina yeso de construcción al producto en polvo obtenido por calcinación y molienda del aljez. Al producto en estado plástico formado por la mezcla de yeso y agua se le denomina pasta de yeso y una vez endurecido **yeso**. Si le añadimos arena u otro tipo de carga, **mortero de yeso** (La denominación escayola se emplea para yeso semihidratado de especial pureza, blancura y finura).

La norma UNE EN 13279-1 define el yeso de construcción: *"Conglomerante a base de yeso con un mínimo de un 50% de sulfato de calcio como componente activo principal, y con un contenido en cal (hidróxido de calcio) inferior al 5%"*.

Se incluye en este apartado las formas de fabricación del yeso y los diferentes productos en polvo que se obtienen comercialmente, su clasificación en función de las principales aplicaciones de acuerdo a la norma UNE EN 13279-1:08 y los aditivos y adiciones más comúnmente empleados para modificar y mejorar las propiedades de los yesos y morteros de yeso, tanto durante el proceso de elaboración como en el producto final.

CAPÍTULO 1: Introducción

En el caso de las adiciones sólo se hace referencia a las que se introducen en mayor medida en los productos comerciales, tratándose el resto en un apartado diferente.

1.1.2.1 Fabricación del yeso

La piedra de yeso o aljez se extrae de canteras a cielo abierto o de canteras subterráneas. Después se tritura utilizando maquinaria apropiada: machacadoras de mandíbulas, molinos de rodillos, etc. El tamaño del grano dependerá del sistema de cocción a emplear, generalmente en torno a los 2 cm. A continuación se procede a su cocción, y deshidratación, y posteriormente a su molienda.

Antiguamente los yesos se fabricaban en los llamados hornos morunos, denominándose los productos obtenidos yesos tradicionales o artesanos. Se elaboraba así el yeso blanco de granulometría fina y el yeso negro de granulometría gruesa.

A partir de los años 50 y 60 se modificó esta forma de fabricación comenzándose a utilizar sistemas industrializados, mediante hornos mecánicos en instalaciones fijas. Los yesos obtenidos por este procedimiento se denominan yesos industriales o de segunda generación, y tienen características más uniformes. De este tipo distinguimos los yesos de construcción (bifase) que pueden ser gruesos o finos y la escayola (monofase).

A finales de los 60 y 70 se empiezan a fabricar los denominados yesos de tercera generación caracterizados por su granulometría y el empleo de agregados y aditivos para mejorar sus propiedades como el fraguado, dureza y peso. Comienzan así a utilizarse además de los yesos manuales, los de proyección mecánica y los prefabricados. Entre ellos podemos encontrar: yeso controlado de construcción (fino y grueso), yesos finos especiales, yesos controlados aligerados, yesos de alta dureza superficial, yesos de proyección mecánica (aligerados o no), yesos-cola y adhesivos.

Para la fabricación del yeso de construcción se utiliza piedra de yeso con una pureza superior al 75%. En España se fabrica en hornos de dos tubos y tres tubos. Después del silo de reposo sufren una molturación para obtener la granulometría deseada. Antes del ensacado se pueden añadir aditivos (modificadores de fraguado, retenedores de agua, etc) y adiciones (perlita, etc.)

Para la fabricación de la escayola se utiliza una piedra de yeso muy pura, por encima del 90%. En España se fabrica con varios sistemas: con fuego directo y carga intermitente, con fuego directo y carga continua y en hornos verticales estáticos con cámara de combustión en su interior y salida de gases calientes en contra corriente con el crudo. Como en el yeso, se puede moler si la granulometría lo requiere y se le pueden agregar aditivos y adiciones.

Los yesos prefabricados (YP) se utilizan en la fabricación de bloques o paneles para tabiques. Se fabrican en hornos rotatorios con piedras de yeso de muy alta pureza.

Todos los yesos anteriores son SH β . El yeso α , se utiliza principalmente en la industria cerámica para hacer moldes.

1.1.2.2 Productos en polvo

Los yesos de construcción y los conglomerantes a base de yeso para la construcción, se clasifican según lo especificado en la norma UNE EN 13279-1:08, de acuerdo al siguiente esquema (Tabla 1.3):

Tabla 1.3.

Familia de los yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción (UNE 13279-1:08)

CAPÍTULO 1: Introducción

En esa misma norma UNE EN 13279-1:08 se define el modo de designación de los yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción de acuerdo a la tabla 1.4.

La Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY) ha elaborado una tabla (tabla 1.5) en la que se establece la correspondencia entre la denominación actual de acuerdo a la norma europea armonizada UNE EN 13279-1:08 vigente y la anterior según las normas UNE anuladas y el RY-85 derogado, porque una parte de la industria yesera española, mantiene esta designación.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso, por ejemplo:	A
- para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos);	A1
- para su empleo directo en la obra;	A2
- para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas de escayola para techos).	A3
Yesos para la construcción:	B
- yeso de construcción;	B1
- mortero de yeso;	B2
- mortero de yeso y cal;	B3
- yeso de construcción aligerado;	B4
- mortero de yeso aligerado;	B5
- mortero de yeso y cal aligerado;	B6
- yeso de construcción de alta dureza;	B7
Yeso para aplicaciones especiales:	C
- yeso para trabajos con staff;	C1
- yeso para morteros de agarre;	C2
- yeso acústico;	C3
- yeso con propiedades de aislamiento térmico;	C4
- yeso para protección contra el fuego;	C5
- yeso para aplicación en capa fina, producto de acabado;	C6
- producto de acabado;	C7

Tabla 1.4.

Designación de los tipos de yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción.

ATEDY, incluye las siguientes definiciones para cada tipo de yeso en las diferentes nomenclaturas:

- A: Conglomerantes a base de yeso. Escayolas: E30, E30/L, E/35, E35/L (esta denominación permanece vigente según la norma UNE 102-011.86), yeso de prefabricados YP.

Las escayolas son conglomerantes a base de yeso, constituidos fundamentalmente por sulfato de calcio semihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), de origen natural, que puede llevar incorporados aditivos reguladores de fraguado. Sus valores de pureza, granulometría y resistencia a flexión que se indican en la norma UNE: EN 13279-1:08. El tiempo de inicio de fraguado está definido por el fabricante y es superior en los tipo "L". Se utilizan fundamentalmente en la ejecución de elementos prefabricados para techos y tabiques.

DENOMINACIÓN ANTERIOR (UNE 102-010 y 102-011 y RY-85)	DENOMINACIÓN ACTUAL (UNE EN 13279-1)
YG, YG/L, YPM	B1
YF, YF/L	C6
YP	A
E30, E30/L, E35, E35/L	A
YA, YPM/A	B4
YD, YPM/D	B7
YE/T	C6

Tabla 1.5.

Correspondencia entre las denominaciones anteriores y las actuales de los tipos de yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción

- B1: Yeso de construcción. Yesos para la construcción: YG, YG/L, YPM.

Es un conglomerante a base de yeso con un mínimo de un 50% de sulfato de calcio como componente activo principal y con un contenido en cal inferior al 5 % que puede llevar aditivos y/o agregados, y está caracterizado por los valores de pureza, granulometría y resistencia a flexión que se indican en la Tabla 3 de la norma UNE: EN 13279-1:08. Su inicio de fraguado está definido por el fabricante.

El yeso grueso de construcción (YG) se suele utilizar como pasta de agarre en la ejecución de tabiques, revestimientos interiores y como conglomerante auxiliar de obra

CAPÍTULO 1: Introducción

y se aplica de forma manual. El de proyección mecánica (YPM) está especialmente formulado para que, mezclado con agua se consiga la consistencia adecuada para su aplicación mediante una máquina de proyección mecánica. Su utilización suele ser para la ejecución de revestimientos interiores.

- B4: Yeso de construcción aligerado. Yesos de construcción aligerados: YA e YPM/A.

Es un conglomerante a base de yeso, con un mínimo de un 50 % de sulfato de calcio como componente principal y con un contenido en cal inferior al 5 %, que puede contener aditivos y agregados ligeros inorgánicos (como perlita expandida o vermiculita) u orgánicos

El yeso Aligerado (YA) es de aplicación manual. Su tiempo de inicio de fraguado será definido por el fabricante siendo siempre superior a 20 min. Se considera SUBTIPO, cada yeso aligerado de aplicación manual cuyo tiempo de fraguado, sea superior a 50 minutos, denominándose "Yeso Aligerado Manual Aligerado Retardado".

El yeso aligerado de proyección (YPM/A) es de aplicación mediante máquina de proyectar. Su tiempo de inicio de fraguado será definido por el fabricante siendo siempre superior a 50 min.

- C6: Yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado. Yesos de terminación: YE/T, YF, YFL.

El yeso de terminación (YE/T) es un conglomerante a base de yeso, con un mínimo de un 50 % de sulfato de calcio como componente principal y con un contenido en cal inferior al 5 %, que puede contener aditivos y agregados orgánicos. Está especialmente fabricado para su aplicación manual en capa fina de forma inmediata tras su amasado; a efectos de este reglamento los espesores de aplicación serán de 0.1 mm a 3.0 mm. Su tiempo de inicio de fraguado será definido por el fabricante siendo siempre superior a 50 min.

El yeso fino de construcción (YF) 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 que se indican en la Tabla 4 de la norma UNE:EN 13279-1:08. Su utilización suele ser para la ejecución de

enlucidos, refilos o blanqueos sobre revestimientos interiores y se aplica de forma manual. Su tiempo de inicio de fraguado será definido por el fabricante.

- B7: Yeso de construcción de alta dureza. Yeso de construcción de alta dureza YD, YPM/D.

Es un conglomerante a base de yeso, con un mínimo de un 50 % de sulfato de calcio como componente principal y con un contenido en cal inferior al 5 %, que puede contener aditivos y agregados orgánicos o inorgánicos para conseguir mejores prestaciones de dureza.

El de alta dureza manual (YD) tiene un tiempo de inicio de fraguado definido por el fabricante siendo siempre superior a 20 min. Se considera SUBTIPO, cada yeso de alta dureza de aplicación manual cuyo tiempo de fraguado, sea superior a 50 minutos, denominándose "Yeso manual de alta dureza Retardado."

El de alta dureza de proyección (YPM/D) es de aplicación mediante máquina de proyectar. Su tiempo de inicio de fraguado está definido por el fabricante siendo siempre superior a 50 min.

1.1.2.3 Aditivos

Son aditivos los productos que forman parte de la composición final del producto en pequeños porcentajes con el fin de modificar o añadir alguna propiedad. Podemos distinguir entre: retardadores de fraguado, aceleradores de fraguado, espesantes y retenedores de agua, fluidificantes e impermeabilizantes.

Entre los *retardadores de fraguado* podemos distinguir tres grupos:

1. Productos de elevado peso molecular que actúan como coloides y retrasan la formación de cristales: colas animales, caseína, pepsina, albúmina, gelatina, proteínas hidrolizadas, etc. La mayoría de ellas son también espesantes.

2. Productos que disminuyen la solubilidad del SH en agua. Se igualan las solubilidades y disminuye la velocidad de reacción. Los que se utilizan con mayor frecuencia son: Alcohol etílico, ácido cítrico, ácido acético, ácido fosfórico, ácido bórico, ácido láctico y sus sales, acetona y carbonato sódico.

CAPÍTULO 1: Introducción

3. Productos que modifican la estructura cristalina del DH: acetato de calcio, carbonato de calcio y de magnesio.

Entre los *aceleradores de fraguado* podemos distinguir dos grupos:

1. Los que actúan como gérmenes durante la cristalización, suprimiendo la primera fase del fraguado. El más utilizado es el yeso crudo DH.

2. Los que disminuyen la solubilidad del DH o aumentan la del SH, con lo que aumentan la diferencia de solubilidad y aceleran la reacción de fraguado. Entre ellos están: Sulfatos, excepto el de hierro, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico, cloruros, bromuros y ioduros alcalinos.

Puede darse el caso de yesos que con el fin de aumentar el tiempo de utilización de la pasta contienen aditivos retardadores, para alargar el tiempo de terminación del fraguado, y aceleradores o espesantes, para que lleguen antes al estado plástico.

Los *espesantes* aumentan la consistencia de la pasta y permiten adelantar el comienzo del empleo del yeso. Se utilizan también en los yesos de proyectar. Un espesante muy conocido es el almidón.

Algunos *espesantes* son también *retenedores de agua*. Evitan la evaporación del agua o su absorción por el soporte, reteniendo el agua en la pasta y permitiendo así la hidratación del yeso hasta el final del fraguado. Es especialmente interesante cuando aplicamos el yeso en soportes muy absorbentes. Los más utilizados son los plásticos celulósicos, como la metilcelulosa, la carboimetilcelulosa, la hidroxietilcelulosa, etc.

Los *fluidificantes* permiten reducir la cantidad de agua de amasado. Como el yeso para su rehidratación requiere menor cantidad de agua que la de amasado, la cantidad sobrante se evapora resultando un producto poroso y disminuyendo la densidad, la dureza y la resistencia del producto fraguado. Mediante el uso de fluidificantes se consiguen por tanto productos más compactos, densos y resistentes. Los fluidificantes utilizados en el hormigón de cemento se pueden utilizar en los yesos. El carbonato cálcico en pequeña cantidad modifica el pH de la pasta y tiene un cierto efecto fluidificante.

Los *impermeabilizantes* obturan los poros produciendo una cierta impermeabilidad al paso del agua líquida. Suelen utilizarse como tales derivados de las siliconas.

1.1.2.4 Agregados o adiciones

Se pueden añadir, en mayor proporción que los aditivos, diferentes cargas que modifican las características de los yesos. Las cargas pueden ser de muy diferentes formas, tipos y origen como se verá en el apartado de "estado de la cuestión", pero las más utilizadas actualmente en productos industriales son la perlita y la vermiculita, áridos ligeros, que incluyen en la pasta un volumen controlado de aire ocluido, que incide en un mejor aislamiento térmico del yeso fraguado.

La *perlita expandida* es un mineral volcánico de tipo riolita con una estructura de pequeñas esferas formadas por escamas sucesivas con agua y aire ocluido. Expandido en autoclave a altas temperaturas de modo que pierda el agua combinada, queda un árido ligero formado por innumerables microceldillas cerradas con aire ocluido, cuyo volumen representa hasta veinte veces el original. Hay diversos tipos en cuanto a diámetro y densidad. De color blanco, es muy compatible con yeso y escayolas.

La *vermiculita exfoliada* es un mineral de tipo arcilloso con una microestructura laminar capaz de exfoliarse con la elevación de la temperatura para producir una especie de gusanos de color amarillo grisáceo con aire ocluido en su interior. Además del efecto de aligerar y mejorar el aislamiento térmico tiene un cierto efecto de retenedor de agua.

En esta investigación se estudia el efecto del uso del caucho NFU como carga añadida en la modificación de sus propiedades.

1.1.3 Propiedades del yeso

Las múltiples propiedades del yeso hacen que sea un material idóneo para la construcción. Es un material económico, de fácil trabajabilidad, con buen comportamiento para el acondicionamiento térmico, higrotérmico, acústico y lumínico, buen protector contra el fuego y de larga duración (Villanueva y García, 2001.)

En los siguientes apartados se revisan, siguiendo a Villanueva et al, sus propiedades en tres estados diferentes: en polvo, como pasta y una vez fraguado y endurecido.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1.3.1 Características de los productos en polvo

Se caracterizan fundamentalmente por tres aspectos: por su composición química, contenido en las diferentes fases del sistema sulfato cálcico-agua y su finura de molido. Además por los aditivos y adiciones que se le agreguen (mediante los aditivos y adiciones podemos modificar alguna de sus características).

Para analizar su **composición química** se utilizan los medios descritos en la norma UNE 102-032.

Los resultados del análisis químico de yesos y escayolas de acuerdo a esta norma se expresan todos ellos en % en masa y se refieren a : Contenido de agua combinada (H_2O), de trióxido de azufre (SO_3), de trióxido de carbono (CO_2), de dióxido de silicio y materia insoluble ($SiO_2 + Ri$), de óxidos de aluminio y hierro ($Al_2O_3 + Fe_2O_3$), de óxido de calcio (CaO), de óxido de magnesio (MgO) y de cloruro de sodio ($NaCl$). Siendo la suma de todos los porcentajes en masa un total estimativo del 100%.

Por otro lado se expresa como % en masa el contenido en sulfatos solubles en agua (SO_3), el de agua libre referido a la muestra inicial (H_2O) y el de agua libre referido a la muestra desecada (H_2O).

A partir de los resultados de contenido de agua combinada (H_2O) y de trióxido de azufre (SO_3) podemos calcular el **índice de pureza** que da una idea de la calidad de la piedra de partida y por tanto de la calidad del producto final, de sus características y sus propiedades.

Si las impurezas se mantienen dentro de determinados límites pueden mejorar algunos aspectos, así las de tipo arcilloso mejorar la manejabilidad durante la aplicación del producto, las de caliza o aragonito son fluidificantes y las de sílice aumentan la dureza superficial y la resistencia del producto fraguado.

La norma UNE 102.033 describe la realización del *análisis de fases* para determinar la cantidad de cada una de ellas en una muestra de producto. Aunque se puede hacer por otros métodos diferentes a los descritos como es mediante análisis térmico diferencial y para diferenciar SH_α y SH_β también se puede hacer por microscopía electrónica.

La finura de molido es la característica física más importante de los productos en polvo, dependiendo del tipo de molido utilizado. Se determina de acuerdo con la norma UNE 102.031. Básicamente se pasa la muestra desecada previamente por una serie de tamices (0.8, 0.4, 0.2 y 0.1 de abertura de malla), expresándose en porcentaje sobre el total de la muestra la retención total o rechazo de cada tamiz.

La finura de molido es un dato establecido por las normas de calidad para cada producto.

1.1.3.2 Características de las pastas

La característica más importante es su excelente **trabajabilidad** tanto para su puesta en obra como para la elaboración de productos prefabricados, Esta característica viene determinada por diversos aspectos entre los que se encuentran: el fraguado rápido (y regulable), la adaptabilidad al molde, la adherencia, la rápida adquisición de resistencia inicial, etc.

En estado plástico tienen una elevada **capacidad de adaptarse a cualquier molde** adoptando la forma de este, pudiéndosele dar forma a voluntad. Esta característica lo hace idóneo para elementos prefabricados tan variados como paneles para elementos divisorios, molduras decorativas, bovedillas para forjados, etc. También permite su adaptación a diferentes paramentos (guarnecidos y enlucidos) a los que se puede dar diferentes acabados superficiales.

Por este motivo el yeso se adhiere fácilmente a otros materiales al introducirse por las oquedades y poros de éstos, cuando todavía está en estado fluido, cristalizando en su interior y formando un conjunto íntimamente ligado. Lógicamente, cuanto más rugosa sea la superficie mayor es la adherencia. Esta propiedad mejora con la adición de resinas sintéticas.

Esta propiedad de **adherencia** ha permitido que se pueda introducir en la masa del yeso elementos como cañizos, fibras de vidrio, etc., formando un conjunto trabado que mejora algunas características del producto especialmente la resistencia a flexotracción.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1.3.2.1 Fraguado del yeso

El yeso es un material de fraguado rápido. La pasta de yeso pasa por tres fases sucesivas, en una primera fase se produce la disolución de las partículas de yeso en el agua, aumentando progresivamente su viscosidad. El principio de fraguado es el momento en que la pasta pasa de estado líquido a estado plástico y el final de fraguado el momento en el que pasa de estado plástico a sólido. Durante este proceso se produce una elevación de la temperatura, aumento de la resistencia a la penetración de una aguja o una sonda, expansión dimensional, etc. (fig. 1.3) Todos estos parámetros permiten medir el estado de fraguado. En estado sólido sigue aumentando la resistencia y la dureza superficial a medida que se seca.

Fig 1.3.

Medida del proceso de fraguado por diversos indicadores físicos.

Villanueva Dominguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid

Químicamente durante el proceso de fraguado se produce una reacción de hidratación de las fases anhidras y semihidratadas del sulfato cálcico, que se disuelven en el agua y reaccionan con ella para transformarse en sulfato cálcico doblehidrato. La reacción se produce con aumento de calor, de unos 20°C para un

SH β . Físicamente se produce una cristalización y solidificación del doble hidrato, que va acompañada de un aumento de volumen, tanto mayor cuanto más lenta es la velocidad de hidratación.

El **tiempo de fraguado** es regulable en dos momentos. En primer lugar en el proceso de fabricación, dependiendo de las diversas proporciones que el producto tenga de las distintas fases de deshidratación del sistema sulfato cálcico-agua. También en fábrica se puede regular el fraguado, mediante la adición de reguladores, ya sean aceleradores o retardadores. En segundo lugar durante la puesta en obra modificando la cantidad de agua de amasado, a mayores valores en la relación agua/yeso, corresponde un tiempo de fraguado más prologando. También influyen durante la puesta en obra factores como la temperatura del agua, la rapidez del amasado, etc.

Hay diferentes métodos para medir el fraguado, pudiéndose obtener curvas de elevación de temperatura, de aumento de la resistencia a penetración de una aguja o una sonda, de expansión dimensional o de aumento de la resistencia eléctrica (fig 1.3). El progresivo aumento de la solidificación durante el fraguado puede medirse mediante la dureza superficial.

En la norma UNE 102.031, entre otras, se especifica la forma de calcular el **agua necesaria para el amasado** condicionada por el tipo de producto y su granulometría. Se dan dos sistemas para calcularlo: mediante el amasado a saturación o a través del agua correspondiente a una consistencia normal.

PRODUCTOS TRADICIONALES	Agua/yeso de amasado a saturación
Yeso de construcción grueso	0,6
Yeso de construcción fino	0,7
Escayola	0,8
Yeso α	0,4
PRODUCTOS NO TRADICIONALES	Agua/yeso recomendada para consistencia normalizada
Yeso manual aligerado	0,5-0,7
Yeso retardado manual	<1,0
Yeso de proyectar	0,6-0,7
Yeso aligerado de proyección mecánica	0,6
Yeso de alta dureza, normal y de pry. mecánica	0,55-0,6

Tabla 1.6.

Agua de amasado para diferentes productos.

Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid

CAPÍTULO 1: Introducción

El amasado a saturación consiste en espolvorear el producto sobre el agua sin tocar el recipiente, hasta que el yeso sacia el volumen y se queda enrasado con su superficie.

El agua de consistencia normal es la cantidad de agua necesaria para que la pasta adquiera la consistencia determinada por la norma. Se suele utilizar para fijar la consistencia una penetración del cono de Vicat o un determinado diámetro en la mesa de sacudidas.

Los valores aproximados de relación A/Y de amasado a saturación y de consistencia normal para diferentes productos se dan en la tabla 1.6.

La relación entre el agua de amasado a saturación y el agua de consistencia normal en el caso de pastas puras de yeso y escayola suele ser fija y está determinada para cada tipo de producto. Pero para productos aditivados o adicionados se emplea para calcular el agua el sistema de consistencia normalizada porque el amasado a saturación produce exceso de agua.

Agua de amasado factor A/Y, en peso	DENSIDAD, en g/cm ³ , según diversos autores			
	C.S.T.B. (1)	Blanchere (2)	C.E.B.T.P. (3)	Collomb (4)
0,6	1,15	1,2	1,235	1,25
0,7	1,08	-	-	-
0,8	1,00	1,0	-	-
0,9	0,95	-	-	-
1,0	0,88	0,9	0,835	0,85
1,1	-	0,8	-	-
1,2	0,75	-	-	-

Tabla 1.7.

Relación entre el agua de amasado y la densidad.

(1) Datos tomados del S.N.F.I.P. "Chaiers Techniques", 1973-74, París.

(2) E. BLACHERE: *Saber construir*, Barcelona 1967

(3) Datos tomados de COLLOMB y DALIGAND: *Comunicación a la Comisión Científico-técnica de Eurogypsum*. Lyon, 1971. "Boletín Informativo del Yeso", núm. 4. Madrid, enero 1972.

(4) COLOMB: *Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico*. "Boletín Informativo del Yeso", núm. 14. Madrid, junio 1974.

El agua de amasado influirá además de en el tiempo de fraguado, en la resistencia final (fig. 1.4.), la porosidad y la densidad del yeso, influyendo esto a su vez en la habitabilidad y durabilidad. Se comprueba en la tabla en la que Villanueva et al recopila los valores dados por diferentes autores, en todos ellos, a mayor cantidad de agua de amasado, menor es la densidad (tabla 1.7.), pero también la resistencia final (inversamente proporcional al cuadrado del factor agua/yeso utilizado).

Fig 1.4.

Influencia del agua de amasado sobre distintas propiedades del yeso. Ensayos realizados en el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Arredondo y Verdú, F.; "Estudio de materiales" 1983, Madrid

Durante el amasado se produce un primer momento de ligera contracción que se mantiene hasta el inicio del fraguado, momento en que se produce una **expansión o aumento de volumen** (fig. 1.5.) que se prolonga hasta la finalización del fraguado (Tabla 1.8.).

Fig 1.5.

Expansión de fraguado con relación al tiempo. G. BLACHERE: Saber construir. Barcelona. 1967

CAPÍTULO 1: Introducción

No se ha podido deducir ninguna relación directa entre la modificación en la relación A/Y y la expansión inicial de las muestras. Durante el proceso de secado se produce una pequeña retracción, menor que la dilatación anterior. En general esta característica tiene ventajas tanto en la reproducción de moldes, porque permite un ajuste más preciso a los mismos, como en la ejecución de tendidos, evitando las fisuras por retracción. Como se decía anteriormente la expansión es tanto mayor cuanto más lento es el proceso de la hidratación.

En el **aspecto mecánico** durante el fraguado se produce un aumento progresivo de la resistencia y la dureza superficial. En estado líquido, la pasta no puede resistir esfuerzos cortantes (el corte de cuchillo no deja huella), al aumentar la viscosidad y pasar al estado plástico hay una cierta resistencia al corte (el cuchillo deja huella con labios abiertos) y en estado sólido es capaz de resistir sin dejar huella la presión de un dedo. Mediante las curvas de fraguado podemos conocer el estado en el que se encuentra la pasta (fig 1.3).

La pasta de yeso adquiere la resistencia de trabajo aproximadamente a los seis o siete días, en condiciones de humedad y temperatura ambiente, pero a edades tempranas, complementado por la característica del fraguado rápido, es capaz de adquirir la resistencia suficiente para que los productos prefabricados con ella puedan ser desmoldados, manipulados, transportados, etc.

1.1.3.3 Propiedades del yeso endurecido

Una vez que el yeso ha fraguado y endurecido y ha adquirido la resistencia final, el producto resultante tiene una serie de propiedades que le caracterizan y le dan valor como producto de construcción. Trataremos en primer lugar las propiedades físicas y mecánicas fundamentalmente su resistencia y dureza que a su vez están vinculadas a otras características como son la porosidad y el contenido en humedad, y posteriormente las relacionadas con la habitabilidad entre las que se encuentran su comportamiento térmico, acústico, frente al fuego, etc.

1.1.3.3.1 Propiedades físicas y mecánicas

A medida que avanza el proceso de fraguado y se van formando los cristales aumenta la **resistencia mecánica**, hasta alcanzar un valor máximo, alrededor de los

quince días en condiciones de laboratorio (20 °C y 65% de HR), momento en que se llega a la humedad de equilibrio.

En la tabla 1.8 se dan los módulos de elasticidad de algunos productos y en la 1.9. los valores que deben cumplir los yesos de acuerdo a la Norma UNE EN 13279-2 incluidos los de resistencia a flexión y compresión de distintos tipos de productos.

PRODUCTO	Módulo de Young N/mm ²
Estuco de yeso	4.800
Guarnecido	5.200
Guarnecido de yeso de proyectar	2.800

Tabla 1.8.

Módulo de elasticidad. Villanueva Dominguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001. 268. Dossat. Madrid

En el valor de la resistencia mecánica del yeso influyen dos valores: la porosidad y el contenido de humedad.

En relación a la **porosidad**, al ser menor el agua necesaria para el fraguado que para el amasado, el exceso se va eliminando durante el proceso de fraguado y secado, creándose una microestructura porosa en el interior del producto con poros de diferente tamaño, normalmente comunicados entre sí. Cuanto mayor es la cantidad de agua utilizada en el amasado (relación A/Y), mayor es la porosidad y menor la densidad y la resistencia (Fig. 1.6.). Sin embargo a mayor porosidad, mayor será la capacidad de aislamiento térmico (porque los poros evitan la transmisión de calor) y la resistencia al fuego.

Villanueva calculaba la relación entre el agua de amasado y la densidad aparente, obteniendo valores desde 1,10 g/cm³ para una relación A/Y de 0,6, de 1 g/cm³ para 0,8 de relación A/Y o 0,88 g/cm³ para una relación A/Y de 1.

En relación a la variación de la resistencia mecánica, y suponiendo que todas están relacionadas, se obtuvo experimentalmente la expresión que relaciona la resistencia con la relación A/Y y por tanto con la porosidad:

$$\sigma = \frac{K}{\left(\frac{A}{Y}\right)^2}$$

CAPÍTULO 1: Introducción

Donde K es un valor constante para cada tipo de yeso.

Por tanto la relación A/Y utilizada influirá en la porosidad y en las propiedades enumeradas.

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de yeso (%)	Tiempo de principio de fraguado (min)		Resist. flexión (N/mm ²)	Resist. Compr. (N/mm ²)	Dureza superficial (N/mm ²)	Adherencia (N/mm ²)
		aplicación manual	proyección mecánica				
B1	> 50	> 20b	> 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	La rotura se manifiesta en el soporte o en la masa de yeso; cuando la rotura aparece en la interfase yeso-soporte el valor debe ser ≥ 1,0
B2	< 50						
B3	a						
B4	> 50						
B5	< 50						
B6	a						
B7	> 50			≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 2,5	

(a)

Yeso para la construcción		Contenido en Conglom. a base de yeso (%)	Finura de molido				Tiempo de principio de fraguado min		Resistencia flexión (N/mm ²)		Resistencia compresión (N/mm ²)	Dureza superficial	
			5000 µm	1500 µm	200 µm	100 µm	Vicat	Cuchillo	2h ^d	7d ^e		2h ^d	7d ^e
C1	Trabajos con staff	> 50	0	0	<1%	<10%	-	>8	>1,5	>3.0	-	>4.0	>10
C2	Mortero de agarre	> 50	0	-	-	-	>30	-	-	-	>2.0	-	-
C3	Yeso acústico ^a	-	-	-	-	-	>20 ^f	-	-	-	-	-	-
C4	Yeso para aislamiento térmico ^b	-	-	-	-	-	>20 ^f	-	-	-	-	-	-
C5	Yeso para protección frente al fuego ^c	Desviación respecto al contenido nominal <10%	-	-	-	-	>20 ^f	-	-	-	-	-	-
C6	Yeso para capa fina producto de acabado	>50	-	0	-	-	>20 ^f	-	-	>1.0	>2.0	-	-
C7	Producto de acabado	> 50	-	-	-	0	>20 ^f	-	-	>1.0	>2.0	-	-

^a El fabricante debe verificar las propiedades acústicas mediante los métodos adecuados indicados en los apartados 5.1.3.1 y/o 5.1.3.2.

^b El fabricante debe verificar las propiedades de aislamiento térmico mediante los métodos adecuados indicados en los apartados 5.1.4.

^c El fabricante debe verificar las propiedades de reacción al fuego mediante los métodos adecuados indicados en los apartados 5.1.1.

^d Después de acondicionar durante 2 h tras finalizar el tiempo de fraguado en las condiciones especificadas en el apartado 3.1 de la Norma Europea EN 13279-2:2004.

^e Después de acondicionar durante 7 d en una atmósfera húmeda a (20±2)°C y (95±5)% de humedad relativa, seguido de un secado hasta alcanzar una masa constante a (40±2)°C.

^f En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20 min. En este caso el producto debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

(b)

Tabla 1.9. (a) y (b)

Valores establecidos en la Norma Europea EN 13279-2 que deben cumplir: (a) yesos para la construcción tipo B1 a B7 (b) yeso para la construcción para aplicaciones especiales C1 a C7.

Fig 1.6.

Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad, según Duriev.

En cuanto al **contenido de humedad**, la red capilar formada por los poros permite que puedan introducirse moléculas de vapor de agua provenientes del exceso de humedad del ambiente exterior que se cederán cuando baje esta humedad ambiente. Por tanto el yeso actúa como un regulador de humedad que absorbe, acumula y cede vapor de agua dependiendo de la humedad ambiente.

Se denomina contenido de humedad a la cantidad de vapor de agua almacenada en la red capilar del yeso y se suele expresar en % en peso, sobre peso seco.

Para una relación A/Y de 0,8 en una atmósfera constante de 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa el resultado a los 30 días es:

Yeso + agua → doble hidrato + agua no combinada

100 gr + 80 gr → 119 gr + 61 gr

El secado se estabiliza en la humedad de equilibrio que oscila entre diferentes valores (fig 1.10.).

CAPÍTULO 1: Introducción

La capacidad de absorción de agua del yeso se midió en Francia en laboratorio obteniéndose para un revestimiento de 1 cm de espesor de yeso con una relación A/Y de 0,8 una capacidad de absorción de vapor de agua de 52 gr por m².

PRODUCTO	CONDICIONES CLIMÁTICAS		
	20°C y 45% HR	20°C y 45% HR	20°C y 45% HR
Guarnecido de yeso	0,1%	0,1%	0,4%
Guarnecido de yeso de proyectar	0,1%	0,2%	1,0%
Pasta de agarre fraguada	0,1%	0,2%	0,6%
Yeso fraguado	0,1%	0,2%	0,7%

Tabla 1.10.

Humedad de equilibrio de diferentes productos para distintos ambientes, en % en volumen.
 Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid

En relación a la influencia del contenido de humedad con la pérdida de resistencia (Tabla 1.11.) se puede explicar porque el vapor de agua contenido en los poros actúa como lubricante en el entramado cristalino posibilitando movimientos relativos entre ellos y por lo tanto disminuyendo la resistencia. Experimentalmente se ha llegado a la conclusión de que la resistencia baja a la mitad cuando el contenido de humedad pasa del 0 al 1%. Por este motivo las resistencias se deben calcular sobre probetas totalmente secas.

Agua añadida, en porcentajes	Pérdida de resistencia, en porcentajes
0	0
0,04	33
1	52
5	56
25	56

Tabla 1.11.

Pérdida de resistencia del yeso por contenido en humedad
 F. ARREDONDO: Estudio de materiales, II. El Yeso. Madrid, 1963

El grado de absorción de agua depende de la porosidad del yeso y, por tanto, de su densidad y de la cantidad de agua de amasado. Es decir para obtener un mejor comportamiento frente al agua los yesos deben ser más densos y esto se puede conseguir mediante aditivos que permitan un buen amasado con poca agua.

Teniendo en cuenta el uso del yeso, en ningún caso como elemento estructural, son suficientes sus valores de **dureza superficial** (Fig. 1.7.). En el valor de la dureza superficial incide el tratamiento de la superficie de terminación que variará en los productos moldeados en función del molde utilizado y en los revestimientos dependiendo de la terminación o acabado superficial.

Hay diferentes métodos para medir la dureza superficial: Brinell, Vicker, Knappe, etc. Pero el más empleado tanto por su exactitud como por su comodidad (durómetros portátiles) es el Shore en su escala "C". Hay otras escalas para yeso que van de la A a la D. La A para analizar la evolución del fraguado, la C en yesos endurecidos normales y la D en los de alta dureza.

Acciones repetidas, como el roce continuado, pueden producir desgastes de fácil reparación.

Las **variaciones dimensionales** que sufren los elementos constructivos se deben especialmente a la humedad y la temperatura. El yeso, como otros productos minerales, aumenta de volumen por humectación y lo reduce por secado, con oscilaciones máximas de 1,5 a 2 mm/m. Oscilaciones similares de dimensión se producen para aumentos de la temperatura por debajo de los 100°. El valor del

Fig 1.7.

Influencia del agua de amasado sobre la dureza Shore C

P. BARRIAC: Medida de la dureza de los yesos, en laboratorio y en obra. Ponencia en la XXII Sesión de la Comisión Científico-técnica de Eurogypsum. Stuttgart, 1973. Boletín Informativo del Yeso, num. 12. Madrid, noviembre 1973.

CAPÍTULO 1: Introducción

coeficiente de dilatación es mayor por encima de esta temperatura, pero además por encima de los 117° C, teóricamente, el yeso sufre transformaciones internas de deshidratación que modifican su estructura interna y provocan su envejecimiento. Estas temperaturas sólo se alcanzan en situaciones excepcionales, como en un incendio.

Como consecuencia de estas variaciones dimensionales, que no serán las mismas en todos los elementos constructivos, se pueden producir fisuras y grietas, fácilmente evitables dejando las correspondientes juntas elásticas.

Las propiedades que más influyen en la durabilidad del yeso o de los elementos constructivos de los que forma parte son su dureza superficial, y su comportamiento frente al agua, la humedad y la temperatura.

1.1.3.3.2 Comportamiento térmico del yeso

Para evaluar la capacidad de **aislamiento térmico** del yeso, como en otros materiales, hay que considerar su conductividad térmica y por tanto su capacidad para evitar la transmisión de calor por conducción, pero también es importante el papel desempeñado por las superficies de contacto con el aire, las capas límite, en las que se producen los fenómenos de radiación y convección.

Se define como coeficiente de conductividad térmica la cantidad de calor que pasa en un tiempo determinado por unidad de superficie de una muestra de extensión infinita y caras plano-paralelas de espesor unidad, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de 1 grado.

El coeficiente de **conductividad térmica** es una propiedad característica de cada material y está condicionado por su densidad y el estado de humedad en que se encuentre. La densidad está relacionada con la porosidad y el tamaño de los poros. A menor densidad el número de poros de aire será mayor y por lo tanto su conductividad será menor. A mayor humedad, mayor será la conductividad térmica.

En el caso del yeso, nos podemos encontrar con productos ligeros como el yeso celular con valores excelentes de aislamiento térmico y yesos más densos con peores valores (Tabla 1.12), pero buenos en relación a otros materiales.

TIPO	Densidad, En Kg/m³	Coefficiente de conductividad térmica, en W/m.K
Yeso		
Yeso	600	0,18
Yeso	900	0,30
Yeso	1.200	0,43
Yeso	1.500	0,56
Placa de yeso	900	0,25
Enlucidos		
Enlucido de yeso aislante	600	0,18
Enlucido de yeso	1000	0,40
Enlucido de yeso	1300	0,57
Yeso y arena	1.600	0,80
Cal y arena	1.600	0,80
Cemento y arena	1.800	1,00

Tabla 1.12.

Valores de coeficientes de conductividades térmicas del yeso en función de sus densidades

La norma básica NBE-CT 79 sobre CONDICIONES TÉRMICAS DE LOS EDIFICIOS de valores de conductividad térmica para diversos materiales (tablas 1.13 y 1.14) y se dan también los coeficientes de cálculo de la conductividad térmica (λ) para revestimientos de yeso (tabla 1.15).

MATERIALES	Densidad Aparente Kg/m³	Coef. de conductividad térmica Kcal/mh °C
ROCAS Y SUELOS NATURALES		
Rocas y terrenos		
- Rocas compactas	2.500-3.000	3,00
- Rocas porosas	1.700-2.500	2,00
- Arena con humedad natural	1.700	1,20
- Suelo coherente con humedad natural	1.800	1,80
Arcillas		
Materiales sueltos de relleno desecados al aire en forjados, etc.		
- Arena	1.500	0,50
- Grava rodada o de machaqueo	1.700	0,70
- Escoria de Carbón	1.200	0,16
- Cascote de ladrillo	1.300	0,35

Tabla 1.13.

Valores de conductividad térmica según la NBE-CT 79

CAPÍTULO 1: Introducción

MATERIALES	Densidad Aparente Kg/m ²	Coef. de conductividad térmica Kcal/mh °C
PASTAS, MORTEROS Y HORMIGONES		
Revestimientos continuos		
- Morteros de cal y bastardos	1.600	0,75
- Mortero de cemento	2.000	1,20
- Enlucido de yeso	800	0,26
- Enlucido de yeso con perlita	570	0,16
Hormigones normales y ligeros		
- Hormigón armado normal	2.400	1,40
- Hormigón con áridos ligeros	600	0,15
- Hormigón con áridos ligeros	1.000	0,28
- Hormigón con áridos ligeros	1.400	0,47
- Hormigón celular con áridos silíceos	600	0,29
- Hormigón celular con áridos silíceos	1.000	0,58
- Hormigón celular con áridos silíceos	1.400	0,94
- Hormigón celular sin áridos	305	0,08

Tabla 1.14.

Valores de conductividad térmica según la NBE-CT 79

COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE CÁLCULO		
	W/K.m	Kcal/mh °C
Enlucido de yeso	0,30	0,26
Enlucido de yeso con perlita	0,18	0,16
Placa de yeso laminado	0,18	0,26
Placa de escayola	0,30	0,26

Tabla 1.15.

Coefficientes de conductividad térmica de cálculo según la NBE-CT 79

En la capa de contacto entre la superficie del material y el aire, el calor se transmite por tres acciones: convección libre, convección forzada y radiación. La convección libre se produce cuando la superficie el sólido está a diferente temperatura de la del ambiente que le rodea y sólo es importante cuando la convección forzada es pequeña. La convección forzada se produce por el viento o en las cámaras de aire por el tiro de ventilación. Incluso con velocidades de aire muy bajas, resultan despreciables las pérdidas por convección libre en relación a las producidas por convección forzada. El **coeficiente de transmisión de calor por convección** depende del "coeficiente de fricción" y de la velocidad del viento. Cuanto más lisa sea la superficie menor será el coeficiente de fricción y mejor el aislamiento térmico. El yeso alisado tiene un coeficiente de fricción de 1,2, muy bueno en relación con otros materiales y sólo superado por el cristal (Tabla 1.16.).

En el efecto del aislamiento producido en las capas límites también influye la **transmisión de calor por radiación** de las superficies. El coeficiente de transmisión por radiación depende directamente de la "emisividad" (es 0 para una superficie perfectamente brillante y 1 para una negra mate), de modo que cuanto mayor sea ésta mayor será la transmisión de calor y menor la resistencia térmica. El yeso tiene una emisividad alta, pero tiene una baja absorbencia. Cuanto más blanca y brillante es su superficie, el coeficiente de absorción es menor, pudiéndose considerar que oscila entre un 10 y un 20% de la energía recibida.

MATERIALES	Coeficiente de fricción F
Cristal	1,00
Yeso alisado	1,20
Madera	1,25
Hormigón	1,62
Fábrica de ladrillo	1,78

Tabla 1.16.

Valores del coeficiente de fricción para diversos materiales de construcción.

Modo de influir del coeficiente de fricción en el coeficiente de transmisión de calor de la capa límite debido a la convección forzada (aproximación de Diamant para superficies rugosas):

Velocidad del viento comprendido entre 1,8 y 8,4 m/seg: $h_c = 1,09 + 0,23 F \cdot v$

Velocidad del viento por encima de 8,4 m/seg: $h_c = 0,50 F \cdot v^{0,8}$

Donde:

h_c = Coeficiente de transmisión del calor de la capa límite debido a la convección forzada en Btu/h ft² °C

F = Coeficiente de fricción

v = Velocidad del viento ft/h

E. DIAMANT: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967.

La **inercia térmica** depende de varios factores entre los que se encuentran la velocidad de propagación de la onda térmica (proporcional a la difusividad del material) y el factor de amortiguamiento, que indicará la inercia térmica de cada material. Teniendo en cuenta estos factores podemos decir que el yeso en función de su densidad tiene una inercia térmica similar a la de los elementos de construcción tradicionales (Tabla 1.17.).

MATERIAL	Velocidad de propagación de la onda térmica (periodo de 24 horas) en mm/hora	Factor de amortiguamiento en m ⁻¹
Hormigón	34,96	7,87
Yeso	32,12	8,64
Fábrica de ladrillo	30,40	8,52
Madera	17,02	15,41
Espuma de plástico	1,52	18,03
Hormigón gaseoso	2,12	13,11

Tabla 1.17.

Inercia térmica, velocidad de propagación de la onda térmica y factor de amortiguamiento.

Valores deducidos de los facilitados por E. DIAMANT: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967.

Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. 1975

CAPÍTULO 1: Introducción

MATERIAL	Coeficiente de penetración térmica en Kcal/h ^{1/2} m ² °C
Corcho	2,66 a 4,10
Madera	8,20 a 12,09
Hormigón celular	10,25 a 26,65
Hormigón denso	26,65 a 41,00

Tabla 1.18.

Valores del coeficiente de penetración térmica para diferentes materiales.

Valores deducidos de los facilitados por E.DIAMANT: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967.

Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. 1975

$$\text{Fórmula del coeficiente de penetración térmica: } b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

b = Coeficiente de penetración térmica en Kcal/h^{-1/2} m² °C o Btu/h^{-1/2} ft² °F

λ = Coeficiente de conductividad térmica en Kcal/h m °C o h ft °C

ρ = Densidad del material en Kg/m³ o lb/ft³

c = Calor específico en Kcal/Kg °C o Btu/lb °F

Entendemos por **confort superficial** la temperatura percibida por el tacto, que es independiente de la que realmente tiene el material. Se ha demostrado que el confort depende del llamado coeficiente "de penetración térmica" del material, que depende directamente del coeficiente de conductividad, del calor específico y de la densidad del material considerado (Tabla 1.18.). Cuanto mayor sea este coeficiente, más confortable será al tacto una superficie. Podemos considerar el yeso como un material confortable superficialmente y adecuadamente cálido (tabla 1.19). Esta propiedad hace que las condensaciones se produzcan más tarde que en otros materiales más fríos, como el cristal, los metales o el mármol, que son los de mayor penetración térmica.

Densidad del yeso, en Kg/m3	Coeficiente de penetración térmica en Kcal/h ^{1/2} m ² °C
200	2,25
400	3,90
600	5,92
800	7,80
1.000	9,82
1.200	12,09

Tabla 1.19.

Valores del coeficiente de penetración térmica para el yeso en estado seco y en función de la densidad.

Valores deducidos de los facilitados por E.DIAMANT: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967.

Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. 1975

1.1.3.3.3 Comportamiento frente a la humedad y el vapor de agua del yeso

En condiciones normales, la presión de saturación es más baja en el interior de las construcciones que en el exterior. Para evitar condensaciones y controlar la humedad relativa de los locales es necesario que se realice una renovación del aire para eliminar el vapor de agua. Esta eliminación se hace a través de conductos u orificios de ventilación, pero también a través de las paredes según sea su grado de permeabilidad. Por tanto, hay una constante difusión de vapor de agua desde el interior hacia el exterior de los edificios, cuya velocidad depende de dos factores: de la diferencia de presión de vapor entre el interior y el exterior y de la "difusibilidad" de la pared.

Material	Resistividad al vapor de agua r_v (1) mm Hg m ² día/gr cm	μ
Enlucidos de yeso	0,052	10,9
Placas de fibrocemento	0,001-0,003	0,3 a 0,6
Hormigón con áridos normales o ligeros	0,026-0,086	5,5 a 18,2
Hormigón aireado con espumantes	0,017	3,6
Hormigón celular aireado al vapor	0,060	14
Madera	0,039	8,2 a 13,6
Tablero aglomerado de partículas	0,013-0,052	
Contrachapado de madera	1.300-5.200	272 a 1.090
Hormigón con fibra de madera	0,013-0,035	
Placas de yeso laminado	0,039-0,052	8,2 a 10,9

Tabla 1.20.

Resistividad al vapor de agua de diversos materiales, según la NBE-CT 79.

(1) r_v es el inverso de la permeabilidad al vapor d_v .

$$\mu = \frac{d_v}{d_{v\text{aire}}} = \frac{r_{v\text{aire}}}{r_v}$$

Llamamos "difusibilidad al vapor de agua" a la cantidad de vapor de agua que pasa a través de la unidad de superficie de un material de espesor unidad, cuando la diferencia de presión de vapor entre sus caras es la unidad. La norma NBE-CT 79 da el valor de la resistividad al vapor de agua, inverso de la permeabilidad, para algunos materiales (tabla 1.20). Se expresa normalmente en: mm Hg m² día / gr cm.

El yeso actúa como **regulador higrotérmico**, pues su coeficiente de difusión relativa, o sea la relación entre la velocidad de difusión a través del aire y la velocidad de difusión a través del material, es unas 10 veces mayor que el del aire, similar al de otros materiales tradicionales minerales y muy inferior al de los materiales aislantes térmicos, por ejemplo el del caucho natural. Además, como ya se dijo anteriormente,

CAPÍTULO 1: Introducción

debido a su microestructura porosa, es capaz de almacenar moléculas de vapor de agua en el interior de su masa cuando en el ambiente hay un exceso y de cederlas cuando se revierte la situación del ambiente exterior, volviendo a su humedad de equilibrio.

La capacidad de un material para absorber agua líquida se define por el peso de agua que absorbe una probeta de un material sumergido en agua, durante un tiempo determinado y a una temperatura especificada. Está íntimamente ligada a la conductividad térmica y la densidad. Cuanto menor es la densidad, mayor es su capacidad para absorber agua. Se estima la capacidad del yeso para absorber vapor de agua entre un 0,1 y un 0,2 de su peso.

Hay que recordar que la resistencia del yeso se reduce a la mitad cuando el contenido de humedad alcanza el 1%, por lo que no conviene su exposición al agua. Aunque con el secado se recuperan normalmente las propiedades iniciales, esto ocurre cuando las exposiciones son cortas y ocasionales, aunque se repitan, y siempre que el yeso pueda recuperar su humedad de equilibrio. Lo que no conviene es la exposición prolongada al agua.

El parámetro que se emplea para medir la capacidad de absorber agua líquida es el *coeficiente de absorción de agua* (tabla 1.21.).

	Densidad aparente aproximada Kg / m ²	Coeficiente de absorción de agua (Kg/m ²)
Yeso de tender	1.050	46-53
Yeso de proyectar	1.110	5-12
Yeso de agarre	900	18

Tabla 1.21.

Coeficiente de absorción de agua en tendidos de yeso

Villanueva Domínguez, Luis; García Santos, Alfonso; Asociación técnica y empresarial del yeso "Manual del yeso" 2001, 268, Dossat, Madrid

1.1.3.3.4 Comportamiento acústico del yeso

En el aislamiento a ruido aéreo tenemos que considerar la transmisión directa (por poros, fisuras, etc.) y la transmisión por vibración de los elementos separadores, que actúan como membranas.

El primero de los aspectos sólo interesa en materiales muy permeables al aire. En el caso del yeso es despreciable, siendo la transmisión por vibración, que depende de la masa y la rigidez de la pared, el aspecto más importante.

De acuerdo con la ley de masas el **aislamiento acústico a ruido aéreo**, para una frecuencia determinada y un tabique simple, depende de su peso por unidad de superficie (Fig. 1.8.).

Fig 1.8.

Comportamiento acústico de los materiales de acuerdo a la Ley de masas. Aislamiento sonoro de una pared (ruido aéreo) en función de su masa.

R.CADIERGUES: Aislamiento y protección de las construcciones. Barcelona 1959.

Pero aunque la masa por unidad de área es el principal factor que afecta al aislamiento acústico, también es importante la elasticidad del material.

Cada material tiene una frecuencia crítica que depende, entre otros factores, de su rigidez a flexión y, por tanto, de su módulo de elasticidad.

CAPÍTULO 1: Introducción

Diamant¹ indicaba que la frecuencia crítica o límite de un material de construcción puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{M}{S}}$$

Siendo:

f_c = frecuencia crítica, en Hz

c = velocidad del sonido en aire, en cm/seg

M = Masa específica de la pared, en gr/cm³

S = Rigidez a flexión, en gr cm/seg²

Dado que la rigidez de la placa puede expresarse en función del grueso y del módulo de elasticidad, la norma DIN-4109 propone para placas de textura uniforme la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{20.000}{d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_{\text{dim}}}}$$

Siendo:

f_c = frecuencia crítica, en Hz

d = Espesor de la placa en cm

ρ = Densidad del material, en Kg/m³

E_{dim} = Módulo de elasticidad dinámico del material, en Kp/cm²

Por lo tanto la frecuencia crítica es más baja cuanto mayor es la rigidez y compacidad. Resultando para placas de yeso, de espesor:

1 cm $f_c = 3.000$ Hz

8 cm $f_c = 370$ Hz

Aquellos materiales que, como el yeso, tienen una frecuencia crítica que se encuentra dentro de la zona audible producen resultados que difieren de los obtenidos de acuerdo a la ley de masas, reduciéndose el efecto del aislamiento acústico. Algunos autores han elaborado curvas que tienen en cuenta la frecuencia de resonancia modificando las correspondientes a la ley de masas. (Fig 1.9).

Los valores experimentales de aislamiento acústico para tabiques de yeso no muestran un buen comportamiento del material en este aspecto debido a su ligereza (Tabla 1.22.). Para mejorarlo se han utilizado dos procedimientos. Incrementar la

¹ E. Diamant: Aislamiento térmico y acústico de edificios. Madrid, 1967

densidad para aumentar su peso o utilizar tabiques dobles con diferentes frecuencias de vibración, separados por cámaras de aire. (Tabla 1.23.).

La norma NBE-CA-88 establece para tabiques de escayola de 6 cm de espesor y masa de 60 Kg/m^2 , un aislamiento de 32 dBA, y para tabiques de paneles o bloques de escayola de 10 cm de espesor y masa de 91 Kg/m^2 , un aislamiento de 35 dBA.

Fig 1.9.

Aislamiento acústico para elementos de una sola hoja, en función de la masa por unidad de superficie.
(Interpretación de la ley de masas por DIN-4109 W. HENN: Tabiques. Barcelona 1971.

El aislamiento a **ruido de impacto** se determina mediante ensayo, pero en general los materiales que funcionan bien a ruido aéreo lo hacen peor a ruido de impacto. Para mejorar el comportamiento del yeso a ruido de impacto es necesario revestirlo con otros materiales como el corcho, el caucho, tableros de fibras, etc.

CAPÍTULO 1: Introducción

Espesor, en cm	AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO En dB, para distintas frecuencias			
	Bajas	Medias	Altas	Valor medio
5	27,6	28,8	37,7	31,4
6	24,7	29,3	42,2	30,2
6	29,4	29,8	36,2	31,1
6	27,6	30,7	40,6	31,6
6	31,7	38,8	43,4	36,6
6	25,7	29,9	40,4	30,4
6	25	29	40	30,4

Tabla 1.22.

Valores experimentales de aislamiento acústico en tabiques simples de placas de yeso para diferentes frecuencias y valor medio.

Datos del Laboratorio INCE. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. Boletín informativo del yeso nº 19. 1975.

Nota: Otros autores obtienen valores experimentales en función de su peso en Kg/m², observándose diferencias mínimas o incluso sin diferencias en función de su densidad.

TABIQUES DOBLES DE PLACAS DE YESO		AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO En dB, para distintas frecuencias			
Espesor de cada capa en cm	Espesor de cámara de aire en cm	Bajas	Medias	Altas	Valor medio
6	5	35,7	42,5	53,8	41,9
7	5	36,1	41,5	51,1	41,2
7 y 9	5	36,9	44,6	51,3	42,6

Tabla 1.23.

Valores experimentales de aislamiento acústico en tabiques compuestos en los que interviene el yeso, para diferentes frecuencias y valor medio. Datos del Laboratorio INCE. Madrid. L. VILLANUEVA. Documentación Técnica de las Propiedades del Yeso en la Construcción. Boletín informativo del yeso nº 19. 1975.

TIPO DE PARED	AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO En dB	
	Sin enlucido	Con enlucido
Ladrillo perforado de 24 cm (1)	48	52
Hormigó vertido de 25 cm (1)	9	51
Placas de hormigón poroso de 20 cm (1)	43	45
Bloques de hormigón de 15 cm, con los huecos rellenos de hormigón de baja resistencia (1)	29	56

Tabla 1.24.

Valores medios experimentales de aislamiento acústico para distintos materiales con y sin guarnecido de yeso.

(1) W.HENN: Tabiques. Barcelona. 1971.

El yeso, sin embargo, si resulta una buena solución para **evitar los puentes acústicos**, aplicado en forma de tendido sobre elementos contruidos a base de diversos materiales (Tabla 1.24.). Esto se debe a la dilatación que el yeso experimenta al fraguar.

El tiempo de reverberación ²de los locales influye en la acústica de los mismos. Este tiempo de reverberación depende del **coeficiente de absorción** (energía absorbida por unidad de superficie, tomando como absorción máxima la de una ventana de superficie unidad) de los materiales que conforman la superficie de los locales. El valor de este coeficiente depende también de la frecuencia del sonido. La textura de los

MATERIAL	Coeficiente medio de absorción acústica
Acero	0,10
Marmol	0,010
Hormigón	0,015
Cemento	0,020
Yeso	0,020
Revocos	0,025-0,043
Madera	0,030-0,100
Cristal	0,027-0,033
Ladrillo	0,032
Corcho	0,160
Alfombras	0,200-0,290

Tabla 1.25.

Valores del coeficiente de absorción acústica para diversos materiales de construcción

E. NEUFERT: Arte de proyectar en Arquitectura. Barcelona, 1942

R.CADIERGUES: Aislamiento y protección de las construcciones. Barcelona, 1957

materiales condiciona este valor, que en el caso del yeso si se trata de una superficie lisa tiene un coeficiente medio de absorción bajo, de alrededor de 0,02. Sin embargo gracias a su moldeabilidad que permite obtener diferentes texturas e incluir perforaciones y trasdosado con materiales absorbentes da como resultado buenos valores en el coeficiente de absorción (Tabla 1.25.).

² Formula de Sabine para calcular el tiempo de reverberación:

$$tr = 0,161 \frac{V}{\sum a_i S_i}$$

Dónde:

tr = tiempo de reverberación, en segundos

V = Volumen del local en m^3

a_i = Coeficiente de absorción de las diferentes zonas superficiales

S_i = Superficie de las diferentes zonas en m^2

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1.3.3.5 Comportamiento frente al fuego del yeso

El yeso es un material incombustible y un buen material de protección frente al fuego por su baja conductividad térmica (evita la propagación del calor en los incendios), por el agua libre que contiene (consume energía calorífica para evaporarla) y porque absorbe calor para transformarse de dihidrato en anhidrita (absorbe calor en su descomposición y en la evaporación del agua combinada y mientras que el agua no está evaporada, la T^a de la masa del yeso queda por debajo de los 140°C).

Aún después de su deshidratación, el yeso sigue actuando como protector contra el fuego del elemento que reviste por su baja conductividad térmica, y no produce gases o vapores tóxicos, corrosivos o asfixiantes, ni humos.

Para mejorar su comportamiento al fuego se adiciona vermiculita.

La CTE clasifica el yeso en términos de combustibilidad como A1, es decir no combustible

En cuanto a su reacción al fuego (capacidad para favorecer el inicio de un fuego y su desarrollo), según las EUROCLASES los yesos y productos del yeso se clasifican como A1 (no contribución al fuego), sin necesidad de ensayos cuando tienen menos de un 1% en peso o en volumen (el valor más restrictivo) de materia orgánica.

Hay diversos estudios experimentales en los que a partir de una curva de elevación de temperaturas o curva de incendio normalizado, se miden las temperaturas en la cara expuesta y en la no expuesta al fuego y se dan criterios de protección. El tiempo de protección se expresa en minutos e indica el grado de resistencia al fuego. Pero esta es una característica de un sistema, no de un producto.

1.2. EL CAUCHO NFU

En España se consumen más de 35 millones de neumáticos nuevos al año, y se generan más de 300.000 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU).

Es un material que se ha creado para resistir duras condiciones con lo que tardaría más de mil años en descomponerse en la naturaleza. Además tiene una alta capacidad calorífica, que en caso de incendio hace difícil su extinción. Por otro lado son difícilmente compactables, y por su forma acumulan gases y lixiviados que se generan en vertederos. Todas estas características hacen que no sea recomendable su depósito en vertedero.

Fig 1.10.
Neumáticos depositados en vertedero.

El elevado volumen de residuos generados y las características señaladas, llevó a la Unión Europea a promulgar una normativa al respecto y posteriormente en España al Ministerio de Medio Ambiente a elaborar una normativa para su gestión, fomentando, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización.

CAPÍTULO 1: Introducción

Basándose en la aplicación del real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de Neumáticos Fuera de Uso, se constituyeron dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG), uno de ellos denominado SIGNUS ECOVALOR, creado en mayo de 2005, que agrupa a la mayor parte de fabricantes de neumáticos del mercado nacional, y el otro, TRATAMIENTO DE NEUMÁTICOS USADOS (TNU), constituido en julio de 2006, en el que se agrupan la mayor parte de los importadores de neumáticos. Ambos SIG representan el 90% del mercado nacional de NFU.

En España se gestionaron en 2013, 144.549 toneladas de NFU, por SIGNUS ECOVALOR (*Signus en cifras. Cuadro- resumen 2013. Flujo de material.*), y 48.672 toneladas por TNU (*Tratamiento de neumáticos usados (TNU). Memoria 2013*), situándose así en el quinto lugar en esta materia en la Unión Europea por detrás de países como Alemania, Reino Unido, Italia y Francia (*"Anual report 2013-14". EUROPEAN TYRE & RUBBER manufactures association. (Informe de la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Producto de Caucho ETRMA)*).

En el año 2013 el destino de estos NFU, es el de la tabla 1.26. Es interesante destacar que respecto a años anteriores se ha incrementado el porcentaje destinado a valorización material.

	REUTILIZACIÓN %	VALORIZACIÓN ENERGÉTICA %	VALORIZACIÓN MATERIAL %
SIGNUS	11	42,4	46,5
TNU	11,34	54,34	34,32

Tabla 1.26

Fuente SIGNUS ECOVALOR Y TNU.

1.2.1 Marco legal

Los Neumáticos fuera de uso (NFU) son un residuo catalogado por la UE como residuo tóxico y peligroso (Lista Europea de Residuos. Código: 16.01.03).

La Unión Europea ha adoptado las siguientes Directivas que afectan a los neumáticos fuera de uso:

- La Directiva 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, sobre residuos, modificada por las Directivas 91/156/EEC, de 18 de marzo de 1981, 91/692/EEC, de 23 de diciembre de 1991 y por la Decisión de la Comisión Europea 96/350/EC, de 24 de mayo de 1996. Se trata de la Directiva fundamental de la legislación sobre residuos, en la que se establecen los criterios y la metodología para su correcta gestión.
- La Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, sobre vertido de residuos, que prohíbe el vertido de neumáticos enteros en vertederos a partir del 16 de julio de 2003 y troceados a partir del 16 de julio de 2006. En ambos casos se excluyen los neumáticos de bicicleta y los neumáticos cuyo diámetro exterior sea superior a 1.400 mm.
- La Directiva 2000/53/CE, de 18 de septiembre de 2000, relativa a los vehículos al final de su vida útil, que regula la retirada de los neumáticos de los vehículos fuera de uso para fomentar el reciclado, asegurando con ello que no acaban en los vertederos.
- La Directiva 2008/98/CE, de 19 de diciembre de 2008, constituye el marco normativo vigente para la producción y gestión de residuos en la Unión Europea. En ella se establece una jerarquía de gestión de residuos con el siguiente orden de prioridades: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otras formas de la valorización (incluida la energética) y la eliminación. Incorpora el concepto de fin de la condición de residuo, siempre que se den determinadas condiciones y se cumplan unos criterios específicos (los NFU pueden encontrarse entre ellos).

En España, la gestión está regulada a nivel nacional por diversas normativas, entre las que podemos mencionar:

- La Ley 10/1998, de 21 de abril, "Básica de Residuos" tiene por objeto prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de sus producción y gestión y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización..." (Capítulo I, artículo 1.1).
- El Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006, aprobado en octubre de 2001 (BOE núm.260 de 30 de octubre de 2001)

CAPÍTULO 1: Introducción

en Consejo de Ministros adoptando como referencia los plazos establecidos en la Directiva de vertido de residuos, prohíbe la eliminación (vertido o incineración sin recuperación energética) de los neumáticos enteros a partir del 1 de enero de 2003 y el de los neumáticos troceados a partir del 1 de enero de 2006. Otras fechas y porcentajes significativos que se mencionan en el citado Plan son: valorizar al menos un 65% en peso de los neumáticos fuera de uso procedentes de vehículos de turismo antes del 1 de enero de 2005, y reciclar al menos un 25% en peso de los neumáticos procedentes de los vehículos de turismo y de camiones antes del 1 de enero de 2007.

- El Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso diciembre (BOE núm. 2 de 3 de marzo de 2006) sobre gestión de NFU para regular las obligaciones de los agentes económicos que intervienen en en todas sus fases y las condiciones generales de gestión de estos residuos, "tiene por objeto prevenir la generación de neumáticos fuera de uso, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, y fomentar, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, con la finalidad de proteger el medioambiente", excluyéndose los neumáticos de bicicleta y los de diámetro superior a 1400 mm.
- El Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015, aprobado el 26 de diciembre de 2008, como revisión del plan anterior, en su apartado 8 se refiere a los Neumáticos fuera de uso. Se describe la situación actual teniendo en cuenta el RD 1619/2005, se fijan objetivos cualitativos y cuantitativos (tabla 1.27) y se indican las medidas a tomar para facilitar el logro de estos objetivos. Entre estas medidas se indica: "...las Administraciones Públicas fomentarán el uso de los materiales procedentes del reciclado de los NFU en productos y obras de iniciativa privada".
- La Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados, incorpora la "Directiva Marco de Residuos" (Directiva 2008/98/CE) al ordenamiento jurídico español. Deroga la anterior ley de residuos (Ley 10/1998), y pasa a ser la única norma de rango legal que regula los residuos en España. En ella se introducen medidas como la "preparación para la

reutilización y el reciclado” (importante para el recauchutado de neumáticos) y se fijan objetivos estratégicos de recogida separada y de prevención.

- La Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente, modifica la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados. Se amplía el régimen jurídico de los SIG, consolidándolos como el modelo más eficaz y eficiente para la gestión y reciclado de los NFU.

Diversas comunidades autónomas, han aprobado normativas específicas al respecto. En concreto en la Comunidad de Madrid se encuentra actualmente en vigor el “Plan Regional sobre Neumáticos fuera de uso (2006-2016)”.

Cabe destacar que en el año 2012 se constituyó el comité europeo CEN TC 366 de normalización de materiales procedentes de NFU, encargado del estudio de las características de estos materiales tales como dimensiones e impurezas según Norma TS 14243 (grupo de trabajo WG1), sus propiedades físicas (grupo WG2), estudio de la composición química (grupo WG3) y las propiedades de los neumáticos enteros (grupo WG4).

1.2.2 Gestión y tratamiento de los NFU

Como se exponía en el apartado de Normativa el Real Decreto 1619/2005 de 30 de diciembre, en la gestión de NFU, se debe fomentar por este orden: su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización.

Para conseguir la reducción del número de neumáticos usados, se debe aumentar la vida útil de los mismos mediante mejoras tecnológicas o de diseño por parte del productor o mediante el mejor mantenimiento por parte del usuario.

El recauchutado permite la reutilización de los neumáticos, dándoles una segunda vida útil. La renovación es posible cuando la estructura del neumático se mantiene en buen estado y consiste, básicamente, en la sustitución de la banda de rodadura gastada por una nueva (fig 1.11). La producción de neumáticos recauchutados está sometida a reglamentos internacionales de homologación de los mismos (R-108 para neumáticos de turismo y R-109 para neumáticos de camión de la Convención de Ginebra de Naciones Unidas). Estos Reglamentos exigen el cumplimiento de una serie de prestaciones a los neumáticos recauchutados producidos en instalaciones homologadas.

CAPÍTULO 1: Introducción

Fig 1.11.
Recauchutado de neumáticos.

El reciclado supone una valorización del neumático entero o reduciéndolos de tamaño. Para la reducción de tamaño se separan los 3 componentes básicos del neumático; fibra textil, acero y caucho. Según el uso que se le vaya a dar se emplean diferentes tecnologías: Tratamientos mecánicos (los neumáticos son comprimidos, cortados o fragmentados en piezas irregulares. Entre ellos se encuentra la fabricación de balas, troceado o ripping, trituración o cutting), tecnologías de reducción de tamaño (se distingue entre las realizadas a temperatura ambiente, criogénico y húmedo), tecnologías de Regeneración (devulcanización, recuperación del caucho o reclaiming, modificación superficial y modificación biológica) y otras tecnologías (Pirólisis-Termólisis). Los que presentan mayor viabilidad económica son los troceados mecánicos.

En la tabla 1.27. se puede ver un resumen de los materiales obtenidos, tamaño en milímetros y tecnologías más empleadas para su obtención.

La última opción, siempre que no haya otra, es "otras formas de valorización": En este caso está la valorización energética (Cano Serrano et al). El neumático tiene un poder calorífico alto (7.500 Kcal/Kg) que es superior al del carbón y menos contaminante que éste, ya que el neumático tiene un menor contenido de azufre, constituyendo un buen combustible.

El Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015, tenía como objetivo su reducción desde el 30% en el año 2008 hasta el 15% en el año 2015.

Producto	Tamaño	Fuente	Tecnología
Neumático entero (W)		Neumáticos enteros coche-camión	Mecánica (M)
Trozos (X)	> 300 mm	Todas	Mecánica (M)
Tiras (shred) (S)	50-300 mm	Todas	Mecánica (M)/reducción a temperatura ambiente (A)
Astillas (chips) (C)	10-50 mm	Todas	Mecánica (M)/reducción a temperatura ambiente (A)
Granulado (G)	1-10 mm	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénico (C)
Polvo (P)	< 1 mm	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénico (C)
Polvo fino (F)	<500 µm	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénico (C)/recuperación (R)/desvulcanización (D)
Buffins (B)	0-40 mm	Neumáticos pisados camión –coche.	Buffing (B)
Recuperado (reclaiming) (R)	Normalmente se suministra en bloques	Todas y granulado	Recuperación (R)
Desvulcanizado (D)	Depende del tamaño del polvo	Polvo de todas las fuentes	Reducción criogénica (C)/temperatura ambiente (A)/desvulcanización (D)
Pirólítico (Y)	< 10 mm	Todas	Pirólisis (P) /buffing (B)/Reducción criogénica (C)
Productos de Carbón (Z)	<500 µm	Pirólítico	Otras tecnologías (O)

Tabla 1.27.

Caracterización de los productos según tecnologías empleadas.

Fuente: Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Autores: Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M.

1.2.3 Tratamientos mecánicos. Tecnologías de reducción de tamaño.

Tras separar los 3 componentes básicos del neumático y como paso previo a la molienda se requiere la trituración de los neumáticos al tamaño adecuado al uso específico que se le vaya a dar. Esta trituración, también se realiza en vertederos o

CAPÍTULO 1: Introducción

centros de recogida para disminuir el volumen de los neumáticos y reducir el coste del transporte.

En el proceso de trituración, que se realiza a temperatura ambiente, el neumáticos se reduce a trozos relativamente grandes, < 300 mm (cuts) y después a tiras de tamaño entre 50-300mm (shred). En algunos sistemas se eliminan los cables metálicos de los talones que los ajustan a las llantas antes del troceado; en otros, se separan magnéticamente después.

Después de la trituración los procesos más utilizados para producir polvo de caucho son: la molienda mecánica, la molienda criogénica y la molienda húmeda.

1.- Molienda mecánica

La molienda mecánica se suele llevar a cabo en molinos clásicos que rompen el caucho, puede ser a temperatura ambiente o por encima de ella. Previamente al molido es necesario separar el componente metálico con separadores magnéticos y eliminar la parte textil que se hace con cintas o bandejas vibratorias que originan el apelmazamiento de las fibras, que después se separan por tamizado u otros dispositivos o mediante separadores de aire, en este caso se hace después del molido.

El proceso continua con la reducción a polvo grueso y posteriormente a polvo fino. La distribución y tamaño de la partícula depende del número de veces que se pasa el polvo por el rodillo y del tipo de rodillo empleado. En general el rodillo primario reducirá a tamaños entre 10-40 mesh, y los secundarios podrán reducir a 80 mesh.

La empresa constructora AMSA describe el proceso de trituración en varias fases. La primera fase consiste en trocear los neumáticos a un tamaño de 10x10cm, aproximadamente. De esta primera fase tan sólo se reciclará la cantidad necesaria, según la demanda del mercado, y el resto se empleará como combustible alternativo, por ejemplo en hornos de cementeras.

En la siguiente fase se reduce el tamaño de los trozos a 2,5 cm, mediante máquinas en cascada que separan el acero (mediante imanes), las piedras y la tierra (mediante masas densimétricas), y la fibra.

Para la fabricación del **polvo de goma, tamaños inferiores a 1,5 mm**, se hace pasar por un grupo de máquinas que realizan la molienda por fricción, la criba y la separación del resto de impurezas mecánicas.

Las partículas del polvo de caucho obtenido por molienda mecánica tienden a tener una forma irregular con una considerable rugosidad superficial y una mayor superficie específica que el obtenido por el sistema criogénico. El caucho está parcialmente oxidado en la superficie debido al calor generado durante el proceso.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las mayores aplicaciones del polvo de caucho actualmente es en carreteras para la fabricación de betunes-caucho y en las mezclas bituminosas. La textura irregular y la mayor superficie específica son propiedades que mejoran la compatibilidad y la interacción entre el betún y el caucho, sin embargo la mayor heterogeneidad dimensional que se produce con este sistema perjudica la compatibilidad del caucho con el betún y ha dado lugar a la introducción de cambios tecnológicos en la trituración para conseguir una mayor homogeneidad. En general el control de variables en la fabricación del polvo de caucho como la temperatura, el tiempo y la energía de cizalla inciden en la interacción del caucho y el betún.

2.- Molienda criogénica

Este tipo de molienda se basa en que el caucho a muy bajas temperaturas (entre -80 y -200°C, por debajo de la temperatura de transición vítrea), se fragiliza perdiendo su elasticidad y facilitando su desintegración.

El proceso de molienda criogénica tiene cuatro fases: reducción del tamaño inicial, refrigeración, separación y molienda. La refrigeración se realiza introduciendo los trozos de caucho en cámaras que utilizan nitrógeno líquido u otros refrigerantes comerciales para congelarlo. Estos trozos congelados se pasan por molinos de impacto para obtener el polvo. Se seca, separan las fibras y los metales y el granulado se pasa a través de una serie de pantallas magnéticas y estaciones de tamizado para eliminar impurezas y clasificar el polvo según los tamaños obtenidos.

Las partículas de polvo obtenidas por molienda criogénica tienen una textura muy lisa de características vítreas, corte angular, una baja superficie específica y una mínima oxidación superficial y permiten un amplio rango de tamaño de partículas,

CAPÍTULO 1: Introducción

pudiéndose alcanzar los 0,15 mm. Su textura no es la más adecuada para mezclarse con el betún.

El coste es superior al de la molienda mecánica, por el elevado precio del nitrógeno líquido y la necesidad de secado para eliminar la humedad.

Actualmente el mercado se centra en la molienda mecánica porque la calidad requerida del polvo para distintas aplicaciones no justifica la diferencia de coste.

1.2.4 Aplicaciones de los Neumáticos Fuera de Uso

Las posibles aplicaciones de reutilización, reciclado y valorización energética de los NFU son muy variadas (Cedex 2013)³.

1. reutilización: El recauchutado, es sin duda la principal aplicación de reutilización de los neumáticos.

2. Reciclado o valorización material

Los neumáticos enteros se emplean en: arrecifes artificiales, defensas de muelles o embarcaciones, como elementos de seguridad vial, barreras acústicas y macizos de suelo reforzado (capas de neumáticos enteros rellenos de material granular compactado) para muros de sostenimiento de tierras y de estabilización en pie de taludes, en estos casos rellenos de piedra machacada (fig. 1.12.), entre otros.

Fig 1.12.
Uso de neumáticos enteros para taludes.

Fig 1.13.
Neumáticos en trozos para relleno de terraplenes.

³ **CEDEX.** (2007). *"Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas"*. Madrid: Ministerio de Fomento.

Los neumáticos triturados en trozos o en tiras (fig. 1.13.) se pueden utilizar en: rellenos ligeros, sistemas de drenaje en carreteras, capas drenantes en vertederos para recogida de lixiviados, y aislamientos térmicos.

Como material granulado y polvo tiene aplicación en: materiales bituminosos para carreteras, campos de fútbol, pistas multiuso, pistas de atletismo y ecuestres, pavimentos de seguridad (parques infantiles, guarderías, residencias de ancianos), relleno de césped artificial, aislamiento térmico y acústico, calzado, etc.

Podemos destacar algunos usos como son:

La aplicación más extendida es en carreteras en forma de granulados para la fabricación de betún-caucho, o como áridos para las mezclas bituminosas como un betún modificado (Cedex).

La fabricación de betún-caucho se denomina también "vía húmeda". El método, desarrollado en los años 60 en Estados Unidos, consiste en la mezcla de caucho granulado, con un tamaño de partículas entre 0-0,850 mm, con el betún, a una temperatura entre 150° y 200°C durante un tiempo entre 1-2 horas hasta conseguir la unión físico-química de ambos componentes. Se suelen añadir diluyentes, aceites aromáticos y polímeros para conseguir una elevada viscosidad, recuperación elástica y adhesividad. Las aplicaciones de estos ligantes son en: membranas anti-fisuras, membranas impermeabilizantes en tableros de puentes, materiales para juntas de dilatación y masillas de sellado y ligantes para mezclas en capas de rodadura drenantes o delgadas.

Cuando se incorpora el caucho granulado sustituyendo parte del árido se denomina "vía seca". Mediante este procedimiento, desarrollado en Suecia en los años 60, se incorpora polvo de caucho en una proporción de entre el 3-5% de caucho en peso (Cao, W.). El caucho suele tener tamaños comprendidos entre 6,4-0,85 mm y el árido tiene una granulometría discontinua que permite la fácil integración de las partículas de caucho. Las mezclas obtenidas son muy flexibles, y son aplicables como capas de rodadura con diversas ventajas: menor influencia de la temperatura, elevada resistencia al agrietamiento, mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación, mejor comportamiento ante el hielo, reducción del nivel sonoro por rodadura, mejor adherencia de los vehículos, aumento de la vida útil del pavimento y disminución de costes de mantenimiento.

CAPÍTULO 1: Introducción

En el interior de terraplenes en forma de neumáticos troceados y granulados como material de relleno ligero. Se pueden usar solos o mezclados con tierra (Rodríguez R. et al). Sus principales ventajas son la utilización de grandes cantidades de residuos, su peso reducido, la mejora de la permeabilidad y la resistencia a la penetración de la helada, además de una elevada durabilidad. Aunque no es biodegradable y resiste las radiaciones ultravioletas, su utilización puede influir sobre el medio ambiente cuando se coloca bajo la capa freática. También se emplean como relleno de trasdós de muros de contención (Lee, J.H. et al), y como relleno de gaviones.

En pavimentos continuos y losetas de seguridad en pistas de atletismo, campos de juego, pistas infantiles, etc. Para ello se utiliza NFU granulado con tamaños entre 2 y 8 mm totalmente libre de acero. Entre sus ventajas están su ahorro en costes de mantenimiento, elevada resistencia climática, evita lesiones y se puede colocar sobre todo tipo de terrenos.

En relleno de balsas de filtración de aguas pluviales (ALIAPUR). Se ha patentado en Francia como "Draingon". Se emplea tanto neumático entero como troceado y entre sus ventajas esta su gran capacidad tanto de drenaje como de almacenamiento de agua, su no apelmazamiento y la resistencia a agentes químicos y microorganismos.

Como sistema de drenaje en vertederos (CIWMB), para el guiado del biogás y los lixiviados que se generan. Tiene la ventaja de ser drenantes y no reactivos y no son compactables y absorben bien los empujes debidos al desplome de residuos.

En forma de granulado entre 0,5-2,5 mm para relleno de césped artificial. Se necesitan entre 1 y 20 Kg para obtener 1 m².

3. Valorización energética

Debido a su alto poder calorífico, superior al del carbón, puede valorizarse energéticamente, sustituyendo a combustibles fósiles tradicionales, en centrales eléctricas y de producción de vapor y en diferentes industrias: cementeras, papeleras, cerámicas, etc.

En la UE se usa en un mayor porcentaje en la fabricación de cemento, pudiéndose sustituir hasta un 20% del combustible utilizado, incorporando el neumático entero, incluso su armadura metálica. Se consigue de esta manera una reducción de los óxidos de nitrógeno y del SO₂, en la composición de los gases emitidos, por tener los neumáticos un menor contenido en azufre que el resto de combustible empleado. Así mismo supone una disminución de emisiones de CO₂ debido al menor contenido de carbono en los neumáticos respecto a otro tipo de combustibles fósiles, y al contenido de caucho natural (biomasa que no computa a efectos de emisiones de CO₂).

	Toneladas 10³	%
GENERACIÓN*	305,71	100
RECAUCHUTADO**	37,17	12,16
MATERIAL RECICLADO	41,50	13,57
RECUPERACIÓN ENERGÉTICA	52,00	17,01
VERTIDO	155,29	50,79
EXPORTACIÓN***	19,76	6,46

* Incluye los neumáticos procedentes de los vehículos fuera de uso

** Fuente estimaciones AER

*** Fuente estadísticas DGA

Tabla 1.28.

Estadísticas NFU 2004 en España. Fuente: SIGNUS ECOVALOR.

El clinker obtenido sustituyendo en un 20% el combustible utilizado por neumático es similar al obtenido con el combustible tradicional. Para el aprovechamiento energético resulta más rentable el empleo de neumáticos troceados en dimensiones entre 50 y 300 mm, porque los neumáticos enteros requieren una inversión mucho mayor en la instalación y la obtención del polvo de caucho supone un coste superior al del combustible tradicional.

La valorización en energética que en España había llegado al 39% en 2010 ha disminuido desde el año 2011 por la caída en la construcción y por tanto de la disminución en la producción de clinker.

Otros tipos de valorización energética son los procesos de pirolisis y termólisis, pero todavía no se ha conseguido ni que los combustibles obtenidos a partir de NFU por estos procedimientos alcancen la pureza de sus equivalentes comerciales, ni que el negro de carbono llegue a sus propiedades mecánicas. El CSIC ha patentado un método para generar electricidad a partir de los destilados y gases generados por termólisis denominado "GRAUTHERMIC-Tyres" (López, F.A., Centeno, T.A. et al), que

CAPÍTULO 1: Introducción

parece viable para la valorización energética (premiado en el 2013 por el Foro Económico Astaná como mejor tecnología de la UE susceptible de aplicación industrial).

A pesar de la amplia gama de posibilidades de empleo, en España (Tabla 1.28.) no se aprovecha todo el potencial que tienen los neumáticos fuera de uso y las cantidades consumidas en aplicaciones de reutilización, reciclado y recuperación energética eran todavía inferiores a las consumidas a nivel europeo (Tabla 1.29).

	Toneladas 10³	%
GENERACIÓN	2.796	100
RECAUCHUTADO	325	12
MATERIAL RECICLADO	852	30
RECUPERACIÓN ENERGÉTICA	901	26
VERTIDO	524	19
EXPORTACIÓN*	194	7

*** Fuente estadísticas DGA

Tabla 1.29.

Estadísticas NFU 2004 en la Unión Europea. Fuente: BLIC.

1.2.5 El caucho

El caucho es un polímero que se puede obtener de forma natural o sintética. El caucho natural es un poliisopreno que surge de la emulsión lechosa de la savia, principalmente de la *Hevea Brasiliensis*. Aunque originario de la selva del Amazonas, actualmente la industria del neumático, su principal consumidor, tienen plantaciones en diferentes lugares del mundo, en las que para obtener mayores cantidades utilizan injertos genéticamente modificados.

El caucho natural tiene una densidad de 0,91kg/m³, baja conductividad térmica, no tiene plasticidad pero si es elástico, se oxida en presencia de oxígeno, envejece con la luz del sol, reblandece con el calor y endurece con el frío.

El caucho sintético es un polibutadieno obtenido por polimerización a partir de hidrocarburos insaturados. Sustituye al caucho natural cuando se quieren mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Mediante el proceso de vulcanización se calienta el caucho en presencia de azufre. Puede producirse a diversas temperaturas, desde el grado de fusión del azufre hasta los 160°. El grado de vulcanización del caucho depende de diferentes factores del

proceso: el tiempo, la temperatura, la presión y la cantidad de azufre añadida. Se consiguen así diferentes tipos de caucho sintético con distintas propiedades.

El resultado final es un material termoestable, duro, no degradable, resistente a la luz y a determinados químicos como los disolventes, todo ello sin perder la elasticidad y mejorando su resistencia a la deformación permanente.

1.2.6 Características del polvo de caucho (CEDEX)

Los neumáticos son estructuras elaboradas con más de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbono y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho. Las proporciones de estos componentes pueden diferir en función del fabricante y del tipo de neumático, aunque en general se aproximan a las que figuran en la tabla 1.30.

En la tabla 1.30. se distingue entre los neumáticos de turismo y camión por su distinto contenido de caucho, pero además se diferencian por las proporciones relativas de caucho natural y sintético, que afectan a las propiedades finales del producto. Por ejemplo el caucho natural se incorpora mejor al betún que el sintético.

En los neumáticos de turismo el contenido de caucho natural es del orden del 65% del caucho total, mientras que en los de camión es del 72% aproximadamente.

Los textiles que se incorporan suelen ser nylon, rayón y poliéster. Los componentes metálicos, acero de alta resistencia, aportan rigidez, resistencia y flexibilidad.

Entre los aditivos hay plastificantes, estabilizantes, colorantes, acelerantes y retardantes, cuya misión es modificar la dureza y resistencia del caucho e incrementar la resistencia a la abrasión, aceites, oxígeno, disolventes químicos y el calor.

La densidad de un neumático entero es de aproximadamente 0,15 t/m³. El poder calorífico es semejante al del carbón (6.800-7.800 kcal/kg) y aproximadamente un 70% de la del fuel-oil.

En la tabla 1.31 se refleja la composición química de los neumáticos usados. Esta composición es importante, ya que condiciona sus posibilidades de reutilización. Un componente importante en este aspecto es el azufre, que se incorpora durante el proceso de vulcanización, aporta resistencia y elasticidad, además de aumentar la

CAPÍTULO 1: Introducción

durabilidad del neumático. Su contenido en los neumáticos es de aproximadamente un 1%. El azufre no permite la reversibilidad del proceso y por tanto la reutilización del caucho para la fabricación de nuevos neumáticos, pero también impide la degradación del caucho. Esta característica tiene un aspecto negativo porque lo convierte en un material contaminante ambiental, pero por otro lado supone una ventaja para su reutilización al convertirse en un material muy estable e inalterable a las diferentes condiciones atmosféricas.

El negro de carbono, se incorpora en diferentes proporciones y aporta variaciones en la rigidez y en la resistencia a tracción y abrasión. Además, debido a sus propiedades antioxidantes y antiozono, reducen el envejecimiento del polvo de neumáticos, influyendo en la durabilidad de los ligantes bituminosos.

Material	Turismo %	Camión/autobus %
Caucho/Elastómero	48	43
Negro de Carbono	22	21
Metal	15	27
Textil	5	<1
Oxido de Zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	6

Tabla 1.30.

Composición ponderal aproximada de los neumáticos de turismo y camión en la UE.

(Fuente: ETRA, European Tyre Recycling Association)

Entre las características químicas propias de los NFUs están la resistencia a la acción de los mohos, del calor, la humedad, luz solar, rayos ultravioletas, algunos aceites y muchos disolventes. Además no son biodegradables, ni tóxicos y retardan el desarrollo bacteriológico.

La forma de trituración, la granulometría de las partículas y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil afectan también a las propiedades del polvo de caucho obtenido (Arroyo, M. et al).

El caucho de granulometría más fina tiene mayor superficie de contacto y en consecuencia la interacción con otros materiales es más rápida (tiempo de interacción proporcional al cuadrado del diámetro de las partículas en mezclas bituminosas) y en

el caso de mezclas bituminosas se consiguen mayores aumentos de la viscosidad (Rodríguez, R. et al). El inconveniente es que el polvo de caucho de granulometría más fina es más caro.

La textura afecta en el mismo sentido que la granulometría, cuanto mayor sea la rugosidad, más facilidad de reacción tendrá con otros materiales. Por tanto para una misma granulometría y un mismo origen del polvo de caucho, es de esperar una mayor interacción con caucho procedente de trituración mecánica, ya que con la molienda criogénica la superficie de las partículas es más lisa, y en consecuencia las superficies específicas son menores.

Elemento/Compuesto	Contenido	Unidad
C	70	%
Fe	16	%
H	7	%
O	4	%
Oxido de Zn	1	%
S	1	%
N2	0.5	%
Acido esteárico	0.3	%
Halógenos	0.1	%
Ligandos cupríferos	200	mg/Kg
Cd	10	mg/Kg
Cr	90	mg/Kg
Ni	80	mg/Kg
Pb	50	mg/Kg

Tabla 1.31.

Composición química de los neumáticos usados.

Fuente: Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Autores: Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M. (Fuente: OFEFP)

La densidad de una pieza individual de NFU está comprendida entre 1,15 y 1,45 t/m³. La densidad del material no compactado varía en función del tamaño y forma de los trozos, habiéndose obtenido valores entre 0,40 y 0,60 t/m³, mientras que para el material compactado los valores están entre 0,72 y 0,92 t/m³. La permeabilidad es elevada, semejante a la de las arenas finas, con coeficientes de permeabilidad en el entorno de 5 x10⁻² cm/s, dificultándose el ensayo de este parámetro.

CAPÍTULO 1: Introducción

Aunque según un estudio realizado por el Instituto de Biomecánica de Valencia (Rosa, D.) el caucho de nfu no debe ser considerado como un compuesto peligroso sobre la salud humana y el medio ambiente, presenta un inconveniente: su alto poder calorífico y la generación de gases nocivos para la salud durante su combustión.

Al polvo de caucho para materiales bituminosos se le exigen una serie de características físicas y químicas que condicionan finalmente el producto suministrado para otros usos.

Las especificaciones sobre composición química tienen como función principal asegurar que el material que se utiliza proviene del reciclado de neumáticos fuera de uso. Se exige que los contenidos de caucho natural, negro de carbono y extracto cetónico estén dentro de unos intervalos de valores y que el azufre y las cenizas no sobrepasen unos límites determinados.

Entre las características físicas exigidas están:

- El tamaño máximo y la granulometría de las partículas de polvo de caucho: inferiores a 2 mm. En el mercado si se fabrican tamaños mayores. La granulometría del polvo de caucho debe estar comprendida dentro de unos determinados usos de acuerdo a una tabla que se incluye en el manual del Cedex estableciéndose tolerancias (La determinación de la granulometría se hace de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1).
- La densidad relativa de las partículas de caucho debe estar comprendida en el intervalo de $1,15 \pm 0,05$ (según la norma UNE 53526). Porque la densidad relativa permite identificar el caucho de neumáticos frente a otros tipos.
- La humedad, porque puede producir espumas durante la fabricación. El contenido de agua deberá ser inferior al 0,75% (según norma UNE 103 300-3, excepto la temperatura de calentamiento en la estufa que será de $105 \pm 5^\circ\text{C}$)
- El contenido en contaminantes (metales, arenas y textiles) se limita para evitar deterioros en los equipos de manejo y pérdidas de características en los productos fabricados. El contenido de materiales ferromagnéticos no sobrepasará el 0,01% en peso del polvo de caucho y el contenido en materiales textiles no excederá el 0,5% en peso del polvo de caucho

1.3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este apartado se van a revisar tres aspectos:

- 1.- La incorporación de diferentes tipos de cargas a matrices de escayola.
- 2.- La incorporación de caucho NFU a diferentes conglomerantes.
- 3.- La incorporación de caucho NFU a matrices de escayola.

1.3.1 Incorporación de diferentes tipos de cargas a matrices de yeso o escayola.

Son muchas las investigaciones sobre la incorporación de distintos materiales a conglomerantes hidráulicos de yeso o escayola con el objetivo de mejorar alguna de sus propiedades.

En un primer apartado revisaremos aquellos estudios que incorporan cargas aligerantes y/o reforzantes. No se incluirán aquí los materiales procedentes del reciclado de residuos que se tratarán en un apartado diferente, porque teniendo en cuenta el terreno en el que se enmarca este trabajo, podemos hablar de una nueva línea de investigación, que puede nacer de cualquiera de las anteriores, y es aquella que incorpora materiales reciclados a matrices de yeso y escayola.

Aparte de estas dos líneas principales, queremos hacer referencia a la tesis de Alicia Oliver Ramírez (2009) que lleva por título *"Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios"*. Propone un material compuesto en el que incorpora un elevado porcentaje de parafina microencapsulada, como material de cambio de fase, y una pequeña cantidad de fibra de polipropileno y melamina formaldehído, con lo que consigue un material que, manteniendo unas propiedades mecánicas aceptables, es capaz de almacenar una cantidad de energía por unidad de masa tres veces superior a la de una placa de yeso convencional.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.3.1.1 Incorporación de cargas aligerantes y/o reforzantes

Revisaremos en primer lugar la incorporación de cargas aligerantes, posteriormente la de cargas reforzantes y en último lugar aquellos estudios en los que se combinan agregados aligerantes y reforzantes con el objetivo de obtener un producto con propiedades mejoradas.

Cuando se incorporan **áridos aligerantes**⁴ se busca en general:

- Reducir la densidad para facilitar el transporte y puesta en obra en el caso de elementos prefabricados y para evitar el exceso de carga añadida en rellenos en rehabilitación de edificios.
- Mejorar el aislamiento térmico (minorando el coeficiente de conductividad térmica), el aislamiento acústico (a ruido de impacto y mejorando el coeficiente de absorción acústica) y el comportamiento ante el fuego (incremento de su resistencia al fuego).

Pero se producen empeoramientos en las resistencias mecánicas y la dureza superficial.

En los resultados influye el porcentaje de adición y el tamaño de las cargas añadidas.

Se han encontrado productos comerciales, estudios y patentes que incorporan diferentes materiales.

Entre los productos comerciales encontramos, en diferentes empresas, varios que incorporan perlita y otros con vermiculita, tanto en prefabricados como en producto para proyectar de yeso y escayola.

Con la incorporación de perlita se ofrecen productos que disminuyen la densidad, mejoran el comportamiento térmico y acústico y la protección contra el fuego. Así las empresas Algiss y Saint-Gobain Placo Ibérica ofrecen yeso manual y de proyección mecánica aligerado con perlita.

⁴ Un árido se considera ligero cuando la densidad real del grano es inferior a 2 gr/cm³ (UNE 83-101-90).

La vermiculita se emplea en morteros de proyección para interiores para protección contra el fuego, entre ellos podemos citar los productos Vermiplaster de Knauf e Igniver de Saint-Gobain Placo Ibérica.

De los estudios sobre inclusión de cargas aligerantes hay que destacar la tesis de Mercedes del Rio Merino (1999) *"Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos"* en la que analiza en una primera parte las posibilidades de los materiales compuesto por escayola con arcilla expandida, perlita, vermiculita, poliestireno expandido y corcho. En general con todos ellos se produce una reducción de peso pero también disminuyen en gran medida las resistencias mecánicas. En esta primera parte de la tesis selecciona el corcho como producto más interesante de entre los ligeros por las propiedades que puede aportar de mejora de propiedades térmica, acústicas, y seguridad frente al fuego e impacto. En fases posteriores a las que nos referiremos más adelante incluye en este compuesto materiales de refuerzo para mejorar sus propiedades mecánicas.

En la misma línea, M. del Rio et al. (1998) en el artículo *"Escayola aligerada con sólidos celulares"* estudia, de entre las cargas celulares utilizadas en construcción como aligerantes, cuáles son las más apropiadas para la prefabricación de elementos de escayola para mejorar su transporte y puesta en obra. Diferencia dos grupos entre las cargas de relleno: Aridos ligeros (arcilla expandida, perlita y vermiculita) y granulados ligeros (poliestireno expandido y corcho natural). Los porcentajes de adición de las distintas cargas son muy diferentes, varían desde el 3% para el poliestireno expandido hasta el 60% en la arcilla expandida. Con el primer grupo se obtienen compuesto menos ligeros que con el segundo pero con mejor comportamiento a flexión y compresión. Pero como conclusión final considera válidos todos ellos dependiendo su elección de la aplicación constructiva que se pretenda.

En cuanto a patentes podemos citar algunas de las múltiples encontradas:

- Mortero de yeso (o cemento) con perlita expandida o poliestireno expandido en bolitas para recrecido de suelos con propiedades ignífugas y aislantes y considerable reducción de peso en obra.
- Mortero de yeso con vermiculita expandida y aditivado para aplicaciones ignífugas y para aislamientos térmicos y acústicos mediante aplicación

CAPÍTULO 1: Introducción

manual o por máquina de proyectar y aplicable en placas de revestimiento (2009).

- Otras incorporan huesos de frutos pirolizados (propiedades aligerantes, aislantes y absorbentes), carbón vegetal (absorbe humedades, olores y efecto drenante), etc.

Para **reforzar las matrices de yeso** se añaden cargas **en forma de fibras**, buscándose mejorar el comportamiento físico-mecánico mediante aumento de la resistencia a flexotracción, aumento de la tenacidad y mejora ante impacto. Además se consiguen mejores comportamientos ante el fuego.

En los resultados influyen las longitudes de las fibras y su porcentaje de adición.

La fibra de vidrio es la carga reforzante incorporada en los productos comerciales, en forma de placas de escayola para falsos techos o mediante productos de escayola muy fina para formar un composite con la fibra de vidrio aplicando sobre un molde capas finas de escayola intercaladas con láminas de tejido de fibra de vidrio, que al fraguar tienen excelente propiedades mecánicas y se emplean en la elaboración de decoraciones ligeras y resistentes.

Se han encontrado tres tesis doctorales que analizan el uso de cargas reforzantes en conglomerantes de yeso o escayola.

La primera del año 1988 de Alfonso García Santos *“Modelo teórico del comportamiento mecánico del yeso y sus compuestos fibrosos poliméricos”*, analiza el comportamiento mecánico de la escayola reforzada con diversas fibras poliméricas (acrílicas, polipropileno y poliéster) y dispersiones (melanina-formaldehído, acetato de polivinilo y ácido acrílico) de forma individual y en sus mezclas binarias.

La siguiente en orden cronológico, del año 1993, de Ignacio Oteiza Sanjosé *“Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste”* analiza los mecanismos de interacción fibra/matriz en las prestaciones mecánicas del compuesto de escayola reforzada con fibras de sisal distribuidas de forma aleatoria. Concluye con el incremento de la tenacidad y la incidencia de las propiedades de la longitud de las fibras, fracción volumétrica y relación agua/yeso. Así mismo analiza el comportamiento a fuego.

Por último en la tesis mencionada anteriormente de Mercedes del Rio se analizan los compuestos de escayola reforzada con fibra de vidrio E y AR con diferentes longitudes, entre 12 y 50 mm y diferentes porcentajes de adición entre 0,5 y 2,5%, y combinándolas con distintos aditivos, consiguiendo mejoras en la dureza superficial y la resistencia a flexión.

La fibra de vidrio E es el material más utilizado actualmente en elementos prefabricados de yeso y escayola porque a través de varios estudios se ha comprobado la mejora de la tenacidad, módulo de young, resistencia a flexión, impacto y mejor comportamiento ante el fuego. Hay numerosos estudios sobre el tema que analizan en refuerzo sólo con fibra de vidrio E o combinada con otros materiales: Entre los estudios que analizan el resultado de utilizar sólo fibras de vidrio E, podemos mencionar: *"Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E"* (M. del Rio et al, 2004) en el que se concluye como más idóneo el refuerzo de yeso/escayola mediante la adición de fibra corta de 25 mm de longitud, en un 2% del peso de conglomerante para, manteniendo la trabajabilidad, mejorar la resistencia a flexión.

Entre los que combinan la fibra de vidrio E con otros elementos encontramos: *"Escayola reforzada por acción sinérgica entre aditivos del hormigón (fluidificantes, superfluidificantes y aireantes-plastificantes) y fibras de vidrio E"* (M. del Rio et al, 2000) en el que se comprueba la existencia de esa acción sinérgica por la mejora de la resistencia a flexión para determinadas dosificaciones de aditivo y refuerzo de fibra de vidrio E y *"Análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en la escayola, como alternativa a los refuerzos monofibras (homogéneos)"* (M. del Rio et al, 2002).

Son varias las patentes de escayola con fibra de vidrio con el fin de conseguir los diferentes objetivos descritos anteriormente en los diversos estudios y también las patentes sobre procedimientos de fabricación de placas con fibra de vidrio.

Dado que el mayor inconveniente de la incorporación de cargas aligerantes es la pérdida de resistencia a flexotracción, algunos estudios se han encaminado a la combinación de **cargas aligerantes**, que reducen la densidad y/o mejoran sus propiedades térmicas y acústicas, y **cargas reforzantes**, que evitan la pérdida de resistencia a flexotracción. En este campo encontramos algunas propuestas de nuevos materiales.

CAPÍTULO 1: Introducción

Tenemos que volver a hacer referencia a la tesis de Mercedes de Rio, en la que finalmente propone y caracteriza un material compuesto de yeso aligerado con corcho y reforzado con fibras de vidrio E, con el que mantiene las propiedades mecánicas y consigue mayor ligereza y mejora en el coeficiente de conductividad térmica. A raíz de esta tesis se propone la patente *“Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción”*, con un contenido del 20-25 % de desechos de corcho en forma de granulado (se puede sustituir el corcho natural por un 3 % de perlas de poliestireno expandido de diámetro 3-5 mm), 2 % de fibra de vidrio E y Superfluidificante Melment L-10 o Sikament FF en una proporción del 0,5 % para el primero y un 1 % para el segundo.

Otro material en el que se combinan ambos elementos es la *“Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido”* (A. García Santos, 2009). Con una adición del 2% de fibras de polipropileno y el 2% de granulado de poliestireno expandido, consigue según las conclusiones del autor un incremento de la resistencia a flexión, disminución de la densidad y ausencia de rotura frágil.

1.3.1.2 Incorporación de cargas procedentes de reciclado

Esta es una nueva línea de investigación surgida por el interés en la reutilización de materiales tanto de residuos de tipo industrial como de residuos de construcción y demolición e incluso de residuos naturales con el objetivo de proteger el medio ambiente. En este campo se han encontrado estudios que incorporan los siguientes materiales:

- Papel reciclado y cortado de periódico y de imprenta (offset) y partículas de madera de pino. C.R. Haselein (2002) elabora paneles prensados en frío que contienen estos materiales como fibras de refuerzo. Los resultados de los ensayos indican una mejora importante en la resistencia a flexión con el papel de periódico (8,35 MPa para 0,4 de A/Y y 6,06 MPa para 0,8 de A/Y), algo menor con las partículas de madera de pino (4,13 para 0,4 de A/Y) y muy bajos para papel de imprenta en relación a las muestras de referencia (2,14 para 0,4 de A/Y).
- Residuos de poliestireno expandido (EPS). En la tesis y posteriores trabajos desarrollados por Francisco Javier González Madariaga (2008) se elaboran

paneles y placas para aplicación constructiva que contienen el material indicado en pequeñas proporciones, obteniéndose para las mezclas con un contenido de molido de EPS más bajo (1,6%), un producto más ligero, con buenas características de reacción al fuego, pero con importante pérdida de resistencia respecto a los elementos de referencia, aunque en parte lo atribuye a la rica proporción de agua que eleva la porosidad y lo hace más débil.

- Residuos de espuma poliuretano. S. Gutiérrez-González et al (2012), incorporan diferentes fracciones de residuos de espuma de poliuretano en polvo gris y blanco (con diferente tamaño de grano) a una matriz de yeso. Los resultados muestran una disminución de la densidad y la resistencia mecánica y un menor coeficiente de conductividad térmica (se consigue una disminución hasta del 66% inferior a la muestra de referencia) a medida que se incrementa el porcentaje de residuo. Como consecuencia de este trabajo se solicita la patente "Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado" que 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 que tras su molido se incorporan al yeso en diferentes granulometrías en función de su uso.
- Residuos de polvo de poliamida. S. Gutiérrez-González et al (2012), incorporan diferentes fracciones de residuos de polvo de poliamida a una matriz de yeso. Los resultados muestran una disminución de la densidad y la resistencia mecánica y un menor coeficiente de conductividad térmica (se obtienen valores hasta un 55% inferiores a los de la muestra de referencia) a medida que se incrementa el porcentaje de residuos. Como consecuencia de este trabajo se solicita la patente denominada "Procedimiento de obtención de placas de yeso laminado con residuo de poliamida en polvo" preparación y fabricación de placas de yeso laminado aligerado, en la mezcla de yeso, agua y diferentes sustituciones de yeso por poliamida en polvo como residuo derivado de la industria, con la posible incorporación de fibras de refuerzo, con el fin de obtener nuevos materiales prefabricados ligeros de uso en la construcción con condiciones térmicas mejoradas.

CAPÍTULO 1: Introducción

- Residuos de placas de yeso laminado. A. Rodríguez Orejón (2010) estudia la utilización de residuos de placas de yeso laminado cocido (YLC) de distintas granulometrías, preferentemente gruesas, porque se reduce el tratamiento del residuo. Obtiene un material de mayor resistencia y dureza. De las muestras estudiadas la que da mejores resultado es la que contiene un 5% de YLC de la granulometría más gruesa de 1,25 mm. Y concluye que los productos obtenidos son aptos para su utilización en edificación.
- Caucho de residuos procedentes del aislamiento de espuma de tubería. Jiménez Rivero, A. et al (2014) estudian las posibilidades de la adición de diferentes proporciones de partículas de material a una matriz de yeso. El máximo porcentaje de adición es del 7,5%, el tamaño más adecuado es de 4-6 mm y se produce como en otros materiales reducción en la densidad y las resistencias mecánicas.

Se tiene también conocimiento de diversos trabajos que se han hecho recientemente en la ETSEM, que estudian la incorporación de los siguientes residuos: esponja vegetal, plumas de pollo, cáscara de mejillón, etc.

Se podría haber incluido también en este apartado el compuesto de yeso con corcho mencionado en el apartado anterior.

1.3.2 Incorporación de caucho NFU a morteros de cemento y hormigones

La documentación encontrada sobre la adición de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, ya sea en polvo o en forma de fibras, en morteros de cemento y hormigones es extensísima. Se han estudiado los hormigones tanto estructurales, como no estructurales, autocompactantes y prefabricados.

Se comprueba en todos los casos la importante pérdida de resistencia del hormigón a tracción y a compresión, siendo esta última mayor cuando se sustituye el árido grueso en lugar del árido fino. Se observa también una disminución del módulo de elasticidad que indica una mayor elasticidad, produciéndose también una mayor resiliencia y durabilidad. Otra de las características destacadas en general es su baja densidad.

Las primeras referencias encontradas de Eldin, N. et al (1993) planteaban la posibilidad de utilizar como agregado para la elaboración de hormigones diferentes cantidades de partículas de caucho granulado de varios tamaños como posible solución para la eliminación de los neumáticos.

Utiliza dos tipos de caucho, uno procedente de molienda mecánica y otro de molienda criogénica. Los de trituración mecánica son de tres tamaños máximos diferentes (19, 25 y 38 mm); los de tratamiento criogénico de dos tamaños máximos diferentes (2 y 25 mm). Sustituye el agregado grueso por caucho con incrementos de 25% en volumen (25, 50, 75 y 100%), excepto el de 2 mm que utiliza para sustituir el agregado fino. Las sustituciones del agregado grueso producen pérdidas de hasta el 85% en compresión y de hasta el 50% en tracción. Las del agregado fino produjeron pérdidas de hasta el 65 % de su resistencia a la compresión y hasta 50 % de su resistencia a la tracción. Sin embargo, destacaba la ausencia de rotura frágil, observándose la capacidad de absorber una gran cantidad de energía plástica bajo cargas de compresión y tracción.

Para determinar la tenacidad, calculó el área debajo de la parte plástica de la curva de tensión-deformación, para las muestras que contenían 100% de agregado de caucho en dos grupos y para las probetas de hormigón sin caucho determinando previamente las ecuaciones polinómicas de ajuste de las curvas. Concluye que las muestras que contienen caucho tienen alta tenacidad puesto que la mayoría de la energía total generada es plástica. (En un material frágil la mayor cantidad de energía es elástica).

Considera que debido a su bajo módulo de elasticidad, las partículas de caucho se comportan como inclusiones débiles en la masa de hormigón endurecido (los denomina poros). Asimila las partículas procedentes de molienda mecánica a vacíos con forma elíptica y las de molienda criogénica a débiles inclusiones esféricas en la masa de hormigón endurecido. Propone diferentes modelos para describir los efectos de los agregados de caucho en ambos casos, en el comportamiento mecánico, concluyendo que la forma de rotura es diferente.

Entiende que los granulados de caucho (debido a su bajo módulo de elasticidad) actúan como poros grandes que no tiene un papel significativo en la resistencia a las cargas aplicadas externamente y utiliza un modelo matemático de Popovics (1987) para describir cuantitativamente los efectos de la macroporosidad (contenido de aire y

CAPÍTULO 1: Introducción

poros grandes) en la reducción de la resistencia del hormigón. Compara los valores obtenidos experimentalmente para las resistencias a compresión y a tracción con los obtenidos utilizando este modelo matemático e indica que este parece describir con bastante precisión los efectos de los agregados de goma en las resistencias a la compresión y tracción de hormigón. Por tanto la disminución de resistencia la atribuye no sólo a la disminución del material de la matriz sino a que el debilitamiento producido por el efecto de la macroporosidad del caucho aumenta por la concentración de tensiones en el límite entre la pasta y el agregado de caucho.

Además de Eldin, otros autores propusieron modelos para estimar la reducción de **la resistencia y el módulo de elasticidad**. Es el caso de Pierce et al (2004) que plantearon un modelo exponencial o Khatib et al (1999) cuya propuesta era un modelo potencial para cuantificar la reducción de la resistencia a compresión.

En estudios posteriores de Toutanji (1996) sustituía el árido grueso en el hormigón por caucho de neumáticos fuera de uso en porcentajes del 25, 50, 75 y 100 %. Observaba la reducción en la resistencia a flexión y a compresión, siendo esta última muy superior. Destacaba que aunque la resistencia disminuía con el incremento del contenido de caucho en volumen, la relación no es lineal. Nuevamente comprueba la tenacidad del compuesto, que muestra una rotura dúctil deformándose significativamente antes de la fractura. Pero la tenacidad se mantenía constante para las muestras con 50 y 100% de agregados de caucho.

Fattuhi & Clark (1996) relacionan la reducción de la resistencia a compresión con la densidad y Fedroff (1996) obtenían también reducciones en la resistencia y la rigidez.

Khatib et al (1999) evaluaron la viabilidad de la producción de mezclas que incorporaran caucho de neumáticos, en forma de granulado fino y virutas, en sustitución parcial del árido como alternativa a los hormigones convencionales. Los resultados mostraban como viables aquellas mezclas que contenían hasta un 57% de caucho de neumáticos del volumen total agregado, pero debido a las grandes reducciones de resistencia sugerían que no debían superar el 20%.

Varios autores consideraron que la pérdida de resistencia estaba motivada en gran medida por la **falta de adherencia entre el caucho y la matriz**, ya Eldin lavaba el caucho para evitar su contaminación y mejorar la adherencia con la matriz. Otros utilizaron procedimiento de tratamiento previo del caucho. Rostami et al (1993) con

CCl_4 , que aunque resultó eficaz hubo que descartarlo por su toxicidad. Segre et al (2000) y Li G. et al. (2004) trataron el caucho con NaOH, con resultados dispares. Albano et al (2005) con una solución de NaOH y con un agente de acoplamiento de silano A-174.

Segre et al (2000) para modificar la superficie del caucho de neumáticos en polvo y así aumentar su adherencia a la pasta de cemento, trato las partículas superficialmente con soluciones acuosas saturadas de NaOH durante 20 min. Elaboró muestras con contenidos del 10% de caucho no tratado y 10% de caucho tratado con NaOH con las que realizó diferentes ensayos: Microscopía electrónica de barrido (SEM), absorción de agua por capilaridad, densidad, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia a la abrasión y módulo de elasticidad. La microscopía electrónica mostraba que el tratamiento superficial de NaOH aumenta la adhesión de la matriz, mejorando también en las muestras que contienen caucho sin tratar la resistencia a la abrasión, y aunque se producía una reducción de la resistencia a la compresión de un 33%, era inferior a la que se producía en las muestras sin tratar de alrededor del 60%. Disminuye también la densidad, la absorción de agua y la porosidad al mejorar la adhesión.

Li G. et al. (2004) investiga diversas variables (tratamientos con NaOH, el anclaje físico, las dimensiones de la fibra, el origen de los neumáticos, y el refuerzo con fibra híbrida), con el objetivo de mejorar la resistencia, partiendo de caucho de neumáticos en dos configuraciones: granulados y fibras. Reemplaza el 15% del agregado grueso por caucho. En todos los casos se mantenía la trabajabilidad, disminuía la resistencia y mejoraba la tenacidad.

Entre las variables analizadas se encuentra la del tratamiento superficial de las partículas de caucho con una solución saturada de NaOH. No obtiene mejoras en relación con las muestras que contienen caucho sin tratar justificando las diferencias con los estudios de Segre et al por el tamaño del grano. Segre utiliza polvos de caucho con un área superficial más grande y por tanto con una mayor superficie de contacto que favorece la reacción química.

La resistencia es mayor en los compuestos con caucho en forma de fibras que en forma de granos y mejor en fibras finas que gruesas, aunque en este aspecto el efecto no es muy significativo. Sería necesario hacer más estudios sobre este aspecto buscando fibras de espesor óptimo y desarrollando máquinas de corte adecuado.

CAPÍTULO 1: Introducción

Atribuye la mayor resistencia de las fibras a que con una mayor longitud pueden transferir la carga aplicada a través de las fuerzas de fricción interfacial.

Comprueba que la resistencia disminuye a medida que la longitud de la fibra aumenta utilizando tres longitudes diferentes 25,4, 50,8, 76,2 mm. Las fibras más largas tienden a enredarse y no se distribuyen uniformemente recomendado limitar la longitud a valores inferiores a 50 mm. Las fibras de neumáticos de camión dan mejores resultados que las de coche y también las que mantienen las fibras de acero.

Otro procedimiento que utiliza es el anclaje físico mediante la perforación de un agujero de 5 mm de diámetro en el centro de los trozos de caucho. La idea era que penetrara una pequeña cantidad de pasta de cemento a través del agujero. Se obtuvo sólo una ligera mejoría en la resistencia y se observó que el agujero en muchos casos se había cerrado debido a la flexibilidad del caucho.

Utilizando un concepto similar al de Hernández Olivares et al (2002) probaron también un refuerzo híbrido de fibras de caucho y fibras de polipropileno en una proporción de 0,1 % en volumen de hormigón y una longitud de 50,8 mm de largo, similares también a las empleadas por Hernández Olivares. Se consiguieron valores considerablemente más altos de resistencia y tenacidad que en las muestras que sólo contenían caucho. Pero en comparación con el hormigón de control, la resistencia a la compresión se redujo en un 27,5% y la resistencia a la tracción en un 11,8% en los ensayos de Hernández Olivares, mientras que para Li eran de 35,6% y 13,5%, respectivamente. Li consideraba que se debía a que utilizaba fibras más gruesas.

Albano et al. (2005) también emplearon el caucho sin tratar y tratado con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y con un agente de acoplamiento de silano A-174, con el propósito de mejorar la adhesión interfacial entre el hormigón y el caucho. Sustituía parte del árido fino por el caucho en porcentaje en peso del 5% y el 10% y tamaños de partícula de 0,29 mm y 0,59 mm, manteniendo constante la relación agua cemento. Obtiene disminuciones en la densidad en las partículas de tamaño 0,59 mm en valores entre 20-29%, para 5% y 10% de caucho en peso respectivamente, con un efecto más pronunciado para las partículas de caucho más pequeñas (22-38%), debido a la mayor porosidad del material compuesto obtenido. Los resultados mostraban la mayor influencia del porcentaje de caucho que el efecto del tamaño de partícula.

Observa una disminución drástica en la resistencia a la compresión para compuestos de hormigón con residuos de caucho en comparación con las mezclas tradicionales de hormigón (para 5% en peso de caucho y 0,59 mm de tamaño de partícula, se observa una disminución de aproximadamente 60%; para 10% en peso, 88%). Las tendencias eran similares para los dos tamaños de partículas, pero en el tamaño más pequeño los valores de resistencia a compresión eran aún más bajos, ya que las partículas de caucho pequeñas originan mayores vacíos intersticiales. La disminución de la resistencia a tracción es menor que a compresión, justificándolo porque el agregado grueso, que en este estudio no se sustituye por caucho, tiene mayor efecto sobre la resistencia a la tracción que en la resistencia a la compresión.

También comprueba la influencia del porcentaje y tamaño de partícula en la velocidad ultrasónica. Las reducciones en la velocidad ultrasónica son superiores para las partículas de menor tamaño y también al aumentar el contenido de caucho. Justifica los resultados para el tamaño más pequeño por la mayor porosidad y la mayor presencia de aire y agua que puede producir absorción ultrasónica en el material. A partir de los datos obtenidos determina el coeficiente de atenuación del material como una función del porcentaje del compuesto con un ajuste exponencial.

En la línea de búsqueda de aplicaciones por la mejora de la elasticidad encontramos el trabajo de Topcu, I. B. et al (1997) que tiene como objetivo conseguir mejoras en la ductilidad y durabilidad del hormigón mediante la inclusión de caucho, para encontrar nuevas áreas de uso en construcción de carreteras y en barreras acústicas como amortiguador de sonido y también para absorber ondas en los edificios en caso de terremotos.

Para determinar las constantes elásticas y mecánicas del hormigón con caucho elaboró muestras que contenían caucho en diferentes proporciones en volumen (15, 30, y 45%) y en diferentes tamaños y formas (polvo, fibras, etc.) y añadió piedra caliza molida fina y gruesa. Consideró al material compuesto formado por tres fases (mortero, árido y caucho) y basándose en la ley de mezclas propuso una ecuación para determinar el módulo de elasticidad, confirmando su validez mediante la comparación con los resultados experimentales.

Hernández-Olivares et al. (2002) incorporaba al hormigón fracciones volumétricas de fibra de caucho (3,5 y 5 %) y de polipropileno obteniendo variaciones poco significativas de las características resistentes del hormigón, tanto en los valores de

CAPÍTULO 1: Introducción

tensiones máximas como en los módulos elásticos, aunque observaba que tanto los módulos estáticos como los dinámicos disminuían al aumentar la fracción volumétrica de caucho. Destacaban la diferencia registrada en la parte de la gráfica Tensión/Deformación posterior a la tensión máxima (crecimiento de fisuras en el seno de la matriz de hormigón), ya que en un hormigón sin fibras ensayado a flexión, no existe esta rama de la gráfica (el crecimiento de las fisuras supone la rotura de la probeta), mientras que en el reforzado con fibras, éstas impiden el crecimiento de las fisuras y permiten al hormigón mantener un remanente de carga a altas deformaciones. Cuando no había fibra, se produjo una falla frágil, mientras que la adición de fibra produjo una ligera disminución de fuerza, pero sin la separación de los bordes de fisura.

Concluían que en la rama elástica del diagrama Tensión/Deformación las características de comportamiento del material le vienen dadas por la matriz de hormigón, y de hecho, la fibra supone defectos en la estructura del mismo, que le llevan a mermas de resistencia y disminución de la rigidez. En cambio, cuando se supera la resistencia última la fibra colabora con el hormigón impidiendo la apertura de las fisuras y, por tanto, aumentando la capacidad de absorción de energía por deformación (tenacidad). Esta característica del compuesto es atribuible a la diferencia de rigidez (módulo de elasticidad) de los componentes.

Así mismo destacaba el porcentaje elevado de energía específica que se disipa (entre el 23% y el 30%), lo que hace de este material con elevados contenidos en caucho reciclado de neumáticos un candidato óptimo para absorber y disipar energía ante acciones dinámicas, sin sufrir daño.

Benazzouk et al (2003) con el objetivo de mejorar la deformabilidad estudia un material compuesto con pasta de cemento a la que incorpora fracciones volumétricas entre 0 y 50% de granulados de caucho. Estos proceden de productos industriales de automoción, no de neumáticos y son de dos tipos: unos tienen superficies lisas y baja porosidad (CRA) y otros son agregados blandos (ERA) con alta porosidad. Estudia la influencia del tamaño de partícula y el contenido de volumen en las propiedades físico-mecánicas en la pasta de cemento, con énfasis en la importancia de la textura alveolar del caucho. Relacionó la textura de los granos de caucho con la resistencia y el módulo de elasticidad, concluyendo que los granos rugosos dan mejor resultado que los lisos.

Mediante el análisis de la deformación usando curvas de tensión-deformación caracteriza la transición del material frágil a material dúctil, con aditivos de caucho superiores a 10 %. Comprueba que la adición de agregados de caucho reduce la fragilidad mediante el aumento de la fase plástica. El comportamiento dúctil es más predominante cuando el tamaño del agregado de caucho aumenta y el agrietamiento es menor. Para estimar la ductilidad calcula el índice de fragilidad (BI) definido como la relación entre el área bajo la curva en deformación elástica y el área bajo la curva en deformación plástica.

Concluye que la disminución del módulo de elasticidad revela la capacidad de los compuestos tanto a reducir la intensidad del sonido y las vibraciones y por tratarse de un material altamente deformable propone su uso como para aplicaciones en las que se deba evitar el riesgo de agrietamiento.

Hernández-Olivares, F. et al. (2004) experimentan con la adición de fracciones volumétricas (0, 3, 5 y 8%) de caucho reciclado en forma de fibras cortas en hormigones de alta resistencia con humo de sílice con el objetivo de reducir la rigidez y mejorar el rendimiento a fuego. Se produce una pequeña reducción de la resistencia a compresión (para 3% de caucho, 10% de reducción de resistencia mecánica), Pero se comprueba que aumenta su elasticidad, resultando interesante cuando se necesitan materiales dúctiles manteniendo una alta resistencia. Mejora el comportamiento ante el fuego, por reducción de la profundidad del daño producido, lo que deriva en un aumento de la seguridad en los hormigones de alta resistencia. Al quemarse las partículas de caucho se producen canales abiertos que permiten el escape del vapor de agua, reduciendo la tensión debida a la presión de vapor.

Turatsinze, A. et al. (2005) comprueba la utilidad para evitar la fisuración y así aumentar la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Khaloo et al (2008) sustituye los áridos en hormigón en masa por caucho en polvo (los áridos finos) y en forma de virutas (los áridos gruesos) y combinados. Las sustituciones son del 12,5%, 25%, 37,5% y 50% en volumen del agregado mineral total. Obtiene una trabajabilidad aceptable, aunque mejor con partículas finas. Aumenta el contenido de aire y se reduce la densidad (mayor en la sustitución de áridos gruesos). Las grandes reducciones de resistencia y módulo de elasticidad hacen que no recomiende concentraciones mayores del 25%.

CAPÍTULO 1: Introducción

Observa un comportamiento más dúctil. A diferencia de hormigón en masa, la rotura del hormigón con caucho no se produce de forma rápida y no se produce ningún desprendimiento de elementos de la muestra. El ancho de las fisuras en el hormigón con caucho es más pequeño que la del hormigón en masa, y la propagación de los síntomas de insuficiencia es más gradual y uniforme. La rotura del hormigón con caucho en comparación con hormigón en masa se caracteriza por una mayor deformación.

Debido al bajo módulo de elasticidad con respecto a los agregados minerales, los agregados de goma actúan como poros grandes, y no contribuyen significativamente a la resistencia a las cargas aplicadas. Esto supone una reducción de la sección transversal efectiva de las muestras que disminuye de acuerdo con la concentración de partículas de neumáticos de esa muestra. Por ejemplo, calcula que para una concentración total de neumáticos de 20 % del volumen total de hormigón reduce la sección transversal efectiva en un 34 %.

Al analizar las curvas de tensión-deformación comprobaba que los resultados de las mezclas combinadas de partículas de neumáticos estaban entre las correspondientes a las muestras no combinadas con la misma concentración total de caucho. La respuesta a tensión-deformación de las mezclas combinadas demuestra que la tensión máxima del hormigón con caucho combinado depende principalmente de la concentración de agregado fino, mientras que la forma de la curva de tensión-deformación depende de la concentración de agregado grueso. Estos hallazgos revelan que, aunque las propiedades mecánicas del hormigón con caucho dependen principalmente del contenido total de caucho, se pueden ajustar las concentraciones de partículas gruesas o finas para obtener un comportamiento diferente.

Calcula los índices de tenacidad para las diferentes concentraciones de caucho y las diferentes mezclas. El hormigón con caucho tenía una mayor tenacidad en comparación con el hormigón sin caucho. Los máximos índices de tenacidad se encuentran para concentraciones de caucho en torno al 25 % del volumen total agregado. Más allá de las concentraciones de caucho del 25 %, los índices de tenacidad disminuyen debido a la reducción sistemática en la resistencia.

Turki, M. et al (2009) hacia una sustitución parcial de la arena por partículas de caucho en morteros. El tamaño de las partículas de caucho estaba entre 1 y 4 mm y la sustitución en volumen entre 0 % y 50 %. Su objetivo era estudiar el comportamiento

de la microestructura de los agregados de caucho introducidos en el mortero, centrando la atención en la fuerte relación entre la microestructura compleja y las propiedades mecánicas. No emplea la porosimetría por intrusión de mercurio porque dice que en este tipo de materiales sobreestima el volumen de poros capilares finos y subestima el volumen de poros capilares gruesos. En su lugar realiza un estudio por microscopía electrónica de barrido, que muestra la existencia de espacios vacíos entre la matriz y el agregado de caucho. Parece que existen al menos dos tipos de porosidad, en la matriz cementosa y alrededor de los agregados de caucho. Hay que tener en cuenta de manera especial el fenómeno de la doble porosidad (en el mortero y alrededor de los agregados de goma).

Las muestras de referencia presentaban porosidad uniforme (diámetro promedio 2) y las que contenían agregados de caucho heterogénea, pequeños y grandes poros con formas irregulares (diámetros entre 3,8 μm y 13,7 μm). Los microporos se generan en torno a los agregados de caucho, en la zona de transición interfacial, es decir disminuye la adherencia y en consecuencia la resistencia tanto a flexión como a compresión, que se reducen significativamente a medida que aumenta la proporción de caucho.

Con el aumento de cantidad de caucho, se observa también una disminución de la velocidad ultrasónica longitudinal: esta disminución revela la capacidad del compuesto para reducir tanto la intensidad del sonido como para amortiguar las vibraciones. Pero no considera fiable las mediciones obtenidas del módulo de elasticidad dinámico en el caso de las mezclas de mortero con agregados de caucho, por la dificultad de obtener para estos materiales el módulo de Poisson. Sin embargo si le parece que se puede dar validez a la información dada por el índice de continuidad de Gorisse, F. (1978) para obtener la resistencia a la compresión. Además la fuerte relación entre el índice de continuidad y las discontinuidades materiales, es decir, zonas con material, porosidad y zonas de transición interfacial, sugiere que es un instrumento útil para comprender mejor la microestructura del compuesto.

En la línea de estudio del **comportamiento térmico** Benazzouk et al (2007) incorpora partículas de caucho de tamaño inferior a 1 mm (pero como se decía anteriormente procedentes de la trituración mecánica de residuos del automóvil, no de neumáticos, con un 20 % en volumen de fibras sintéticas), a una matriz de cemento en fracciones volumétricas de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. Obtiene una reducción en los

CAPÍTULO 1: Introducción

valores de conductividad térmica de 1,16, para la pasta de cemento, a 0,47 W / mK para la muestra que contiene 50 % de partículas de caucho. Esto corresponde a una disminución de aproximadamente el 60 %. Atribuye la reducción en la conductividad térmica al efecto aislante de las partículas de caucho, y al aumento de la porosidad. El aumento de la proporción de caucho en volumen produce aumentos en el contenido de aire que reducen los puentes térmicos en la matriz contribuyendo a la mejora del aislamiento térmico del compuesto.

Supone que el material compuesto consta de tres fases (aire, partículas de caucho y pasta de cemento), y predice la conductividad térmica utilizando el modelo de Arnaud, L. que se basa en la fracción volumétrica, la conductividad térmica y la densidad de los materiales del compuesto.

La capacidad del caucho para absorber vibraciones ha conducido a diferentes análisis acústicos, entre ellos Bustamante Montoro, R. et al. (2008) incorporan polvo de caucho (inferior a 1 mm) en proporciones de 7, 10, 12, 15 y 17% en peso aproximadamente en placas y probetas de mortero. Estudian sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas. Obtienen reducciones de la conductividad térmica con tendencias exponenciales y estiman que es aislante térmico a partir de fracciones volumétricas de caucho del 50%. No consiguen mejorar la capacidad de reducción del ruido aéreo, al contrario son materiales más permeables al sonido, pero sí a ruido de impacto. También obtienen mejoras en la densidad.

Turgut, P. et al (2009) obtiene en morteros reducciones en la conductividad térmica entre el 6,5-13,3% dependiendo de la cantidad de caucho, también obtiene reducciones de densidad pero disminuye la resistencia. Meshgin, P. et al. elabora un compuesto en el que además de partículas de caucho incorpora materiales de cambio de fase (PCM), consiguiendo con las primeras una mejora en la conductividad térmica y con los PCM en la capacidad de almacenar energía calorífica en el mortero.

Sukontasukkul et al. (2009) utilizan dos tamaños del polvo de neumático para reemplazar agregados finos en hormigón ligero al 10 %, 20 % y 30 % en peso y compara con hormigones ligeros. La densidad disminuye gradualmente al incorporar caucho y al contrario que el resto de los autores dice que la porosidad abierta disminuye al aumentar el contenido de caucho. En los resultados de la prueba de conductividad térmica obtiene valores más bajos que el hormigón en masa

(0,531W/m²K), inferiores en aproximadamente un 20-50% y en el intervalo de 0,241 a 0,443 W/m²K. Pero si los comparamos con otros hormigones lineros son superiores.

Además comprueba la menor tasa de transferencia de calor del hormigón con polvo de neumático, dependiendo del tamaño del polvo de neumático (la tasa de transferencia de calor tiende a disminuir a medida que el tamaño de caucho disminuía) y de la proporción de polvo de neumático en la mezcla (la tasa de transferencia de calor disminuía cuando el contenido de caucho aumentaba).

En este mismo trabajo Sukontasukkul et al estudian **la absorción acústica** mediante un tubo de impedancia para dos rangos de frecuencias: baja frecuencia (125 , 250 y 500 Hz) y alta frecuencia (1.000 , 2.000 y 4.000 Hz). Los resultados para frecuencias bajas son similares a los de hormigones en masa, pero son mejores para frecuencias altas. El hormigón curado en autoclave tiene coeficientes de absorción acústica mejores que el compuesto con caucho, atribuyendo las diferencias a la diferente densidad de ambos materiales.

Khaloo et al como consecuencia de su estudio de la velocidad ultrasónica concluye que el hormigón con caucho es potencialmente un material adecuado para la amortiguación del sonido, porque la gran reducción en el módulo ultrasónico con el aumento de la concentración de caucho demuestra la porosidad del hormigón con caucho. Y entiende que por tanto se puede utilizar como aislamiento acústico. Albano et al calculan la velocidad de propagación de la onda ultrasónica a través de dos granulometrías máximas diferentes, similares al grano medio y grueso utilizados en este estudio, y concluyen que el menor tamaño produce una mayor porosidad y como consecuencia una mayor atenuación del sonido y menor velocidad de propagación.

Flores et al (2013) estudiaron el comportamiento de los hormigones de consistencia seca al sustituir el árido grueso por caucho nfu entre el 20% y el 100% en volumen. El caucho empleado era de 2 tipos: CRN (de alta calidad) en tamaños de grano entre 4-8 mm y el IR (desecho del proceso de reciclado con fibra textil y de acero con trazas de caucho). Obtenían reducciones en las resistencias mecánicas pero menores en las series de IRC. Con los CRC se conseguía un mayor aislamiento térmico y acústico y una menor porosidad y absorción de agua. Los IRC mostraban mayores pérdidas en propiedades tales como la trabajabilidad y la densidad, y también tiene un incremento de la porosidad y mejoran en absorción acústica.

CAPÍTULO 1: Introducción

Las **aplicaciones** propuestas son muy variadas. Además de las ya comentadas, Toutanji (1996) proponía su utilización en barreras de seguridad en las carreteras, en barreras de sonido u otros usos que requieran absorción de vibraciones, y en la agricultura en cercos y postes, y en todo caso nunca para uso estructural.

Khatib et al (1999) recomendaba su uso siempre para propósitos no estructurales como muros ligeros de hormigón, fachadas de edificios y también como bases bajo pavimentos flexibles, siempre que previamente se evaluara el riesgo de incendios.

Segre et al (2000) en caminos o construcción de carreteras, Uygunoğlu, T., & Topçu, I. B. (2010) estudia la retracción para su empleo en hormigones autocompactantes.

También se ha buscado su aplicación para prefabricados como adoquines y bloques de hormigón, en las que Tung-Chai ha obtenido que es posible la fabricación de adoquines con un contenido máximo de neumático troceado del 10% y Bashar S. et al proponen su uso como bloques ligeros con mejora de las propiedades térmicas, acústicas y eléctricas sustituyendo el árido fino en un 10%, 25% y 50%.

Hernández-Olivares, F. et al. proponían su utilización en estructuras resistentes a vibraciones de cualquier origen, como son las bases aislante para estructuras y estudiaron el diseño en fatiga de firmes de rodadura de hormigón-caucho con diferentes fracciones volumétricas de caucho (0%, 3,5 % y 5 %).

La otra línea de investigación más estudiada, es el de la adición de polvo de caucho a materiales bituminosos para mejorar sus prestaciones como material para carreteras que ya se ha tratado en el apartado de caucho NFU.

1.3.3 Incorporación de caucho NFU a una matriz de yeso

En relación a la incorporación de partículas de caucho NFU a una matriz de yeso, la documentación encontrada es escasa.

Dentro de estos se quiere destacar el que ha servido de base al presente trabajo en el que Mayor, P. et al. (2008) estudian losas de escayola que incorporan diferentes fracciones volumétricas de polvo de caucho triturado de una única granulometría, procedente de neumáticos fuera de uso, 20%, 30%, 40% y 50 % en volumen del

producto final. Las resistencias a flexión y a compresión, así como el módulo de elasticidad disminuyen a medida que se añade caucho al compuesto, pero se producen mejoras en las características térmicas y acústicas con adiciones altas de caucho. La elección de los porcentajes de caucho que se adicionan es consecuencia de los resultados de este trabajo. Se elimina el porcentaje del 20% y, sin embargo, se decide añadir el del 60% buscando mejores resultados en los ensayos térmicos y acústicos, pero manteniendo las propiedades mínimas de resistencia mecánica exigidas por la normativa.

En el estudio de Serna, A. et al (2012) con adiciones de caucho mínimas, entre el 1% y el 5%, y tres granulometrías de caucho NFU (0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm) inferiores a las incorporadas en este trabajo, se muestra una disminución en las propiedades mecánicas del yeso (16% en flexión y 18,3% en compresión), y al contrario de lo esperado un aumento en el módulo de elasticidad (entre el 1% y el 3%), y concluyen, a diferencia de los resultados obtenidos en el presente trabajo, que no hay una diferencia significativa en función del tamaño del grano, atribuyéndolo a la pequeña diferencia entre las fracciones volumétricas estudiadas. En este mismo trabajo se analiza la posibilidad de mejora en la retracción. Se estudia la fisuración mediante pruebas con losas Kraai pero no pueden verificar mejoras porque no se produce fisuración en ninguna de las muestras.

2. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo principal es obtener un material constructivo compuesto, con matriz de yeso, que incorporando residuos de caucho procedentes del reciclado de neumáticos fuera de uso y aprovechando sus características elásticas, baja densidad y estabilidad química, de como resultado un material más ligero y con prestaciones térmicas y acústicas mejoradas, manteniendo las propiedades físicas y mecánicas exigibles, contribuyendo así a la sostenibilidad medioambiental y a la mejora de las condiciones de habitabilidad de los edificios.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se han estudiado los materiales que forman el compuesto, yeso y caucho NFU (triturado mecánicamente y transformados en polvo y granza de caucho de diferentes granulometrías): Su obtención, características, propiedades y sus aplicaciones en general y más específicamente en edificación.

Se ha caracterizado física y mecánicamente el material compuesto, llevando a cabo un estudio experimental en el que se considera la dosificación y el tamaño de partículas de caucho, comprobando el cumplimiento de las exigencias de la normativa de aplicación vigente para posibilitar su desarrollo como material de construcción.

Se han evaluado las características y propiedades térmicas (coeficiente de conductividad térmica) y acústicas (aislamiento acústico bruto y absorción acústica), mediante estudios comparativos a través de ensayos propios no ajustados a normativa, estudiando la influencia de la dosificación y el tamaño de granza de caucho

CAPÍTULO 2: Objetivos generales

y analizando a través del espesor el comportamiento como elemento constructivo para la mejora del aislamiento térmico y acústico.

Como consecuencia del estudio experimental se ha profundizado en los procesos de transmisión térmica que tienen lugar en el interior de un material compuesto para la confección de un modelo matemático que justifique el estudio empírico.

Se ha estudiado el comportamiento elástico mediante la obtención del módulo de elasticidad estático y dinámico.

También se ha analizado su comportamiento frente al agua mediante ensayos que permiten valorar la porosidad abierta, los coeficientes de absorción por inmersión y por capilaridad así como hacer una aproximación al tamaño del poro.

Finalmente se han valorado las posibles aplicaciones del material compuesto resultante óptimo, teniendo en cuenta especialmente las características que suponen una mejora en las condiciones de habitabilidad de los edificios.

3. MATERIALES

3.1 CONGLOMERANTE

Para la confección de los morteros, se ha utilizado un único tipo de escayola E-35, perteneciente a la empresa ALGÍSS URALITA, con denominación Europea A, cumple las especificaciones de las normas UNE 102011:1986 y UNE-EN 13279-1:2006.

Fig 3.1.
Conglomerante: Escayola E-35

Sus características técnicas, según informe técnico del fabricante (relación agua / yeso en peso= w/p) se incluyen en la tabla 3.1.

Agua de amasado	75%
Indice de pureza	92%
Resistencia Mecánica a la flexotracción	$\geq 3.5 \frac{N}{mm^2}$
Inicio de fraguado (A/Y=0,8)	6 -12 minutos
Fin de fraguado (A/Y = 0,8)	20-25 minutos
Indice de blancura	> 85%
Granulometría	rechazo < 1% en tamiz de 200 micras según norma UNE
Agua de cristalización	5.2-6.2%

Tabla 3.1

Características técnicas de la escayola, según especificaciones técnicas del fabricante

CAPÍTULO 3: Materiales

3.2. POLVO DE CAUCHO

Para la evaluación de la influencia de la granulometría se ha empleado caucho NFU de tres granulometrías diferentes (0-0,6 mm, 0,5-2,5 mm y 2,5-4,0 mm nominal) procedentes de la trituración mecánica en atmósfera ambiental de neumáticos fuera de uso. Todos ellos han sido proporcionados por la empresa RENEAL (Guardo-Palencia). El producto se recibe triturado y tamizado.

ANÁLISIS QUÍMICO (en peso):	MINIMO (%)	MAXIMO (%)
Extracto cetónico	10	20
Polímeros NR/SR	40	55
Caucho natural NR	21	42
Negro de carbono	30	38
Cenizas	3	7
Azufre	-	5

PROPIEDADES FÍSICAS	
Peso específico	1,10-1,27 gr/cm ³
Densidad aparente	0,50 gr/cm ³ (granulometría 0.0-0.6) 0,55 gr/cm ³ (granulometría 0.5-2.5) 0,52 gr/cm ³ (granulometría 2.5-4.0)
Color	Negro
Morfología del grano	Angulosa
Humedad	< 0,75 % en peso
Contenido en materiales textiles	< 0,50 % en peso
Contenido en materiales ferromagnéticos	< 0,1 % del peso del caucho < 0,1 % del peso del caucho (tamaños < 0,8 mm)
Contenido en otras impurezas	< 0,25 % en peso

Tabla 3.2.

Caucho reciclado en polvo: Propiedades físicas y análisis químico

Las propiedades físicas y el análisis químico, según se indica en la ficha técnica de los productos, se incluyen en la tabla 3.2. Los productos utilizados suministrados por la empresa RENEAL, son los incluidos en la tabla 3.3.

diferenciados por granulometrías. Se incluye su denominación comercial y en el de grano más fino su clasificación según el manual Cedex y según ASTM D 5603.

DENOMINACION COMERCIAL	GRANULOMETRÍA (mm)	CLASIFICACIÓN	CLASIFICACIÓN
		SEGUN ASTM D 5603	SEGÚN MANUAL CEDEX
NECALFLEX PA0006	0,0 – 0,6	Clase 40 Grado 1	P-3
NECALFLEX GFPA0620	0,6 -2,5		
NECALFLEX GMA2040	2,5 -4,0		

Tabla 3.3.

Denominación comercial polvo de caucho por granulometrías

El análisis granulométrico de los productos de polvo de caucho utilizados se muestra en las siguientes gráficas y tablas, así como el aspecto de los mismos mediante las figuras correspondientes.

Abertura nominal de tamiz (mm)	% Pasa por cada tamiz	
	% Mínimo	% Máximo
0,800	100	100
0,500	50	80
0,250	5	30
0,125	0	10

Tabla 3.4.

Análisis granulométrico polvo de caucho 0,0mm-0,6mm (Necalflex PA0006)

Fig 3.2.

Polvo de caucho 0,0mm-0,6mm. Análisis granulométrico.

CAPÍTULO 3: Materiales

El análisis granulométrico del polvo de caucho con tamaño de grano comprendido entre 0,0 mm y 6 mm se muestra en la tabla 3.4. Su gráfica y el aspecto del material se pueden ver en la figura 3.2.

El análisis granulométrico del polvo de caucho con tamaño de grano comprendido entre 0,6 mm y 2,5mm, se muestra en la tabla 3.5. Su gráfica y el aspecto del material se pueden ver en la figura 3.3.

Abertura nominal de tamiz (mm)	% Pasa por cada tamiz	
	% Mínimo	% Máximo
3,150	100	100
2,500	95	100
2,000	80	98
1,600	50	85
1,000	18	52
0,800	5	25
0,630	1	10
0,400	0	1

Tabla 3.5.

Análisis granulométrico polvo de caucho 0,6mm -2,5mm

Fig 3.3.

Polvo de caucho 0,6mm-2,5mm. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico del polvo de caucho con tamaño de grano comprendido entre 2,5 mm y 4,0 mm, se muestra en la tabla 3.6. Su gráfica y el aspecto del material se pueden ver en la figura 3.4.

Abertura nominal de tamiz (mm)	% Pasa por cada tamiz	
	% Mínimo	% Máximo
6,30	100	100
4,00	75	98
3,15	52	85
2,50	22	52
2,00	5	25
1,60	0	4

Tabla 3.6.

Análisis granulométrico polvo de caucho 2,5mm-4,0mm

Fig. 3.4.

Polvo de caucho 2,5mm-4,0mm. Análisis granulométrico.

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen:

Las series realizadas, la de referencia sin adiciones y las que incorporan cargas de caucho en diferentes proporciones y granulometrías. El porcentaje de adición se decidió por los estudios previos desarrollados en las investigaciones de Mayor, P. et al y la granulometría por ser los tamaños más habituales ofrecidos por las empresas de reciclaje de este material, manteniendo abierta la posibilidad en futuras investigaciones de modificar estos tamaños.

Las probetas realizadas de cada una de las series, dependiendo su forma y número de los diferentes tipos de ensayos a los que son sometidas.

Las herramientas, materiales y procedimientos empleados en los ensayos a los que son sometidas las diferentes muestras de todas las series para su caracterización física (densidad), mecánica (dureza shore C, resistencia a flexión y compresión), térmica (coeficiente de conductividad térmica), acústica (aislamiento acústico a ruido aéreo y a ruido de impacto y coeficiente de absorción acústica), elástica (módulo de elasticidad estático y dinámico por ultrasonidos) y frente al agua (coeficiente de absorción por inmersión y por capilaridad, porosidad abierta y estudio de tamaño y distribución de poros y deformación).

CAPÍTULO 4: Método experimental

4.1 .SERIES REALIZADAS: COMPOSICIÓN Y DENOMINACIÓN

Se manejan dos variables en la composición de las mezclas: el porcentaje en peso del caucho NFU respecto al peso de escayola y el tamaño del grano de caucho NFU.

Para analizar la influencia de la dosificación se ha modificado el porcentaje en peso del caucho respecto al peso de la escayola en valores del 30%, 40%, 50% y 60%.

Para analizar la influencia del tamaño del grano se han utilizado las tres granulometrías descritas en el capítulo de materiales: 0-0,6 mm, 0,5-2,5 mm y 2,5-4,0 mm nominal.

Fig 4.1.

Sección de muestras clasificadas por tamaño de partículas de caucho y % de adición.

Se elaboran así 13 series diferentes, una de ellas será la serie de referencia sin contenido de caucho NFU. En las doce restantes (fig. 4.1) se combinan el porcentaje de caucho NFU y su granulometría.

Para denominar las probetas se ha usado una nomenclatura que permita identificar claramente la composición de las mismas. En la tabla 4.1 se incluyen los códigos de denominación de las muestras, que hacen referencia al porcentaje de sustitución del conglomerante por caucho NFU, en peso, y al tamaño máximo del grano de caucho NFU. Las de referencia se denominan con R. Las que contienen caucho van precedidas de C, a continuación se indica el porcentaje del mismo y por último el tamaño del grano mayor. Por ejemplo la "C-40-2.5", contiene caucho NFU en una proporción del 40% en peso respecto al peso de escayola, con un tamaño de grano comprendido entre 0,6 mm y 2,5 mm. Se ha incluido una columna con el % de caucho en volumen en función de su densidad aparente.

En las gráficas incluidas en el capítulo de resultados se utilizan códigos de colores que faciliten su lectura. Utilizándose amarillos para las series correspondiente al grano más fino, azules para el grano medio y magentas para el más grueso. Cuando se tienen que diferenciar por el porcentaje de adición de caucho NFU se emplean colores comprendidos dentro de las mismas gamas.

Denominación	Tamaño partícula	% Caucho (peso)	% Caucho (volumen)
R1		0	0
C-30-0.6	0.0-0.6	30	40.7
C-40-0.6		40	51.6
C-50-0.6		50	61.5
C-60-0.6		60	70.6
C-30-2.5	0.5-2.5	30	38.4
C-40-2.5		40	49.2
C-50-2.5		50	59.3
C-60-2.5		60	68.6
C-30-4.0	2.5-4.0	30	39.7
C-40-4.0		40	50.6
C-50-4.0		50	60.6
C-60-4.0		60	69.8

Tabla 4.1.

Denominación de las series en función del tamaño de partícula de caucho NFU y % en peso de caucho sobre escayola E-35

4.2. CONFECCIÓN DE MUESTRAS

Se utilizan moldes de tres formas y dimensiones diferentes, que se rellenan con las correspondientes mezclas de escayola, caucho NFU y agua, manteniéndose en todas ellas el mismo procedimiento de amasado.

Para los ensayos físicos, mecánicos y de comportamiento ante el agua, se emplean moldes de 4 cm x 4 cm x 16 cm, ajustados a las correspondientes normativas de ensayos (fig. 4.2.). Se elaboran tres probetas por serie. Los códigos empleados para la denominación de las muestras elaboradas con estos moldes son los especificados en el apartado 4.1.

Fig 4.2.
Moldes para ensayos físicos y mecánicos.

Fig 4.3.
Moldes para ensayos térmicos y acústicos.

Fig 4.4.
Moldes para ensayo de absorción acústica.

Para los ensayos térmicos y de aislamiento acústico tanto a ruido aéreo como a ruido de impacto se han fabricado moldes apropiados a tal fin, formados por base de tablero de melanina y laterales de perfiles en L de 2 y 3 cm respectivamente sujetos con palomillas fácilmente desmoldables (fig. 4.3.). Las dimensiones de los mismos son de 25 cm x 25 cm x e cm (e: 2 y 3 cm). Se elaboran dos placas de cada uno de los espesores por serie.

Para la denominación de estas placas ha sido necesario utilizar nuevos códigos. Se ha mantenido la referencia al porcentaje de sustitución del conglomerante por caucho en peso, y al tamaño máximo del grano de caucho, puesto que las proporciones de los materiales empleados para cada una de las mezclas elaboradas es el mismo, y únicamente se ha precedido de un 2 o un 3 para definir el espesor de la placa correspondiente.

Se han confeccionado de dos espesores distintos para analizar la influencia de este factor. Las dimensiones de longitud y anchura se ajustaron al material disponible en el laboratorio de Física de la ETSEM para la medida del aislamiento térmico y posteriormente se fabricó la correspondiente herramienta para la medida del aislamiento acústico ajustándose a las mismas dimensiones.

Para el ensayo de absorción acústica se fabricó un molde desmontable de aluminio que permitía la elaboración de 3 muestras de forma cilíndrica de 34 mm de sección y 30 mm de altura (fig 4.4)⁵. La dimensión de la sección era la requerida por el Tubo de Kundt del que se disponía en el laboratorio de materiales de la ETSEM. La altura del cilindro de 30 mm se decidió pensando que podría ser la que probablemente requerirían las posibles aplicaciones del material resultante. Los códigos de denominación empleados son los mismos que para los ensayos mecánicos y de comportamiento ante el agua.

Fig 4.5.

Mezcla en seco de caucho y escayola

Por último los restos de las probetas prismáticas empleadas en los ensayos mecánicos se trituraron con el fin de introducirlas en el horno de mufla para completar el ciclo de vida del material resultante, aunque no fue posible hacerlo finalmente.

Se decide realizar el amasado teniendo en cuenta la trabajabilidad de la mezcla, para lo cual se busca la relación agua/yeso más adecuada

⁵ Los moldes fueron diseñadas y fabricadas de forma desinteresada por D. Rafael Bermejo del Pozo perteneciente al Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial de la E.T.S. de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio.

CAPÍTULO 4: Método experimental

para cada granulometría y dosificación mediante la realización del ensayo denominado "mesa de sacudidas" (definido en la Norma UNE EN 13279-2 "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2, Métodos de ensayo", apartado 4.3.3). Se ha decidido no utilizar aditivos en ninguna de las probetas realizadas para poder comparar en condiciones homogéneas.

En todos los casos, se ha mezclado previamente en seco el caucho y la escayola, incorporando en primer lugar el caucho y posteriormente la escayola, moviéndolas con cuchara hasta conseguir la mayor uniformidad posible (fig. 4.5.).

El amasado se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 13279-2:2006 ("Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2, Métodos de ensayo", apartado 4.3.3).

Después de obtenida la relación agua/yeso mediante el método de la mesa de sacudidas, como se explica en el apartado 4.3. "Ensayos realizados", se continúa con la elaboración de muestras siguiendo el procedimiento que se indica a continuación y que se ajusta a lo especificado en la norma UNE-EN 13279-2:2006.

Primero se elaboran las muestras para ensayos físicos, mecánicos y de comportamiento frente al agua empleando moldes de 4 cm x 4cm x 16 cm.

Inmediatamente después de la preparación, con la ayuda de una espátula para rellenar los huecos y las esquinas, se pasa la pasta de yeso a los moldes previamente engrasados. Para eliminar la aparición de burbujas de aire, se eleva el molde 10 mm desde su extremo superior y se deja caer.

Esta operación se repite 5 veces. Todo el proceso de relleno de los moldes no supera los 10 min desde el comienzo del amasado y su superficie no es alisada. Se ha eliminado el material sobrante con una regla metálica o un cuchillo, mediante un movimiento de sierra. Se preparan de esta manera tres probetas de cada tipo.

Cuando la pasta ha adquirido el grado adecuado de resistencia, se desmoldan las probetas identificándolas y pesándolas (fig. 4.6.). Las probetas se mantienen durante siete días en la atmósfera de laboratorio indicada en la norma (la temperatura de la sala de ensayo, del equipo y de los materiales (yeso, agua) debe ser de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa de $(50 \pm 5) \%$). Después, se desecan hasta masa constante a una

temperatura de $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (fig. 4.7.). Tras su secado, las probetas se enfrían en desecador hasta la temperatura de laboratorio, se pesan y se someten a ensayo.

Fig 4.6.
Pesaje de probetas.

Fig 4.7.
Introducción de muestras en estufa para su secado.

Posteriormente, siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente y manteniendo las mismas proporciones A/Y, se elaboran las muestras para ensayos térmicos y acústicos, con los moldes de 25 cm x 25 cm x e cm (siendo e= 2 y 3 cm), y para el ensayo de absorción acústica, con el molde cilíndrico 30 mm de altura.

4.3. ENSAYOS REALIZADOS

Todos los ensayos se han realizado en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid: los físicos, mecánicos, de comportamiento frente al agua, de aislamiento acústico, etc. en el laboratorio de materiales de construcción, los térmicos en el laboratorio de física y los de absorción acústica en el laboratorio de acústica.

Los ensayos físicos y mecánicos se ajustan a lo especificado en las normas:

- UNE EN 13279-2:06 "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo". (2006).
- UNE 102039:85 "Yesos de construcción y escayolas de construcción. Determinación de la dureza SHORE C y de la dureza BRINELL". (1985).

Las características estudiadas en cada material son las siguientes:

- Relación agua/yeso mediante método de mesa de sacudidas
- Propiedades físicas y mecánicas, comportamiento elástico y frente al agua sobre probetas normalizadas 40 mm x 40 mm x 160 mm: Densidad seca, dureza superficial Shore C, resistencia a flexión y resistencia a compresión, porosidad, coeficiente de absorción de agua por inmersión, coeficiente de absorción de agua por capilaridad, expansión volumétrica por absorción de agua y módulo de elasticidad estático y dinámico.
- Conductividad térmica sobre placas 25 cm x 25 cm x e (e: 2 y 3 cm)
- Propiedades acústicas (ruido aéreo y ruido de impacto) sobre placas 25 cm x 25 cm x e (e: 2 y 3 cm).
- Coeficiente de absorción acústica sobre muestras cilíndricas de 34 mm de diámetro y 30 mm de altura.

Las máquinas y herramientas empleadas para los ensayos pertenecen a los Laboratorios de Materiales de Construcción, Instalaciones y Laboratorio de acústica de la Escuela Universitaria de Arquitectura técnica y son los siguientes:

- Amasadora planetaria

- Mesa de sacudidas y molde troncocónico
- Elementos de medición: calibre, cronómetro, etc.
- Moldes triples normalizados (40 x 40 x 160 mm) de hierro
- Báscula de precisión (Modelo EUROPE 3000 HR)
- Estufa de desecación (Modelo CERTERM 150)
- Desecador de vidrio
- Durómetro Shore C
- Máquina combinada para la realización de ensayos de flexión y compresión (Modelo AUTOTEST 200/10 SW)
- Equipo de medición de ultrasonidos modelo E-46 de IEP Control, S.A.
- Útiles varios: Cuencos, paletas, cucharas, enrasadores, aceite, etc.

Las máquinas y herramientas empleadas para los ensayos térmicos y acústicos, se describen en los apartados correspondientes a sus ensayos.

4.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS

4.4.1 Relación agua/yeso

Como se decía anteriormente se ha intentado mantener la trabajabilidad de la mezcla como constante en todas las series realizadas. Esto hace necesario determinar la relación agua/yeso para todas las series.

De los tres métodos para la determinación de la relación agua/yeso(A/Y) que presenta la norma UNE-EN 13279-2:2006 (método del amasado a saturación, método de medida de la fluidez de la pasta y método de la mesa de sacudidas), se ha utilizado el "método de la mesa de sacudidas", por ser específico para yesos premezclados. Para los productos aditivados se emplea, para calcular la cantidad de agua, alguno de los sistemas de consistencia normalizada, porque el amasado a saturación produce exceso de agua. Se ha seguido todo el procedimiento indicado por la norma, que es el siguiente:

La relación agua/yeso se determina mediante el método de ensayo-error, hasta que se forme una galleta de un diámetro, determinado empíricamente, de (165 ± 5) mm.

Se emplean los siguientes aparatos:

- a.- Mezcladora amasadora, recipiente de amasado y paleta (EN 196-1:1994)
- b.- mesa de sacudidas y molde cónico (EN 459-2:2001)
- c.- espátula
- d.- calibre
- e.- cronómetro
- f.- báscula con precisión de 0,1 g.

El procedimiento consiste en pesar entre 1,2 dm³ y 1,5 dm³ de yeso (escayola en las probetas de referencia, y escayola con caucho en el resto de series realizadas), con una precisión de 1 g (m4). Se pesa la cantidad de agua (m3) determinada por ensayos previos y se vierte en el recipiente de amasado seco. Se añade el yeso al agua y se remueve manualmente con la espátula y la paleta durante 1 minuto

aproximadamente (fig. 4.8.). La pasta formada se mezcla con la mezcladora amasadora (fig. 4.9.) durante un minuto a baja velocidad (140 ± 5) min^{-1} en rotación y (62 ± 5) min^{-1} en movimiento planetario.

Fig 4.8.
Amasado manual de compuestos.

Fig 4.9.
Amasadora planetaria

Fig 4.10.
Mesa de sacudidas y molde troncocónico

Fig 4.11.
Molde troncocónico relleno y enrasado

El molde cónico se coloca en el centro de la placa de cristal de la mesa de sacudidas y se sujeta firmemente con una mano (fig. 4.10.). Se rellena el molde con la pasta en exceso y se elimina dicho exceso mediante una espátula (fig. 4.11.).

CAPÍTULO 4: Método experimental

Al cabo de unos 10 s a 15 s, se levanta el cono verticalmente. La pasta que haya quedado adherida al molde se añade a la pasta del cono. Mediante la mesa de sacudidas se aplican 15 golpes verticales a una velocidad constante de 1 revolución por segundo (fig. 4.12.).

Se mide el diámetro de la galleta resultante con una precisión de 1mm en dos direcciones perpendiculares (fig. 4.13.). Se comprueba que la media de estos dos valores es de (165 ± 5) mm.

Fig 4.12.

Formación de galleta para medida de su diámetro

Fig 4.13.

Medida con calibre del diámetro de la galleta

Cuando el diámetro de la galleta difiera del especificado para el producto que se ensaya, se debe repetir el ensayo desde el principio utilizando cantidades mayores o menores de agua. En las series realizadas se ha encontrado una mayor dificultad en llegar al tamaño de galleta especificado en la norma en aquellas en las que el tamaño del grano es más grueso porque se produce una mayor disgregación. Mínimas modificaciones en la cantidad de agua añadida producen distorsiones considerables, por lo que fue necesario realizar el proceso en repetidas ocasiones para comprobar que no existía error, y conseguir unos valores acordes a los indicados en la norma.

Si el tiempo de fraguado es tal que la relación agua/yeso no se puede conseguir de forma satisfactoria, se podría añadir una pequeña cantidad de retardador al agua de amasado. En este caso, en el informe de ensayo figurará el tipo y la cantidad del retardador añadido. En las series realizadas no se ha añadido ningún retardador.

La relación agua/yeso, R, viene dada por la expresión:

$$R = \frac{m_3}{m_4}$$

Dónde:

m_3 es la masa del agua de amasado en gramos;

m_4 es la masa del yeso o del yeso más el caucho en gramos.

Con los valores obtenidos se elaboran tanto las probetas de dimensiones 4 cm x 4 cm x 16 cm para ensayos físicos y mecánicos como las placas de 25 cm x 25 cm x e cm para ensayos térmicos y acústicos y las cilíndricas de altura 30 mm para ensayos de absorción acústica.

4.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

4.5.1 Densidad seca y variación de masa

Las probetas se pesan al desmoldar, se mantienen durante siete días en la atmósfera de laboratorio indicada en la norma (la temperatura de la sala de ensayo, del equipo y de los materiales (yeso, agua) debe ser de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa de $(50 \pm 5) \%$). Después, se desecan hasta masa constante a una temperatura de $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Tras su secado, las probetas se enfrían en desecador hasta la temperatura del laboratorio de laboratorio y se pesan nuevamente para obtener la densidad seca según la expresión⁶:

$$\gamma = \frac{\text{Peso}_{\text{desecado}}}{\text{Volumen}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Las variaciones de masa específica (m), con una aproximación de 0,1% para cada probeta se calculan mediante la expresión:

$$m = (\Delta M / M) \times 100$$

Tanto para obtener la densidad seca como para la variación de masa, se calcula el valor medio de los obtenidos para las tres probetas de cada serie.

4.5.2 Dureza Shore C

Para la determinación de la dureza superficial se utiliza el ensayo Shore C (fig. 4.14.) definido en la norma UNE-EN 102039:1985.

El ensayo se ha realizado sobre las probetas de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Las medidas se han efectuado sobre las caras longitudinales correspondientes a los lados

Fig 4.14.

Medida de Dureza Shore C con durómetro

⁶ Posteriormente en los ensayos de comportamiento frente al agua se ha calculado la densidad aparente mediante el método de la pesada hidrostática.

del molde sobre las tres probetas realizadas en cada serie. Se han tomado cinco medidas en el eje longitudinal de las mencionadas caras, repartidas de manera equidistante.

Se han eliminado los valores manifiestamente erróneos debidos fundamentalmente a la oclusión de aire. Estos errores se producen en mayor medida en las probetas con adición de caucho.

Se ha determinado el valor de la dureza Shore C para cada serie, obteniéndose el valor medio de las tres probetas realizadas que a su vez es el valor medio de las diez medidas obtenidas para cada una de ellas.

4.5.3 Resistencia a flexión

Para la determinación de la resistencia a flexión se utiliza el ensayo correspondiente definido en la norma UNE-EN 13279-2:2006. Se determina mediante este ensayo la carga necesaria para romper una probeta prismática de 160 mm x 40 mm x 40 mm apoyada sobre rodillos cuyos centros estén separados 100 mm.

La probeta debe colocarse sobre los rodillos del dispositivo de flexión y, mediante un rodillo central, debe aplicarse una carga hasta que se rompa la probeta (fig. 4.15). Se ha colocado sobre los rodillos y en contacto con el rodillo central caras que han estado en contacto con los moldes. La aplicación de la carga se hace a velocidad uniforme. Se anota la carga máxima, en newton, que soporta la probeta.

Fig 4.15.
Ensayo de flexión

La resistencia a flexión R_f viene dada por la fórmula:

$$R_f = 0,00234F_f$$

dónde:

CAPÍTULO 4: Método experimental

R_f es la resistencia a flexión en N/mm²

F_f es la carga media de rotura en N de, al menos, tres valores obtenidos.

Siguiendo esta norma se ha determinado el valor de la resistencia a flexión para cada serie, obteniéndose el valor medio de las tres probetas.

4.5.4 Resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión se utiliza el ensayo correspondiente definido en la norma UNE-EN 13279-2:2006. En este ensayo la probeta se comprime hasta la rotura.

La resistencia a compresión debe determinarse aplicando una carga a los trozos rotos de las probetas del ensayo de resistencia a flexión (podrían fabricarse nuevas probetas).

Si el ensayo de compresión no se realiza inmediatamente a continuación del ensayo a flexión, los trozos de las probetas a ensayar se deberían guardar en un desecador. Los trozos de las probetas se colocan con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40 mm.x 40 mm (fig. 4.16.)

Se permite inclinar el plato superior para establecer un contacto perfecto entre las caras de las probetas y los platos de la prensa. El eje de rotación del plato superior debe estar centrado sobre la superficie de la probeta sometida a compresión. La carga debe aplicarse sobre la probeta hasta su rotura.

Fig 4.16.
Ensayo de compresión

Debe calcularse el valor medio de los 6 valores obtenidos y expresarse en N/mm². La carga de resistencia a compresión R_c viene dada por la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

dónde:

R_c es la resistencia a compresión en N/ mm²

F_c es la máxima carga en la rotura en N

1600 40 x 40 es el área de la probeta en mm².

4.6. ENSAYO DE LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se ha utilizado un ensayo no ajustado a normativa. Se describe en primer lugar la base teórica, y a continuación el equipo empleado y el procedimiento seguido en el ensayo.

4.6.1 Fundamentos teóricos: la transmisión de calor

El calor es un tipo de energía que pasa de los cuerpos que están a mayor temperatura a aquellos que tienen una temperatura menor.

Aunque el calor se trasmite simultáneamente de tres formas, conducción, convección y radiación, en edificación se considera que las pérdidas y ganancias caloríficas se producen fundamentalmente por conducción y convección. Se entiende que existe equilibrio entre lo ganado y perdido por radiación, y además la pérdida es muy pequeña por esta vía.

El calor ganado o perdido por una superficie a una cierta temperatura, en contacto con un fluido a una temperatura distinta sería la transferencia de calor por convección. Depende de muchos factores: forma y situación de la superficie, velocidad del fluido, cambios de fase, etc. En la práctica se determina experimentalmente un coeficiente "h" o coeficiente convectivo de transmisión de calor de aire a cuerpo o de cuerpo a aire, que depende de los diferentes factores enumerados.

El estudio en profundidad de los fenómenos de convección se realiza mediante fórmulas experimentales con números adimensionales. Pero para una primera aproximación, podemos utilizar la ley de enfriamiento de Newton, que dice: "La cantidad de calor transmitida es proporcional al área de transmisión y a la diferencia de temperaturas entre la superficie transmisora t y el fluido que la rodea t_i ". Es decir, podemos poner (Maganto Suárez, F.J.):

$$\phi = \frac{Q}{S\tau} = h.(t - t_i)$$

Siendo:

ϕ flujo calorífico medido en, (W/m²)

h el coeficiente de convección medido en (W/°Cm²)

S superficie (m^2)

$t - t_i$ diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y el fluido ($^{\circ}C$)

El coeficiente de convección h se determina experimentalmente, la norma NBE-CT-79 incluye valores del mismo, aunque es muy complejo hallarlo, porque depende de muchos factores que pueden hacer que varíe en cada caso concreto.

Fig 4.17.

Transmisión de calor por convección del paramento de un muro al interior del recinto que cierra el muro
"Fundamentos físicos. Transmisión de calor". Fernando José Maganto Suárez. EUATM

Al introducir el coeficiente de convección h como lo hemos hecho, es como si pasáramos a estudiar la convección como si fuera conducción (Fig 4.17).

Llamamos resistencia térmica a la transmisión de calor por convección R' , a la inversa del coeficiente de convección.

$$R' = \frac{1}{h}$$

Trasmisión de calor por conducción. Ley de Fourier

Se llama flujo térmico o calorífico Φ a la energía térmica que atraviesa una superficie en la unidad de tiempo.

CAPÍTULO 4: Método experimental

La ley de Fourier⁷ dice: la energía térmica que atraviesa un sólido isótropo⁸, en régimen estacionario⁹, en la unidad de tiempo y si la superficie es constante, por unidad de superficie es directamente proporcional al coeficiente de conductividad térmica λ del material atravesado y a la variación de temperatura T en la dirección del flujo e inversamente proporcional a su espesor.

$$\Phi = \frac{Q}{S\tau} = \frac{\lambda \cdot (T_1 - T_2)}{e}$$

Siendo:

$\frac{Q}{S\tau}$

Flujo calorífico medio en (W/m²)

λ

Coeficiente de conductividad térmica medido en (W/m°C)

S

la superficie que atraviesa el calor (m²)

e

el espesor de la superficie atravesada (m)

T_1 y T_2 las temperaturas superficiales de las caras interior T_1 y exterior T_2 en (°C) o (K)

Siendo $T_1 > T_2$.

Podemos escribir la expresión anterior:

$$\frac{Q}{S_t} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{\lambda}}$$

Siendo:

$\frac{e}{\lambda}$

la resistencia térmica, oposición que presenta un cuerpo al paso del flujo calorífico.

⁷ Fourier, Joseph. 1768-1830. Matemático y físico francés que en 1822 publicó: "Théorie Analytique de la Chaleur".

⁸ Sólido isótropo: sus propiedades no dependen de la dirección en que se miden. En nuestro caso consideramos la probeta-placa como una pared plana, isótropa y homogénea.

⁹ Proceso estacionario: independiente del tiempo, se reproduce de forma idéntica a lo largo de él. Esperamos a que el régimen sea estacionario (flujo de calor constante), aunque en el ensayo no se consigue un régimen totalmente estacionario, hay variación de flujo, se busca la máxima aproximación.

$$R = \frac{e}{\lambda} \left(\frac{m^2 \circ C}{W} \right)$$

La resistencia térmica total, cuando en una pared se producen pérdidas por convección y conducción, será la suma de las resistencias.

Trasmisión de calor por conducción a través de un muro compuesto

Definimos un muro compuesto (Maganto Suárez, F.J.) : como aquel formado por más de un material y aplicamos la ley de Fourier al mismo, teniendo en cuenta que conocemos la conductividad térmica, λ , de los materiales que lo forman (Fig. 4.18).

Fig 4.18.

Ley de Fourier aplicada a un muro compuesto.

"Fundamentos físicos. Transmisión de calor". Fernando José Maganto Suárez. EUATM

Al considerar el material isótropo y el proceso estacionario se cumple para nuestro elemento la siguiente expresión, aplicando la ley de Fourier:

$$\lambda_1 \frac{t_1 - t'}{e_1} = \lambda_2 \frac{t' - t''}{e_2} = \lambda_3 \frac{t'' - t'''}{e_3} = \lambda_4 (t''' - t_2)$$

En nuestro caso:

$$\lambda_{placa} \frac{t_{cara \text{ int. placa}} - t'}{e_{placa}} = \lambda_{poliestireno} \frac{t' - t_{cara \text{ ext. poliestireno}}}{e_{poliestireno}}$$

CAPÍTULO 4: Método experimental

Siendo conocidos los términos (constantes para cada placa):

e_{placa} espesor placa: 2cm y 3 cm

$e_{poliestireno}$ espesor poliestireno: 2 cm

$\lambda_{poliestireno}$ conductividad térmica poliestireno: 0,037 (W/m°C)

Y también conocemos a través de las mediciones con los termopares:

$t_{cara\,int.\,placa}$ temperatura en la cara interior de la placa (°C)

$t_{cara\,ext.\,poliestireno}$ temperatura en la cara exterior del poliestireno (°C)

t' temperatura en la superficie de contacto entre placa y poliestireno (°C)

Podemos así hallar en la ecuación anterior:

$$\lambda_{placa} = \frac{e_{placa}}{e_{poliestireno}} \cdot \lambda_{poliestireno} \cdot \frac{(t' - t_{cara\,ext.\,poliestireno})}{(t_{cara\,int.\,placa} - t')}$$

4.6.2 Equipo empleado

Todo el equipo utilizado ha sido proporcionado por el laboratorio de física de la E.T.S.E.M.

El equipo está formado por:

- “Casa térmica” (fig. 4.19.): Se trata de una herramienta elaborada por Phywe Systeme GMBH&Co. Es un cubo aislado térmicamente con cuatro caras laterales abiertas que se pueden cerrar con diferentes materiales para determinar los coeficientes de transmisión de calor, λ , de los mismos. La cara superior es móvil, también está aislada térmicamente y tiene cuatro tornillos de fijación. Las caras laterales tienen aberturas cuadradas de 21 cm x 21 cm, en

su cara interior se colocan los materiales a ensayar, que deben tener dimensiones de 25 cm x 25 cm y se sujetan a la cara vertical del cubo con dos tornillos de fijación. Estas caras laterales en su lado exterior tienen soporte para poder adosar planchas de material aislante (poliestireno en nuestro caso) de 21 cm x 21 cm (de conductividad conocida) y una palomilla en la parte superior para sujetarlas.

En las aristas de las caras laterales hay unos orificios con material elástico aislante para introducir las sondas térmicas.

En el interior como fuente de calor una bombilla de 100W y una sonda térmica interior conectada con un termostato regulador térmico.

Fig 4.19.

“Casa térmica” con termostato y termopar

Fig 4.20.

Termopar con dos sondas

- Termostato con un conector para la sonda térmica y un selector de temperaturas entre 35°C y 70°C. Según indicaciones del fabricante, en estado estacionario la temperatura interior de la caja se sitúa en torno a los 60°C.
- Instrumento de medida de temperaturas (fig. 4.20.) con dos termopares de NiCr-Ni. (Sonda). Toma temperaturas de dos sondas simultáneamente apareciendo en la pantalla dos valores.
- 2 ordenadores con programa “Measure” (fig. 4.21) en el que se puede fijar el tiempo de medición y la frecuencia quedando grabadas las temperaturas captadas por las sondas de acuerdo a los parámetros fijados.

CAPÍTULO 4: Método experimental

Fig 4.21.

Ordenadores registrando temperaturas

4.6.3 Procedimiento seguido en el ensayo

Para la realización de los ensayos se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Se colocaba la placa el día antes de realizar el ensayo con un reloj que encendiera la fuente de calor (bombilla de 100 w) aproximadamente 3 horas antes del inicio de las mediciones de manera que se hubiese llegado a una temperatura estable tanto en el interior de la caja como en la placa y en el poliestireno (Fig. 4.22).
2. Antes de introducir la placa en la “casa térmica” se colocaban los termopares. Se utilizan 5 sondas en todos los ensayos:
 - a. Para medir la temperatura en el interior de la caja. Ubicado de manera fija, a media altura, centrado horizontalmente y entre la fuente de calor y la placa, en todos los ensayos. (T^a interior caja)
 - b. Para medir la temperatura ambiente. En el exterior de la caja en situación fija. (T^a ext caja)
 - c. Para medir la temperatura en la cara interior de la placa. ($T1$)

- d. Para medir la temperatura en la superficie de contacto entre la placa y el poliestireno. (T2)
- e. Para medir la temperatura en la cara exterior del poliestireno. (T3)

Fig 4.22.

Interior casa térmica con muestra para ensayo y sensores de temperatura

Dado que existe un gradiente de temperatura desde arriba hacia abajo y lateralmente en las caras de los materiales (placas de escayola, escayola-caucho y poliestireno) se tiene especial cuidado en la colocación de los sensores buscándose siempre el punto medio de las placas y fijando el extremo del termopar a estos puntos con cinta de carroceros para evitar su desplazamiento (Fig.4.23). De esta manera todos los registros se han producido a la misma altura y a la misma distancia de las caras laterales.

Las placas se han colocado siempre con la cara rugosa hacia el interior de la caja.

CAPÍTULO 4: Método experimental

Fig 4.23.

Fijación del extremo del termopar a centro de cara exterior

Fig 4.24.

Medición y obtención de gráficas

3. Las medidas se realizan con el programa "Measure" registrándose 4 puntos, todos los indicados anteriormente excepto el que mide la temperatura ambiente en el laboratorio que sólo se anota al final de la medición (Fig. 4.24).
4. Se realizan mediciones de 30 minutos con registros de temperatura cada minuto. A continuación se calcula la temperatura media durante ese periodo para cada una de las sondas, siendo esta la que sirve para calcular la conductividad térmica.

Para seleccionar los treinta minutos de medición se hicieron pruebas iniciales con el objeto de seleccionar periodos de tiempo en que el régimen llegase a ser estacionario (todas las temperaturas permanecen estables con pequeñas oscilaciones).

Se colocó una placa previamente calentada en otra casa térmica dispuesta a tal efecto. Como la placa ya tenía una cierta temperatura se inició la medición con registros cada minuto sin establecer límite de tiempo y se dejó aproximadamente 10 horas, obteniéndose las gráficas que se muestran a

continuación (Fig.4.25. y fig 4.26). Ambas gráficas se obtienen simultáneamente en los dos ordenadores conectados a las sondas.

Fig 4.25.

Ejemplo de gráfica correspondiente a T^{a} interior caja y cara interior placa (T_1)

En la primera gráfica (Fig. 4.25.) podemos observar que a partir de aproximadamente 200 minutos (3 horas y 20 minutos), la temperatura interior de la caja y la temperatura de la cara interior de la placa (T_1), permanecen estables, con oscilaciones en ambos casos de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$.

Fig 4.26.

Ejemplo de gráfica correspondiente a T^{a} superficie de contacto placa-poliestireno (T_2) y cara exterior poliestireno (T_3)

CAPÍTULO 4: Método experimental

En la segunda gráfica (Fig. 4.26.) la situación de estabilización se da un poco más tarde que en la primera, aproximadamente a los 18.000 segundos (5 horas), oscilando en este caso las temperaturas en la superficie de contacto placa-poliestireno en aproximadamente 0,1°C y en la cara exterior de poliestireno en 0,25°C, aunque en este último caso se producen máximos y mínimos que llegan a variar en más de 1°C, por otro lado esperables puesto que están expuestas a la temperatura del laboratorio.

Teniendo en cuenta estos resultados se decidió realizar mediciones de seis horas, en las que previsiblemente se habría llegado a régimen estacionario seleccionándose los treinta minutos de mayor estabilización.

En el apartado de "Resultados Experimentales", se muestra mediante un ejemplo los resultados de la selección realizada para cada placa.

4.7. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Cuando hablamos de acústica arquitectónica los dos conceptos fundamentales son el aislamiento acústico y el acondicionamiento acústico.

Podríamos definir el aislamiento acústico entre dos recintos, como la cantidad de energía sonora que se pierde al propagarse del recinto emisor al recinto receptor. Siempre se consideran dos recintos, uno emisor y otro receptor, y el elemento separador entre ambos tendrá una capacidad de aislamiento acústico que dependerá de la cantidad de ruido que es capaz de eliminar de un recinto a otro. Será importante conocer en este caso el Coeficiente de transmisión cuyo inverso es el Aislamiento.

El término acondicionamiento acústico hace referencia a las medidas necesarias que deben tomarse para conseguir unas determinadas condiciones acústicas de confort en función de la actividad que se vaya a desarrollar en un recinto. En este caso hablamos de un único recinto. El acondicionamiento acústico está vinculado con la reverberación, es decir la reflexión de la onda sonora en las superficies del recinto; reflexiones que siguen propagándose, incidiendo nuevamente en las superficies y dando lugar a mayores reflexiones. Por tanto el correcto acondicionamiento acústico está relacionado con la absorción acústica de las superficies del recinto.

En los primeros ensayos se estudia el aislamiento acústico del compuesto, tanto a ruido aéreo como a ruido de impacto. A continuación la absorción acústica.

4.7.1 Ensayo de medida de reducción de presión sonora a ruido aéreo y a ruido de impacto.

Se ha utilizado un ensayo para mediciones a pequeña escala, que no se ajusta a ninguna norma¹⁰. Se describe brevemente en primer lugar la base teórica para su realización y a continuación el equipo empleado y el procedimiento seguido en el ensayo.

¹⁰ Basado en el ensayo propio diseñado para la ponencia "Propiedades Térmica, Acústicas y Mecánicas de placas de morteros yeso-caucho" de los autores: Mayor, P.; Bustamante, R.; Rangel, C.; Hernández-Olivares, F.

CAPÍTULO 4: Método experimental

4.7.1.1 Medida del Aislamiento Acústico

El aislamiento depende de las propiedades de los materiales, de las soluciones constructivas utilizadas y del contexto arquitectónico que las integra.

De la energía acústica que incide en una partición (fig. 4.27):

- Una parte es reflejada por la superficie;
- Una parte es absorbida por la superficie;
- El resto se transmite.

Fig 4.27.
Distribución del ruido incidente.
Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido" elaborada por el Instituto Eduardo Torroja. IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.

El cálculo del aislamiento es muy complejo porque, salvo que se produzca en condiciones ideales de laboratorio, hay que considerar que el sonido no se transmite de un recinto a otro únicamente a través de la partición que los separa, sino que normalmente también lo hace a través de otras vías: puentes acústicos, paredes laterales, etc.

La transmisión de ruido entre dos recintos¹¹(emisor y receptor), se produce por dos vías (fig. 4.28):

- Vía directa: Elemento de separación (Dd) y rejillas, etc.(E)
- Vía indirecta:
 - Aérea indirecta: puertas, falsos techos, etc (S)
 - Indirecta estructural o "por flancos": Elementos de flanco conectados al de separación entre recintos. Desde el elemento de separación a un elemento de flanco (Df), desde un elemento de flanco al de separación (Fd) o a través de flancos (Ff). Estas transmisiones dependen de los elementos constructivos de flancos y de sus uniones.

Fig 4.28.

Vía de transmisión del sonido entre dos recintos.

Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido" elaborada por el Instituto Eduardo Torroja. IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.

En el ensayo efectuado sólo existe la placa de separación, no hay rejillas, ni falsos techos, etc. Si hay puentes acústicos y transmisión por flancos que no se contemplan

¹¹ Código técnico de la edificación. Documento básico DB-HR Protección frente al ruido: Vías de transmisión del sonido. Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido" elaborada por el Instituto Eduardo Torroja .IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.

CAPÍTULO 4: Método experimental

en el cálculo por la dificultad de su valoración, pero el ensayo se considera válido porque sólo se establece una comparación en los resultados.

Podemos expresar el aislamiento acústico mediante una serie de índices¹², que son diferentes para ruido aéreo y para ruido de impacto.

En aislamiento acústico a ruido aéreo, el índice más sencillo es el Aislamiento Acústico Bruto o Diferencia de niveles entre recintos, D:

$$D = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}]$$

Podemos definirlo como la diferencia, en dB, existente entre el nivel medio de presión sonora en el recinto emisor (L_1) y en el recinto receptor (L_2). Es función de la frecuencia.

Para calcular el nivel medio de presión sonora en un recinto, es necesario hacerlo en diferentes puntos del mismo, escogidos de manera adecuada, porque el campo sonoro no es constante, y se deben promediar los valores obtenidos.

En nuestro ensayo sólo se realiza la medición en un punto, pero se trata de un punto fijo, por lo tanto se considera que los valores obtenidos son comparables, aunque no calculemos el verdadero valor medio de la presión sonora.

Pero el aislamiento bruto, D, no da una verdadera medida sobre la partición porque la medida del nivel sonoro en una sala y en un instante, proviene de la energía sonora de la sala en ese instante más la energía reflejada¹³.

Si en el aislamiento bruto, añadimos una corrección mediante el área de la muestra S y el área de absorción equivalente del recinto receptor A obtenemos el

¹² En el Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido" elaborada por el Instituto Eduardo Torroja .IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción, se resumen las magnitudes de aislamiento utilizadas en el DB HR tanto para ruido aéreo como para ruido de impacto.

¹³ Se denomina campo sonoro en un recinto al valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio y esta formado por dos componentes: campo directo (el sonido llega en línea directa desde la fuente, sin reflexión. El nivel de presión sonora disminuye 6dB cada vez que se duplica la distancia) y campo reverberante (el sonido sufre reflexiones que se superponen entre sí, manteniéndose constante el nivel de presión sonora).

aislamiento acústico normalizado o índice de reducción acústica R (UNE-EN ISO 10140-2: 2010. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo):

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

Dónde:

L_1 nivel de presión sonora promedio de la energía en el recinto emisor, (dB)

L_2 nivel de presión sonora promedio de la energía en el recinto receptor, (dB)

S es el área de la abertura del ensayo libre en la que se instala el elemento de ensayo, (m^2)

A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, (m^2)

Este índice, R, es el aislamiento acústico, en dB, medido en laboratorio. Es función de la frecuencia.

A través de él obtenemos una medida más precisa que incluye el efecto de la reverberación. D es menor que R, salvo cuando son iguales.

Si la medición se realiza in situ obtenemos el índice de reducción acústica aparente, R':

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

Este índice también es función de la frecuencia.

En el aislamiento acústico a ruido de impactos podemos hablar de nivel de presión acústica de impactos normalizado que definimos como el nivel de presión de ruido acústica de impactos, L_i , aumentado por un término de corrección dado en decibelios (es función de la frecuencia), (UNE-EN ISO 10140-3: 2010. Acústica.

CAPÍTULO 4: Método experimental

Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.

Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos):

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{10} \quad [\text{dB}]$$

Dónde:

L_i nivel de presión acústica promediado energéticamente en una banda de tercio de octava en el recinto receptor cuando el suelo sometido a ensayo es excitado por la fuente de impactos normalizada (dB)

A área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, (m^2)

De la misma manera que para ruido aéreo, para las mediciones in situ tenemos el nivel de presión acústica de impactos normalizado medido in situ, L_n' :

$$L_n' = L + 10 \lg \frac{A}{10} (\text{dB})$$

Como podemos ver tanto en los índices de ruido aéreo como en los de ruido de impacto, la corrección que introduciríamos para considerar la reverberación es una constante. Por tanto, y teniendo en cuenta que no se trata de obtener índices reales de aislamiento acústico puesto que como se ha dicho anteriormente hay una serie de factores de distorsión (puentes acústicos, transmisión por flancos, etc., (además de la temperatura, presión estática, humedad relativa, velocidad del aire, etc.), y lo que se pretende es únicamente comparar los valores obtenidos, se ha decidido dar únicamente los índices de "aislamiento bruto" en ambos casos.

Daremos así los valores:

D_{propio} [dB] Aislamiento acústico bruto o diferencia de niveles entre recintos de acuerdo a ensayo propio.

L_{propio} [dB] Nivel de presión sonora de impactos medido mediante ensayo propio en el recinto receptor.

Ley de masas

Después de realizar los ensayos, se hará una comparación con los resultados teóricos obtenidos en función de la ley de masas. Para calcular estos valores nos basamos en lo siguiente:

La ley de masa es una expresión teórica que puede utilizarse para predecir el aislamiento de paredes homogéneas y simples en función exclusivamente de su masa¹⁴:

$$R = 20\ell(m.f) - 47dB$$

m densidad de masa por superficie, [kg/m²]

f frecuencia en [Hz]

La constante varía según el autor.

La ley de masa predice que el aislamiento aumentará en 6dB al duplicar la masa superficial o la frecuencia

4.7.1.2 Equipo empleado

1.- “caja acústica”. (Fig. 4.29.) Para la realización de los ensayos se ha empleado una caja de 35 cm de ancho x 70 cm de largo y 60 cm de alto de medidas interiores formada por tres capas de material¹⁵. La capa intermedia se hizo con Poliestireno extruido (XPS) de 5 cm y funciona como soporte de las otras capas; interiormente se ha forrado con una placa de yeso laminado de 10 mm de espesor y exteriormente se ha revestido de un material poroso “Copopren Acustic” de 40 mm de espesor, 80 kg/m³ de densidad y un índice de reducción acústica $R_w = 62$ dB.

¹⁴ En el Anejo 01 de la “Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido” elaborada por el Instituto Eduardo Torroja .IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción, se resumen las magnitudes de aislamiento utilizadas en el DB HR tanto para ruido aéreo como para ruido de impacto.

¹⁵ La misma caja pero formada por dos capas se utilizó para los ensayos de la ponencia mencionada anteriormente.

CAPÍTULO 4: Método experimental

La placa a ensayar se coloca en el centro de la caja, embutida en unas acanaladuras de 3 cm de ancho hechas en todo el perímetro, formándose así dos recintos, uno a cada lado de la placa, que serán el recinto emisor y el receptor.

Para conseguir una mayor hermeticidad y evitar los puentes acústicos se rodea el perímetro de la placa con aircolem (poliuretano); en las placas de 3 cm de espesor se coloca sólo en el canto porque el ajuste en la acanaladura es bastante preciso. En las placas de 2 cm, además de el canto se rodea con 0,5 cm el perímetro de ambas caras sujetándolo con una banda elástica que se comprime al introducirlo en la acanaladura obteniéndose de esta manera el mejor sellado de las juntas y evitándose en la mayor medida posible los puentes acústicos (se ha comprobado experimentalmente, eliminando estos elementos, la importante variación en los resultados).

La tapa de la caja es diferente para los ensayos a ruido aéreo y a ruido de impacto. Para el ensayo de aislamiento a ruido aéreo la tapa es doble, la primera tapa está compuesta por dos capas, la primera, hacia el interior de la caja, de placa de yeso laminado de 10 mm de espesor y la segunda, hacia el exterior, de Poliestireno extruido (XPS) de 5 cm, formando en el perímetro una junta en L para un mejor ajuste. Sobre esta se coloca una tapa exterior con unas alas perimetrales que montan sobre la base

Fig 4.29.

Aspecto interior caja diseñada para medida aislamiento acústico.

de la caja de Poliestireno extruido, produciéndose un solape de aproximadamente 10 cm. Todo con el objetivo de evitar los puentes acústicos producidos por desajustes en el cierre y conseguir la máxima insonorización en el interior de la caja.

En el recinto emisor se sitúa un soporte para colocar el emisor con unos topes laterales que permiten la colocación fija del aparato, perpendicular a la placa que se va a ensayar y a una distancia fija.

Para el ensayo de aislamiento a ruido de impacto la tapa tiene dos capas, de placa de yeso laminado de 10 mm de espesor y de Poliestireno extruido (XPS) de 5 cm hacia el exterior y cierra sólo la parte correspondiente al recinto receptor. Desde el recinto emisor se deja caer por gravedad, por efecto pendular, una bola de acero, sujeta mediante una red a una cuerda de 23 cm de longitud.

2.- Calibrador-emisor. (Fig. 4.30) Para los ensayos a ruido aéreo se coloca en el recinto emisor un calibrador sonoro modelo CB-5 de CESVA que proporciona un tono puro de frecuencia 1kHz. Este calibrador tiene las siguientes características:

- Genera dos niveles de presión sonora: 94 dB y 104 dB (1Pa y 3,16 Pa) para permitir la calibración en dos puntos y conseguir mayor exactitud.
- Utiliza una sola frecuencia de calibración de $1\text{kHz} \pm 1,5\%$ eliminando así la necesidad de correcciones debidas a las ponderaciones A, B, C, D o lineal, ya que todas tienen igual respuesta a esta frecuencia.
- Tiene una exactitud en el nivel de presión sonora de $\pm 0,3$ dB a 23°C y 1013 mbar.

Fig 4.30.
Calibrador-emisor.

CAPÍTULO 4: Método experimental

- Funciona en un rango de T^a entre 5°C y 35°C cumpliendo así la norma UNE-EN 60942:2001. La variación en la salida acústica por los cambios de T^a es inferior a $\pm 0,3$ dB para condiciones de referencia de presión (1013mbar) y humedad relativa (65%)
- Funciona con una humedad relativa comprendida entre el 10% y el 90%.
- El nivel de presión sonora varía con la presión estática de acuerdo con gráfico dado por el fabricante.

Por tanto, para tener precisión en la medida, habría que comprobar siempre la temperatura, humedad relativa y presión estática.

En todos los ensayos realizados se ha trabajado con el nivel de presión sonora de 104 dB (3,16 Pa) a 1kHz.

Inicialmente se planteó utilizar un altavoz emitiendo ruido rosa como señal de referencia para la realización de las medidas acústicas porque permitiría la descomposición de la señal en bandas de octava, pero se descartó porque el sonómetro del que se disponía y que se describe a continuación no tiene banco de filtros normalizados de 1/1 o 1/3 de octava y por lo tanto no se podía realizar un análisis en frecuencia de la señal acústica.

3.- Sonómetro. En el recinto receptor se colocó un sonómetro modelo SC-2c de CESVA (fig. 4.31). Entre sus características se encuentran:

- Micrófono de condensador prepolarizado extraíble. Está montado y enroscado de forma que anule al máximo las reflexiones sonoras.
- Resolución de 0,1 dB.
- Tiene una única escala. No se puede seleccionar el margen de medida en función del nivel del ruido a emitir.

Fig 4.31.
Sonómetro.

- No dispone de banco de filtros normalizados 1/1 o 1/3 de octava para el análisis en frecuencia de la señal acústica.
- Márgenes de medida: entre 0-130 dB.
- Para detectar el nivel de presión sonora utiliza un detector r.m.s., determinándose los errores máximos en el manual de instrucciones.
- Tiene disponibles las funciones Fast y Slow¹⁶.
- Rango de temperaturas de funcionamiento: de -10 a +50°C con un error máximo de 0,5dB.
- Funciona con una humedad comprendida entre 30 y 90 % con un error máximo a 40°C y 1 kHz de 0,5 dB
- Se especifica en las instrucciones las variaciones según la directividad, la influencia de los campos magnéticos y de las vibraciones.

4.7.1.3 Procedimiento seguido en el ensayo

Para la realización de las medidas acústicas se ha seguido el siguiente procedimiento (los tres primeros apartados son comunes para los ensayos a ruido aéreo y de impacto):

1. Las medidas de una "tanda" completa¹⁷ se realizan de forma continua, sin interrupción para que las variaciones de temperatura, humedad relativa y presión estática sean constantes en cada tanda, de manera que el error producido por la influencia de estas variables sea el mismo para cada "tanda". Se ha hecho así porque se ha comprobado que se producen variaciones en las medidas de una misma placa según el momento seleccionado.

¹⁶ Fast: LAF. Se utiliza para mediciones de ruido fluctuante. Respuesta rápida. Es el valor rms con ponderación frecuencial A y promediado exponencial rápido de 125ms, en decibelios. Se presenta cada sg.

Slow: LAS. Se utiliza para medir ruidos que no fluctúan rápidamente. Respuesta lenta. Es el valor rms con ponderación frecuencial A y promediado exponencial lento de 1s, en decibelios. Se presenta cada sg.

¹⁷ Se denomina "tanda" completa a todas las series de un espesor y número igual. Las "tandas" completas son 4: 2-*1, 2-*2, 3-*1 y 3-*2.

CAPÍTULO 4: Método experimental

El error acumulado por la influencia de estas variables según las especificaciones técnicas del sonómetro y el calibrador empleado pueden llegar a ser importantes.

2. Antes y después de realizar las mediciones se procede a la calibración del sonómetro.
3. El sonómetro se mantiene introducido en el orificio hecho en la caja de ensayo a lo largo de todas las mediciones (fig. 4.32). Al tener la caja en su capa exterior un material poroso con cierta elasticidad que presiona sobre el perímetro del tubo que contiene el micrófono permite un mejor aislamiento del ruido exterior y evita las vibraciones que podrían alterar la medición.

En el sonómetro se activa la función LAF (Fast): Respuesta rápida. Podemos considerar el ruido como continuo uniforme¹⁸ pero se prefiere medir con esta opción para apreciar las posibles variaciones.

Fig 4.32.
Colocación de sonómetro en el orificio de la caja para efectuar las mediciones.
Cronómetro.

4. Ruido aéreo
 - a. El emisor de sonido se coloca en posición fija apoyado sobre el soporte indicado en la descripción de la “caja acústica”. Todas la mediciones se

¹⁸ Ruido constante uniforme: utilizando la posición de respuesta lenta del equipo de medición, se mantiene constante o bien los límites en que varía difieren en menos de ± 3 dB(A), en periodos de medición de dos minutos.

hacen con el emisor en la posición que genera una presión sonora de 104 dB (3,16 Pa) a 1 kHz.

- b. Una vez colocada la correspondiente placa de la forma explicada anteriormente en las acanaladuras de la caja y puesto en funcionamiento el emisor, se cierra la caja y se espera a la estabilización de la medida del sonómetro.
- c. Se realizan 3 medidas, cronometrándose 30 sg para cada medición y anotándose el valor mínimo y máximo de cada una de ellas.

5. Ruido de impacto

- a. Se utiliza una bola de acero de 113 g envuelta en una red colocada a 23 cm y se deja caer por gravedad, con efecto pendular, desde una posición horizontal alineada con la cuerda que se sujeta.
- b. Se realizan así tres medidas para cada placa.

4.7.2 Ensayo de medida de absorción acústica

Hay tres métodos para medir las propiedades absorbentes del sonido de los materiales: los métodos de medida en tubos, los de medida en cámara reverberante y los de medida en campo libre.

Mediante los métodos de medida en tubos se determina el coeficiente de absorción acústica a partir de la medida de la impedancia superficial bajo incidencia normal, es el caso del "tubo de impedancia acústica". Los valores de absorción acústica bajo estas condiciones son bastante precisos y requiere muestras de pequeño tamaño más fáciles de obtener.

El método de la cámara reverberante se utiliza para medir la absorción en situaciones de incidencia aleatoria y está especificado en la Norma ISO 354. Se usa para materiales con resaltes pronunciados en las direcciones lateral y perpendicular. El principio de funcionamiento se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material. Al trabajar con campo sonoro difuso se aproxima más a la realidad, pero se hacen una serie de simplificaciones sobre el campo acústico y el tamaño de la muestra que en algunos casos da valores distorsionados, incluso superiores a la unidad

CAPÍTULO 4: Método experimental

Mediante el método de campo libre se evitan las reflexiones por parte de otros materiales diferentes al de estudio.

En nuestro caso emplearemos el de impedancia acústica, también llamado tubo de Kundt¹⁹.

El método se basa en la creación de un campo acústico de ondas planas dentro de un tubo de pequeñas dimensiones, en el que se superponen una onda que incide de forma perpendicular sobre la muestra a ensayar, y la onda reflejada. Dentro de este tipo de ensayo hay dos procedimientos: método del rango de onda estacionaria y método de la función de transferencia. El primero se especifica en la Norma ISO 10534-1 y el segundo en la Norma ISO 10534-2. Ambos usan un tubo de impedancia con una fuente sonora conectada en un extremo y la muestra de ensayo en el otro extremo, pero la técnica de medición es diferente. En nuestros ensayos empleamos el método de la función de transferencia.

4.7.2.1 Coeficiente de absorción acústica

En los recintos, el sonido se propaga en forma de ondas en todas direcciones que

Fig 4.33.

Campo directo y campo reverberante.

Anejo 01 de la “Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido” elaborada por el Instituto Eduardo Torroja. IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.

rebotan en todas las direcciones produciéndose numerosas reflexiones. Las reflexiones producen un nivel sonoro suplementario que se suma al principal, por lo que el sonido aumenta (fig 4.33.).

¹⁹ El físico alemán August Adolf Eduard Eberhard Kundt (1839-1894) desarrolló un método para la investigación de las ondas dentro de los tubos basado en situar un material en forma de polvo (por ejemplo talco) en el interior de un tubo y hacerlo vibrar. Con esto, el polvo se iba apilando en determinados nodos. Una variante permite calcular la velocidad del sonido en diferentes gases.

Este fenómeno de persistencia de la energía sonora en el espacio, incluso una vez que cesa la fuente que la produce, se conoce como reverberación. Se define como tiempo de reverberación, T , al tiempo que se requiere en un espacio cerrado para que un sonido en una frecuencia determinada disminuya 60 dB, después de haber cesado la fuente o bien, el tiempo que transcurre hasta que la densidad de la energía acústica en el recinto decrece una millonésima de su valor inicial. El proceso de decaimiento de la energía, es diferente para cada posición dentro del recinto, y además varía con la frecuencia.

Para calcular de manera aproximada el tiempo de reverberación en una sala es habitual utilizar ecuaciones basadas en la teoría estadística; de ellas, la más conocida y empleada es la fórmula de Sabine:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad [\text{sg}]$$

Siendo:

T Tiempo de reverberación en sg

V Volumen del recinto en m^3

A Área de absorción equivalente en m^2

La absorción acústica es la disminución de la energía acústica en un recinto, que se disipa en energía calorífica, al ser absorbida por el medio que atraviesa. Esta pérdida de energía se deberá a la absorción debida al aire, a los materiales y acabados empleados en los elementos constructivos, caracterizados por un coeficiente de absorción, a los objetos y mobiliario presentes en el recinto y a las personas que se encuentren dentro de la sala.

Para calcular la absorción acústica de un recinto es necesario sumar la absorción que aporta cada una de las superficies de distinto material del recinto, así como los objetos o mobiliario que pudiera contener y la absorción del aire.

La absorción de una superficie se obtiene multiplicando su coeficiente de absorción por su superficie:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i (m^2)$$

CAPÍTULO 4: Método experimental

Desarrollando la fórmula:

$$A = A_{\text{paramentos}} + A_{\text{objetos}} + A_{\text{aire}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^N N \cdot A_o + 4m \cdot V$$

α_i coeficiente de absorción acústica de cada paramento en bandas de frecuencia

S_i área de paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i , (m^2)

A_o área de absorción acústica media equivalente de cada objeto absorbente diferente en bandas de frecuencias, (m^2)

$4m \cdot V$ absorción en el seno del aire, (m^2)

m coeficiente de absorción acústica medio en el aire

V Volumen del recinto, (m^3)

El coeficiente de absorción acústica de un material es una magnitud adimensional que se define como la relación entre la energía absorbida y la energía total incidente.

Podemos encontrar otros coeficientes como:

- NRC (noise reduction criteria), que es la media aritmética de los valores del coeficiente de absorción para las frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz. Expresada en múltiplos de 0,05.
- α_w , que es el coeficiente ponderado según la norma UNE EN ISO 11654. "Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica".

El coeficiente de absorción de un material depende de los siguientes factores:

- La rugosidad del material y en especial su porosidad.
- La pérdida de energía por procesos viscoelásticos debido al paso del aire a través del material, que se puede caracterizar por la resistencia al paso del flujo del aire;
- La conducción térmica entre el material y el aire;

- La difracción de la onda sonora debido a las irregularidades superficiales del material.

Por tanto los materiales más absorbentes han de ser los que presenten una elevada porosidad y una resistencia al paso del flujo pequeña.

Estos materiales se conocen como materiales porosos entre los que destacan las lanas minerales y las espumas de poliuretano. Otros ejemplos son los yesos y morteros acústicos o los revestimientos textiles (moquetas, cortinas, etc.)

4.7.2.2 Equipo empleado

Para la medida del coeficiente de absorción acústica se ha utilizado el Sistema de ACUPRO de Spectronics. Es una aplicación de la norma ISO 10534-2:2002 "Determinación de coeficiente de absorción acústica y de la impedancia en tubos de impedancias. Parte 2: Método de la función de transferencia" y ASTM E1050-98 para la medición de las propiedades acústicas de los materiales, mediante el método de los "dos micrófonos" o "función de transferencia". Se puede utilizar para determinar el coeficiente de absorción y la impedancia acústica de los materiales a incidencia normal, en función de la frecuencia.

Con este procedimiento se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido, y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones fijas usando micrófonos montados en la pared o mediante un micrófono interior móvil, seguido del cálculo de la función de transferencia acústica compleja para obtener el coeficiente de absorción a incidencia normal²⁰.

El cálculo del coeficiente de absorción acústica (α_n) no es más que el cálculo del cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente para el caso de una onda plana con incidencia normal.

²⁰ Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, α : Cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente, para una onda plana con incidencia normal. Norma ISO 10534-2 "Determinación de coeficiente de absorción acústica y de la impedancia en tubos de impedancias. Parte 2: Método de la función de transferencia"

CAPÍTULO 4: Método experimental

Las magnitudes se determinan como funciones de la frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones.

El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones de micrófono.

La figura 4.34 muestra un esquema del montaje empleado para la medida del coeficiente de absorción acústica ajustado a la Norma UNE-EN ISO 10534-2.

Fig 4.34.
Esquema de montaje de instrumento para medida del coeficiente de absorción acústica. Norma UNE-EN ISO 10534-2.

El tubo (fig. 4.35.), siguiendo las indicaciones de la norma es recto, rígido, liso y estanco para evitar la transmisión de ruido en el tubo desde el exterior y la excitación por vibración por la fuente de sonido o por fuentes de fondo (por ejemplo, puertas que se cierran). Se cumplen también todas las condiciones especificadas por las normas en relación a el espesor de la pared (mínimo un 5 por ciento del diámetro del tubo, en este caso es del 10 por ciento) y longitud del mismo (al menos tres diámetros).

El tubo de soporte de la muestra tiene una placa posterior o émbolo ajustable para permitir probar materiales de diferentes espesores y que se pueda dejar un espacio de aire detrás de la muestra, si es necesario.

Fig 4.35.
Tubo de kundt: instrumento para medida del coeficiente de absorción acústica.

De acuerdo con las normas la muestra "... debe estar adaptada perfectamente al soporte, ni demasiado apretada, ni suelta. "Los materiales flexibles tales como espumas y fibra de vidrio son fáciles de cortar con la forma del soporte. Los materiales que son rígidos, como es nuestro caso, deben cortarse con un diámetro ligeramente inferior y sellarlos alrededor de los bordes con vaselina para eliminar el espacio de aire entre la muestra y el tubo. El objetivo es lograr un buen ajuste entre la muestra y el soporte.

La muestra también debe estar en contacto con el émbolo rígido, porque un espacio de aire afectará a los resultados. En situaciones de campo donde se usa el material con un espacio de aire, debe existir el mismo espacio de aire entre la muestra y el émbolo de manera que la prueba se produzca en condiciones de campo duplicados.

El diámetro nominal de las muestras es 1,37 pulgadas (34,798 mm) y tienen una altura de 30 mm (fig 4.36).

Fig 4.36.
Muestras utilizadas en los ensayos de medida de la absorción acústica.

CAPÍTULO 4: Método experimental

Los micrófonos deben montarse al ras de la pared interior del tubo y aislados dentro de un soporte especialmente diseñado que también está aislado del tubo (doble aislamiento), para minimizar la sensibilidad a las vibraciones y proporcionar los mejores resultados. Los micrófonos utilizados son del mismo tipo y tamaño.

Para obtener la función de transferencia se utiliza un analizador de espectro multi-canal entre los micrófonos. En esta medida, el micrófono cerca de la fuente es el canal de referencia. Desde la función de transferencia H_{12} , el coeficiente de presión de reflexión del material R , se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{j2k(L+s)}$$

donde L es la distancia desde la cara de muestra al primer micrófono y s es la distancia entre los micrófonos, $k = 2\pi f / c$, f es la frecuencia, y c es la velocidad del sonido. La onda acústica que viaja en el interior del tubo de una posición a otra será detectada en el segundo micrófono con un factor de fase e^{-jks} respecto a la señal del primer micrófono. La onda reflejada viaja en sentido opuesto y por tanto el factor de fase será en este caso e^{jks} ²¹. H_{12} es la función de transferencia del primer micrófono al segundo. A partir del coeficiente de reflexión, se puede determinar el coeficiente de absorción α de la muestra mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

En nuestro caso las señales captadas por ambos micrófonos llegan a un sistema digital de análisis de señal y un software calcula el coeficiente de absorción basándose en el procedimiento descrito. Los resultados se dan mediante una gráfica y una tabla de Excel.

²¹ El método de medida a través de la función de transferencia fue introducido por Chung y Blaster (1980).

4.7.2.3 Procedimiento seguido en el ensayo

La medición se lleva a cabo mediante la inserción de una pequeña muestra del material en un soporte de muestras que está montado en el extremo del tubo de onda plana. Detrás de la muestra se sitúa un émbolo rígido con una profundidad ajustable para proporcionar una superficie reflectante. En el extremo opuesto del tubo se encuentra conectada una fuente de sonido, un altavoz o amplificador acústico de alta potencia que genera ruido aleatorio (ruido blanco). Al final del tubo y cerca de la muestra, se montan un par de micrófonos a ras de la pared interna del tubo en los que se miden las presiones acústicas.

Todas las mediciones se hacen con la cara más rugosa de la muestra, la que no ha estado en contacto con el molde, hacia el tubo.

Al inicio de la medida de cada muestra se comprueba la temperatura y la presión para introducirlas como dato al inicio de la medición. Las normas recomiendan que la temperatura permanezca constante durante la prueba, con una aproximación de 1°K y por tanto se ha comprobado que este dato permanece dentro de los márgenes establecidos, así como se ha comprobado la presión y se ha modificado cuando ha

Fig 4.37.
Ejemplo medición del coeficiente de absorción acústica de una muestra de material.

CAPÍTULO 4: Método experimental

sido necesario. El software tiene la posibilidad de corregir la velocidad del sonido y la densidad del aire para la temperatura.

Se ajustó el análisis de frecuencias hasta 6000 Hz.

Al inicio de las mediciones se hace una calibración del sistema utilizando una muestra de material "absorbente" acústico, de 25 mm de espesor de espuma de célula abierta. Se realiza una primera medida de esta muestra seleccionando la opción "Calibration 1", a continuación se intercambia la posición de los micrófonos seleccionando la opción "Calibration 2", se comprueba la curva de función de transferencia y se vuelven a intercambiar los micrófonos, colocándolos en su posición original antes de iniciar las mediciones.

Se realizan las mediciones, por duplicado, de tres muestras de cada serie, registrándose los datos obtenidos con el software de Acupro (fig. 4.37.). La primera medición se ha hecho utilizando las muestras sin ningún tratamiento. En la segunda se ha procedido a raspar ligeramente la superficie rugosa orientada hacia el tubo, con el objetivo de eliminar la capa superficial de escayola y hacer aflorar el caucho, para así analizar la diferencia entre las dos medidas.

Se ha comprobado la "coherencia" en las mediciones, reduciéndose en general para las frecuencias entre 3500 y 6000 Hz, y siendo extremadamente bajas para frecuencias inferiores a los 50 Hz, aunque en este caso es normal puesto que para estas frecuencias salimos del campo de la acústica para adentrarnos en el de las vibraciones.

4.8. COMPORTAMIENTO ELÁSTICO

El módulo de elasticidad es una característica propia de cada material mediante la que se relaciona la tensión a la que se somete y la deformación que produce, permitiendo estimar las características resistentes del mismo.

4.8.1 Módulo de elasticidad dinámico

El módulo de elasticidad dinámico es una aproximación al módulo de Young de carácter no destructivo.

El método se basa en la medida de la velocidad de propagación de ultrasonidos en medios materiales sólidos para obtener información sobre el grado de cohesión interno del material, su porosidad y módulo de Young. La velocidad de las ondas resulta modificada por las discontinuidades de los materiales, por ejemplo los poros actúan como discontinuidades que afectan a la velocidad de propagación de ultrasonidos.

Para calcular la velocidad de propagación se utiliza el equipo de medición de ultrasonidos, portátil, modelo E-46 de IEP (fig 4.38). El instrumento dispone de un par de palpadores, uno que emite impulsos electroacústicos y otro que los recibe. Se obtiene la medida del intervalo de tiempo que la onda tarda en atravesar una longitud conocida del material de estudio. La frecuencia mínima del instrumento ha de ser de 20 kHz. En esta medida influyen factores como la colocación de los palpadores y su acoplamiento al material, la longitud de la trayectoria entre emisor y receptor, la forma y tamaño de las muestras, las propiedades físicas del material, su temperatura, contenido de humedad y defectos en la masa como grietas, fisura y coqueras.

Fig 4.38.
Equipo ultrasonidos

CAPÍTULO 4: Método experimental

El procedimiento seguido en el ensayo, basado en las directrices de la norma española UNE EN 12504-4 2006: "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos", es el que se describe a continuación. En primer lugar, para reducir el error derivado de la longitud de la trayectoria, se marca el centro geométrico de las dos caras paralelas, sobre las que después se colocarán los palpadores.

A continuación se procede al calibrado del equipo de medición (fig. 4.39), con la ayuda de un cilindro de plástico del cual sabemos de antemano cual es el tiempo de propagación del sonido a través de él. Las lecturas se han efectuado en el sentido longitudinal de las probetas.

Fig 4.39.
Calibrado de equipo de ultrasonidos.

Fig 4.40.
Medición de muestra con equipo de ultrasonidos.

Posteriormente se coloca la probeta en la base de apoyo y se aplica una capa muy delgada de gel de acoplamiento en los puntos marcados sobre los que se ejercerá una presión similar a la empleada en la calibración del instrumento (fig. 4.40). Los palpadores se han de mantener durante unos segundos, tomando sucesivas lecturas hasta la obtención de un valor mínimo que será el correspondiente a su adecuada colocación.

La velocidad de propagación se determina como la relación entre la longitud de recorrido y el tiempo que tarda en recorrerlo: $v = L/t$. El módulo de elasticidad dinámico, E_{dyn} , en MPa o N/mm^2 , se calcula con la expresión:

$$E_{\text{dyn}} = [f(v) \cdot \rho \cdot v^2] \cdot 10^{-6}$$

Siendo:

ρ la densidad aparente en kg/m^3

v la velocidad de propagación, en m/s, calculada a partir de la distancia entre los puntos de medida, en metros, y del tiempo registrado por el aparato de ultrasonidos, en segundos.

$f(v)$ es un factor función del coeficiente de Poisson y que responde a la relación entre las dimensiones de la probeta y la longitud de onda del instrumento (teniendo en cuenta que 1 Hz equivale a 2.998×10^{11} mm de longitud de onda). Teniendo en cuenta esta relación, el factor sería:

$$\frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson, que desconocemos y presenta dificultades para su medición. Pero si estimamos que en este material está en torno a 0,25 el término anterior sería 0,83.

Es frecuente simplificar el cálculo aplicando la ecuación:

$$E_{\text{dyn}} = \rho \cdot v^2$$

Sabiendo que estamos obteniendo un valor superior en aproximadamente un 17%.

4.8.2 Módulo de elasticidad estático.

El módulo de elasticidad estático es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria que se produce al estar sometido a esfuerzos de flexión (en este caso), dentro del comportamiento elástico del material.

CAPÍTULO 4: Método experimental

Para la determinación del módulo de elasticidad estático se ha utilizado la misma máquina que para la medida de la resistencia a flexión a la que se ha añadido un dispositivo que mide la flecha que se produce en función de la carga añadida. Se trata de un extensómetro que va montado sobre un soporte articulado que se sujeta a la máquina de ensayo y se mantiene en contacto con el centro de la cara inferior de la probeta (fig. 4.41 a y b). Antes de iniciar el ensayo hay que proceder al calibrado del conjunto.

(a)

(b)

Fig 4.41.

Extensómetro para medida de flecha.

Se han utilizado probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm apoyadas sobre rodillos cuyos centros estén separados 100 mm. Mediante un rodillo central se va aplicando carga, registrándose la flecha que se produce en la muestra en función de la carga aplicada.

Con los datos obtenidos, se ha calculado el valor de la tensión y de la deformación, relacionando ambos valores mediante una gráfica y seleccionando los valores en los que la muestra tiene un comportamiento elástico para obtener el módulo de Elasticidad a partir de la expresión:

$$E = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\epsilon_{m\acute{a}x}}$$

Para el cálculo de la tensión ($\sigma_{m\acute{a}x}$) se ha tenido en cuenta la relación de esta con el momento máximo ($M_{m\acute{a}x}$) y el módulo resistente (W):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W}$$

Siendo en este caso:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{4}$$

Dónde:

P es la carga aplicada en N

L es la distancia entre apoyos en mm

El módulo resistente para una sección rectangular de base b y altura h sería:

$$W = \frac{2I}{h} = \frac{2(bh^3/12)}{h} = \frac{bh^2}{6}$$

Y si tenemos en cuenta que en nuestra sección $b = h$, resultará:

$$W = \frac{h^3}{6}$$

Donde h es el lado de la sección de la probeta en mm.

Por tanto, podemos obtener la tensión máxima en N/mm² o MPa en función de P :

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W} = \frac{3PL}{2h^3}$$

CAPÍTULO 4: Método experimental

Obtenemos la deformación unitaria a partir de la flecha, mediante la expresión²²:

$$\varepsilon = \frac{6hf}{L^2}$$

Dónde:

ε es la deformación unitaria

h es la altura de la probeta en mm

f es la flecha en mm

L es la longitud entre apoyos en mm

Por tanto el módulo de Elasticidad, se puede expresar:

$$E = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\varepsilon_{m\acute{a}x}} = \frac{PL^3}{4h^4 f}$$

²² Hernández Olivares, Francisco. PhD. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica. EUATM (UPM)

4.9. COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA

La absorción de agua se produce por el contacto de los materiales con el subsuelo o el agua de lluvia, sino también por el agua de condensación, por la humedad atmosférica, las conducciones rotas, etc.

Según el Código Técnico de la Edificación (DB HS, CTE) el comportamiento de los edificios frente al agua, se caracteriza mediante el estudio de las propiedades hídricas de los productos de construcción que componen sus cerramientos.

El comportamiento hídrico de los materiales y por tanto su caracterización en este aspecto es importante por la modificación que puede suponer en propiedades como la durabilidad, resistencias mecánicas o dureza, dimensiones, etc. En la degradación de un material influye la cantidad de agua que puede absorber y el movimiento de la misma en su interior. El análisis de estas propiedades permite la correcta aplicación constructiva de los materiales teniendo en cuenta su forma de exposición al agua y los mecanismos de penetración.

La caracterización hídrica que se ha realizado en este trabajo incluye la definición de propiedades como la absorción de agua por capilaridad y la absorción al agua a largo plazo por inmersión total, obteniéndose valores de porosidad abierta, coeficiente de absorción por inmersión, de absorción por capilaridad y dilatación lineal por hinchamiento.

La porosidad está muy ligada al comportamiento hídrico y por tanto el estudio de la misma es de gran interés. La absorción capilar depende de la porosidad, pero hay que considerar el tamaño del poro y su distribución. Por este motivo, se ha incluido una primera aproximación al análisis del tamaño del megaporo y su distribución a partir del ensayo de absorción por capilaridad.

Todos los ensayos se han llevado a cabo en el laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid.

Las muestras utilizadas en todos los casos son prismáticas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm.

4.9.1 Porosidad abierta

Los materiales porosos contienen poros abiertos y poros cerrados. El volumen de poros abiertos determina la capacidad de absorber agua tanto de la humedad ambiente como por capilaridad.

Para calcular el volumen de poros abiertos y por tanto la capacidad de absorción de agua es necesario conocer el peso saturado.

La porosidad abierta se define como el cociente entre el volumen de poros accesibles y el volumen aparente del material. Se multiplica por cien para expresarse en %. Se ha calculado con la expresión (UNE EN 1936 2007: "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total"):

$$POR_{abierto} = \frac{P_{sat} - P_0}{P_{sat} - P_{sum}} \times 100$$

La densidad aparente se calcula mediante la expresión:

$$\rho = \frac{P_0}{P_{sat} - P_{sum}} \times \rho_{agua}$$

A continuación se describe el procedimiento seguido para calcular la porosidad y la densidad aparente. Se ensayan tres muestras del material, anotando primero su peso natural (P_{nat}) y se seca en estufa a $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante, es decir hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesiva es inferior al 0,1%. Una vez seco se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se anota el peso seco (P_0).

Posteriormente, basándose en las directrices de la norma española UNE EN 14617-1 2013: "Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua", se introducen las muestras en un tanque hasta quedar completamente sumergidas (fig 4.42) y cubiertas por dos centímetros de agua y separadas del fondo del recipiente. Se pesan a distintos intervalos de tiempo secándolas previamente con un paño húmedo para eliminar la capa de agua superficial hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas sea inferior al 0,1%, obteniéndose el peso saturado (P_{sat}).

Para conocer el peso sumergido (P_{sum}) se pesa la muestra saturada de agua en balanza hidrostática. Por el teorema de Arquímedes sabemos que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del volumen del fluido desalojado.

Peso sumergido = Peso saturado – Empuje

El resultado que se da es la media aritmética de tres muestras ensayadas.

Fig 4.42.
Muestras sumergidas para obtención de peso saturado.

4.9.2 Coeficiente de absorción por inmersión

Estudiamos en este caso la penetración de agua bajo la presión de la columna de agua. El coeficiente de absorción de agua por inmersión es la relación, en tanto por ciento, del agua absorbida y de la masa seca del material. Este coeficiente se puede calcular a tiempos diferidos (por ejemplo a 5 min, 10 min, 15 min. Etc.), pero cuando la cantidad de líquido que se introduce en los poros accesibles es tal que satura totalmente estos, es decir, cuando la humedad es máxima se denomina Absorción normal.

Recibe el nombre de absorción normal, la relación que hay entre el peso de líquido que es capaz de absorber un material respecto del peso desecado del material,

CAPÍTULO 4: Método experimental

expresado en %. Por tanto a partir de los datos obtenidos para el cálculo de la porosidad, podemos calcular el coeficiente de absorción mediante la expresión (UNE EN 14617-1 2013: "Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua"):

$$C_a (\%) = \frac{P_{sat} - P_0}{P_0} \times 100$$

El resultado que se da es la media aritmética de tres muestras ensayadas.

4.9.3 Coeficiente de absorción por capilaridad

No sólo es importante conocer la cantidad de agua que es capaz de absorber un material, sino también la velocidad a la que lo hace. El coeficiente de absorción por capilaridad $C_{c,t}$ expresado en $g/(m^2 \cdot s^{0,5})$ se calcula en función del incremento de peso, de la superficie de contacto y de la raíz cuadrada del tiempo, según la expresión (UNE EN 1925:1999: "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad"):

$$C_{c,t} = \frac{P_t - P_0}{A_s \cdot \sqrt{t}}$$

Siendo P_t el peso, en gramos, de la probeta húmeda en función del tiempo t , en segundos; P_0 el peso seco, como se explicaba anteriormente; y A_s el área de la sección de la superficie sumergida.

A continuación se describe el procedimiento seguido para calcular el coeficiente de absorción por capilaridad. Como en los ensayos anteriores, se ensayan tres muestras del material anotando primero su peso natural (P_{nat}) y se seca en estufa a $(40 \pm 5)^\circ C$ hasta obtener masa constante, es decir hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesiva es inferior al 0,1%. Una vez seco se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se anota el peso seco (P_0).

Se mide la superficie de contacto con el agua, A_s , suponiendo que colocamos las muestras en posición vertical, es decir la superficie será de 4cm x 4cm.

Se colocan (fig. 4.43.) las probetas en la posición indicada sobre un soporte dentro de un recipiente, para que no estén en contacto con el fondo del mismo y se rellena éste de agua hasta alcanzar una altura de 5 ± 1 mm. Este nivel de agua se mantendrá constante durante todo el ensayo, añadiendo más agua si fuera necesario.

Fig 4.43.
Ensayo de absorción por capilaridad.

A intervalos de tiempo se extraen las probetas, se secan ligeramente (eliminando el agua superficial) y se pesan y se mide la altura alcanzada por el agua en las 4 caras laterales registrándose los resultados. Después se vuelven a colocar con la mayor rapidez posible. El resultado es la media de las tres muestras ensayadas. Según la norma es necesario obtener un mínimo de 7 medidas de peso para calcular el coeficiente de absorción por capilaridad. Para obtener los valores de altura se hace previamente en cada una de las muestras la media de sus 4 caras.

Los intervalos de tiempo dependen según la norma del tipo de piedra: de alta o baja absorción. En el ensayo se han evaluado dos periodos diferentes, en el primero que sería el correspondiente a alta absorción los intervalos han sido de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos. En el segundo periodo analizado, que se correspondería con materiales de baja absorción los intervalos han sido de 30, 90, 180, 480, 1440, 2880 y 4320.

4.9.4 Estimación del tamaño del poro y su distribución

La cinética de imbibición o movimiento capilar en medios porosos, fue abordada por primera vez por Washburn (1921).

El proceso de transporte de agua al interior de los materiales está directamente relacionado con el tamaño de sus poros y con su grado de tortuosidad (Fort, 1996).

Según el tamaño de los poros (fig. 4.43.) las fuerzas que actúan son diferentes. En los megaporos actúa la gravedad, en los macroporos la capilaridad y en los microporos los procesos de difusión.

Fig 4.44.

Cantidad y movilidad de agua en función del tamaño de los poros.

Fort, R. (1996). "El agua en los materiales pétreos: comportamiento hídrico". En: *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico* (F. Mingarro. Ed.), Ed. Complutense, Madrid, 237-248.

Dependiendo del tamaño de los poros se puede seleccionar la técnica porométrica más apropiada (fig 4.44.): Microscopía electrónica de barrido, porimetría de mercurio, succión de agua, etc.

El transporte de agua por capilaridad en este tipo de materiales de construcción es el mecanismo más importante. La succión por capilaridad está directamente relacionada con la porosidad y la distribución y tamaño del poro, y aunque pueden tener distintas formas, podemos hacer una simplificación y considerar los poros como tubos capilares cilíndricos.

Fig 4.45.

Límites de medidas del tamaño de los poros con distintas técnicas porométricas.

Fort, R. (1996). "El agua en los materiales pétreos: comportamiento hídrico". En: *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico* (F. Mingarro. Ed.), Ed. Complutense, Madrid, 237-248.

Cuando un líquido, que moja, está en contacto con un tubo capilar de radio r , tiende a ascender a través de él por la tensión superficial líquido-gas. La diferencia de presión, Δp , viene definida por la ecuación de Laplace:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

Siendo:

θ el ángulo de contacto entre la superficie de los poros y el líquido-gas. En este tipo de materiales se dice que el agua moja al sólido y el ángulo de contacto es 0.

σ la tensión superficial (N/m)

r radio del capilar (m)

CAPÍTULO 4: Método experimental

Como la presión dentro del líquido es menor que fuera, este tiende a subir hasta que alcanza el equilibrio hidrostático, es decir hasta que el peso por unidad de área del capilar ($\Delta p = \rho gh$) es igual a la presión capilar. Obtenemos así la expresión conocida como ecuación de Jurín:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

Siendo:

h la altura de ascensión capilar (m)

ρ la densidad del fluido (kg/m³)

g la aceleración de la gravedad (m/s²)

Si consideramos los valores para un tubo de vidrio en el aire a nivel del mar con agua:

$$\sigma = 0,0728 \text{ N/m}$$

$$\theta = 0$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Si, como decíamos anteriormente, consideramos los poros como tubos capilares cilíndricos podemos hacer una estimación del radio medio de los mismos para cada uno de los compuestos, teniendo en cuenta la altura alcanzada por el agua absorbida por capilaridad en función del tiempo.

Los valores de la altura alcanzada se obtienen como se indicaba en el ensayo anterior: se halla la media de la variación de la altura alcanzada por el agua absorbida de las tres muestras ensayadas en función del tiempo, haciéndose previamente la media de sus caras. Mediante este procedimiento y teniendo en cuenta la dimensión de las muestras utilizadas (16 cm), el límite máximo del tamaño del poro que podemos estudiar, de acuerdo a la ecuación de Jurín es de $r = 92,8 \text{ }\mu\text{m}$, que corresponde a un

diámetro de 185,6 μm . Es decir se limita al estudio del tamaño de megaporos (diámetro > 100 μm).

Aunque el procedimiento empleado (succión de agua) permite el estudio de macroporos (100-1 μm) e incluso en parte de microporos (1-0,01 μm), la altura de las muestras necesarias sería inviable. Por ejemplo para 1 μm , la altura requerida sería de 2,97 m.

A partir de los datos obtenidos del tamaño medio del radio de los poros, se analiza su distribución de acuerdo al incremento de masa en función del tiempo.

4.9.5 Expansión volumétrica por absorción de agua.

Algunos materiales experimentan una dilatación debida a las tensiones que se producen por la absorción de agua. Esta expansión volumétrica puede llegar a producir fisuraciones en el material.

El ensayo consiste en determinar el hinchamiento que experimenta una muestra no confinada durante la absorción de agua a partir de la medida de su expansión lineal según tres direcciones ortogonales. Para hacerlo se ha aprovechado el ensayo de absorción de agua a intervalos de tiempo más largos, determinándose así la expansión por absorción de agua en función del tiempo.

Se miden las dimensiones iniciales en las tres direcciones ortogonales de la probeta seca, antes del inicio del ensayo. Aunque se miden a lo largo de todo el ensayo de absorción por capilaridad las dimensiones en las tres direcciones indicadas con calibre, sólo se incluyen las tomadas a las 8 horas, pues a periodos mayores de tiempo se producen pérdidas de material que distorsionan los resultados finales. Se determina así el incremento de longitud y se obtiene la deformación en % mediante la expresión:

$$\xi = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100$$

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos en los ensayos y su discusión. El orden seguido coincide con el del capítulo "Método Experimental".

Para la caracterización física y mecánica se han elaborado tablas con los resultados obtenidos para los diferentes ensayos realizados: Relación A/Y, densidad, flexión, compresión, dureza Shore C, módulo de elasticidad dinámico y estático. Así mismo se han obtenido las correspondientes gráficas y las curvas de tendencia que permitirían predecir el comportamiento del compuesto cuando se elaboran las muestras con otras dosificaciones.

En los ensayos térmicos se han elaborado tablas y gráficas en primer lugar para cada placa comprobándose su estabilización de temperatura, después para cada serie y para cada espesor, y por último se han obtenido los valores medios para cada serie. Se comparan los resultados empíricos de los compuestos con los correspondientes a modelos teóricos basados en la ley de mezclas.

En los ensayos acústicos se elaboran también tablas y gráficas comparativas. En los de aislamiento acústico se diferencian en función del espesor de placa y de la posición respecto al emisor acústico. En los de absorción acústica se efectúa un análisis en frecuencias para cada serie diferenciándose dos valores en función del tratamiento o no de la superficie de las muestras. Los resultados de aislamiento a ruido aéreo se comparan con los teóricos de acuerdo a la ley de masas.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Las tablas y gráficas que resumen los resultados de los ensayos de comportamiento frente al agua se han realizado por granulometrías y porcentajes de adición de caucho. Para estudiar la absorción por capilaridad se han diferenciado dos periodos de tiempo y dos intervalos diferentes, a partir de los cuales también se ha estudiado el tamaño del poro

Los datos obtenidos permiten seleccionar los compuestos más adecuados, por tener un mejor comportamiento global.

En cada uno de los ensayos se incluye la discusión de los resultados.

Para analizar las diferentes características se han comparado los valores obtenidos para cada muestra con:

- a.- Los de la muestra de referencia.
- b.- Los de su misma granulometría y otras proporciones de adición de caucho.
- c.- Los de otras granulometrías.

5.1 .ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPUESTO FRESCO.

5.1.1 Determinación de la relación A/Y

La tabla 5.1 presenta los valores experimentales obtenidos.

Como se decía en el capítulo de "método experimental" se ha utilizado como constante la trabajabilidad de la mezcla buscándose un comportamiento similar ante la mesa de sacudidas.

Se ha conseguido así obtener mezclas muy homogéneas y con muy buena trabajabilidad para el grano fino y medio. Con el grano más grueso resulta más difícil obtener una masa homogénea, se produce una mayor disgregación y empeora en general la trabajabilidad a medida que se aumenta la proporción de caucho en la mezcla, apareciendo en algún caso coqueas. Mínimas modificaciones en la cantidad de agua añadida producen distorsiones considerables, por lo que fue necesario repetir el proceso para comprobar que no existía error. Ha sido imposible realizar el amasado para el tamaño de grano mayor, con un 60% de adición de caucho, decidiéndose por tanto eliminar esta serie de todos los ensayos

En general se comprueba que cuanto mayor es la proporción de caucho y más grueso es el residuo, menor es la trabajabilidad del compuesto. Coincidiría con las observaciones de Khatib y Bayomy (1999) para hormigones con caucho, que indicaban la disminución en la trabajabilidad al aumentar el contenido en volumen del caucho así como que eran más viables las mezclas con caucho de menor granulometría.

En la serie de referencia, se obtiene una relación A/Y de 0,58, inferior a la recomendada por el fabricante de 0,7, lo que podría suponer una pequeña aceleración del proceso de fraguado²³.

²³ Oliver Ramírez, Alicia (2009) "Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios". Tesis doctoral UPM. pg 179-189 "Cuando la proporción de agua respecto del resto de agregados (yeso, caucho) es baja, los núcleos de cristalización están muy próximos entre sí, hay más atracción química entre estas moléculas y el agua, lo que acelera la reacción, el fraguado)

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Cuando añadimos caucho en una proporción del 30%, independientemente del tamaño del tamaño de la carga, la cantidad de agua requerida por la mezcla disminuye (tabla 5.1.), algo que parecía esperable puesto que el caucho no requiere agua. Los valores obtenidos llegan a ser extremadamente bajos, hasta de 0,45 en el grano medio, un 22,4% inferior a la serie de referencia.

Sin embargo a medida que se incrementa la proporción de caucho del compuesto en lugar de disminuir la cantidad de agua requerida para el amasado aumenta, incrementándose también el tiempo de fraguado. Este efecto nos lleva a pensar que el caucho retiene una gran cantidad de agua inicialmente alargándose los tiempos de fraguado y permitiendo una hidratación más lenta del polvo de escayola. Cuando las adiciones de caucho son menores (30%), la cantidad de agua necesaria es menor porque la mayor avidez de agua del caucho se compensa con la menor cantidad de escayola y por tanto menor requerimiento de agua de fraguado, invirtiéndose el proceso conforme se incrementa la proporción de caucho.

Denominación	Agua (g)	Escayola (g)	Caucho (g)	% A/Y sobre R	Relación (A/Y)
R	580	1000	0		0.58
C-30-0.6	530	700	300	-8,7	0.53
C-40-0.6	600	600	400	3,4	0.60
C-50-0.6	670	500	500	15,5	0.67
C-60-0.6	770	400	600	32,7	0.77
C-30-2.5	450	700	300	-22,4	0.45
C-40-2.5	490	600	400	-15,5	0.49
C-50-2.5	570	500	500	-1,7	0.57
C-60-2.5	690	400	600	19	0.69
C-30-4.0	500	700	300	-13,8	0.50
C-40-4.0	560	600	400	-3,5	0.56
C-50-4.0	570	500	500	-1,7	0.57

Tabla 5.1.

Determinación de la relación A/Y

Esta mayor absorción de agua inicial debida a la incorporación de caucho, produciría posteriormente un aumento en el contenido de aire y por tanto un incremento de la porosidad. Fedroff et al (1996) y Khatib y Bayomi (1999) también observaron que en los hormigones con caucho se producía una mayor cantidad de aire ocluido.

Este incremento en la proporción de agua, que llega a ser superior al 30% respecto a la serie de referencia en el compuesto C-60-0.6, influirá en las propiedades mecánicas²⁴, la densidad y la porosidad. Pero en los compuestos que contienen caucho con una relación A/Y inferior a la serie de referencia, también se produce este efecto como se verá más adelante.

Fig 5.1.

Relación A/Y para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

En las gráficas obtenidas (Fig. 5.1.) se aprecian tendencias casi lineales para el grano fino y medio. En el grano grueso no se puede deducir ninguna ley de

²⁴ Villanueva Domínguez, L. et al: "La relación agua/yeso correspondiente a una consistencia normalizada, por ejemplo, la del agua de amasado a saturación, puede adoptar distintos valores influyendo en la resistencia final, que es inversamente proporcional al cuadrado del factor agua/yeso utilizado".

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

comportamiento por la imposibilidad de realizar el amasado para la adición del 60% de caucho y porque ya para el 50% se aprecian distorsiones debido al empeoramiento de la trabajabilidad. Esto se refleja en una gráfica que, entre el 30% y el 40% de adición de caucho, se inicia con una pendiente semejante a la de las otras granulometrías, pero que a continuación se modifica.

Si comparamos las gráficas para las diferentes granulometrías, podemos apreciar la influencia de este factor, resultado que el tamaño de grano más fino requiere una mayor cantidad de agua que los otros dos, siendo el grano medio el que tiene unas proporciones de agua menores. En el tamaño más fino la superficie es mayor para un mismo peso y por tanto también mayor la cantidad de aire que rodea esa superficie. En el tamaño más grueso el proceso se invierte porque la trabajabilidad empeora y la mezcla se disgrega.

5.2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS.

5.2.1 Aspecto físico de las muestras.

En relación al aspecto físico de las muestras se observa una modificación en el color y la textura de las mezclas diferenciándose claramente según el tamaño del grano (Fig 5.2.).

Fig 5.2.

Sección de probetas para los tres tamaños de grano

Las caras en contacto con los moldes presentan un aspecto semejante, variando únicamente el tono más grisáceo en el grano más fino, con diferentes tonalidades según el porcentaje de adición, y más blanco conforme mayor es el tamaño del grano.

La cara que no está en contacto con el molde tiene diferentes texturas, además de tonalidades. Lógicamente es más rugosa cuanto mayor es el tamaño del grano y mayor la cantidad de carga añadida.

Aunque la unión entre ambos materiales es sólo mecánica, parece estable.

5.2.2 Peso al desmoldar y peso seco

La tabla 5.2. presenta los resultados de las probetas normalizadas al desmoldar, tras el proceso de fraguado, después de desecarse hasta masa constante a $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ y enfriarse en desecador hasta la temperatura del laboratorio de ensayo y la disminución de peso que se produce durante el proceso.

Fig 5.3.

Porcentaje disminución de peso húmedo a seco para para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

En primer lugar hay que destacar que la dispersión en los resultados de las tres muestras de cada serie es mayor para el grano más grueso, lo que viene a confirmar la menor homogeneidad de las amasadas. En el grano más fino las dispersiones, en general y especialmente para las menores adiciones de caucho, son incluso inferiores a las de la muestra patrón.

Tras el proceso de fraguado el yeso experimenta una reducción de peso, de la mezcla húmeda a la seca, como consecuencia del secado del agua de la mezcla. No se ha observado variación de volumen en este proceso (las probetas húmedas y secas tienen las mismas dimensiones) ya que durante el curado se experimenta una expansión que contrarresta la retracción que sufre por la pérdida de agua. En consecuencia, la densidad del yeso se reduce tras el proceso de curado y la porosidad previsiblemente aumentará más cuanto mayor sea la relación A/Y.

En las gráficas obtenidas se observan tendencias casi lineales para todas las granulometrías, incluso para la serie C-50-4.0 (Fig. 5.3.).

La relación A/Y influye de forma directa en la pérdida de peso: a mayor relación A/Y, mayor pérdida de peso. Las gráficas de relación A/Y y % disminución de peso húmedo a seco son muy semejantes, exceptuando la serie C-50-4.0, que mantiene la pendiente de la curva de % de disminución de peso húmedo a seco, en su serie.

El contenido de caucho influye en la pérdida de peso. Se confirma que las mayores pérdidas de agua se dan en las mezclas más ricas en caucho NFU, y especialmente en el grano más fino, lo que viene a corroborar que el caucho produce un aumento en el contenido de aire y en consecuencia una absorción de agua mayor inicialmente, pero el agua necesaria para el fraguado sólo depende de la cantidad de escayola, perdiéndose por tanto ese excedente de agua durante el fraguado y produciéndose una ralentización en el mismo y posteriormente una mayor porosidad.

Podríamos decir entonces que el incremento de caucho, produce un incremento en la relación A/Y que a su vez hace que las muestras tengan una mayor pérdida de peso por la pérdida de agua, que conducirá previsiblemente a un aumento de la porosidad y a una disminución de la densidad.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Peso al desmoldar (g)	Peso medio al desmoldar (g)	Peso seco (g)	Peso medio seco (g)	Disminución peso (%)	Disminución peso medio (%)
R1	422.3		312.9		25.9	
R2	422.3	422.0	313.1	312.9	25.9	25.9
R3	421.3		312.6		25.8	
C-30-0.6-1	356.8		264.4		25.9	
C-30-0.6-2	356.5	356.7	264.2	264.3	25.9	25.9
C-30-0.6-3	356.9		264.3		25.9	
C-40-0.6-1	332.8		232.0		30.3	
C-40-0.6-2	330.6	331.4	230.3	230.8	30.3	30.3
C-40-0.6-3	330.8		230.2		30.4	
C-50-0.6-1	304.2		201.1		33.9	
C-50-0.6-2	293.4	299.3	193.4	197.5	34.1	34.0
C-50-0.6-3	300.3		198.1		34.0	
C-60-0.6-1	270.2		167.7		3.9	
C-60-0.6-2	270.7	270.6	167.1	167.4	38.0	38.0
C-60-0.6-3	271.0		167.4		38.0	
C-30-2.5-1	372.5		291.1		21.9	
C-30-2.5-2	373.0	372.8	292.2	291.9	21.7	21.7
C-30-2.5-3	373.0		292.3		21.6	
C-40-2.5-1	352.1		263.9		25.1	
C-40-2.5-2	349.0	348.9	261.5	261.5	25.1	25.1
C-40-2.5-3	345.7		259.1		25.1	
C-50-2.5-1	323.0		226.9		29.8	
C-50-2.5-2	327.1	324.7	229.6	228.1	29.8	29.8
C-50-2.5-3	324.2		227.9		29.7	
C-60-2.5-1	302.4		195.0		35.5	
C-60-2.5-2	303.5	301.0	195.8	194.1	35.4	35.5
C-60-2.5-3	297.1		191.6		35.5	
C-30-4.0-1	368.0		277.3		24.6	
C-30-4.0-2	364.0	365.3	275.2	275.7	24.4	24.5
C-30-4.0-3	364.0		274.6		24.6	
C-40-4.0-1	340.4		244.0		28.3	
C-40-4.0-2	342.4	341.4	246.4	246.0	28.0	28
C-40-4.0-3	341.3		247.6		27.5	
C-50-4.0-1	326.2		227.2		37.3	
C-50-4.0-2	327.9	336.4	231.3	228.7	29.5	31,8
C-50-4.0-3	319.1		227.7		28.6	

Tabla 5.2.

Variación de peso al desmoldar a peso seco para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

5.2.3 Determinación de la densidad seca

La tabla 5.3 refleja los resultados analíticos obtenidos del cálculo de la densidad húmeda y seca.

Denominación	Peso medio al desmoldar (g)	Densidad húmeda (Kg/m³)	Peso medio seco (g)	Densidad seca (Kg/m³)
R	422.0	1648.4	312.9	1222.3
C-30-0.6	356.7	1393.4	264.3	1032.4
C-40-0.6	331.4	1294.5	230.8	901.6
C-50-0.6	299.3	1169.1	197.5	771.5
C-60-0.6	270.6	1057.0	167.4	653.9
C-30-2.5	372.8	1456.2	291.9	1140.2
C-40-2.5	348.9	1362.9	261.5	1021.5
C-50-2.5	324.7	1268.4	228.1	891.0
C-60-2.5	301.0	1175.8	194.1	758.2
C-30-4.0	365.3	1391.8	275.7	1076.9
C-40-4.0	341.4	1333.6	246.0	960.9
C-50-4.0	336.4	1314.1	228.7	893.4

Tabla 5.3.

Densidad húmeda y seca de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

Las densidades obtenidas en las muestras patrón, esto es, para las que no contienen aditivos, son del orden de 1222 Kg/m³ (Tabla 5.3.), lo que está dentro de los parámetros establecidos por la normativa.

Como era previsible, se observa una reducción en la densidad a medida que se aumenta la proporción de caucho para todas las granulometrías, puesto que la densidad del caucho es menor que la de la escayola. Pero también porque al incrementarse el contenido de caucho, al incrementarse la relación A/Y, se produce un aumento en el contenido de aire y en consecuencia una mayor reducción de la densidad.

Esta disminución se produce tanto en la densidad húmeda como en la densidad seca, pues en ambos casos aumentamos el volumen sin apenas añadir masa. Se destaca este aspecto porque aunque la densidad y la porosidad están íntimamente ligadas a la proporción de agua de amasado, como se comprueba en todos los autores

(fig 1.4. y tabla 1.7.)²⁵, la densidad húmeda mantiene la misma tendencia que la densidad seca, y por tanto la disminución de densidad se debe a la adición de caucho para relaciones agua/yeso similares. Así en las mezclas con un factor A/Y más parecido al de referencia con A/Y=0,58 (C-40-0.6 con A/Y=0,60, C-50-2.5 con A/Y=0,57, C-40-4.0 con A/Y=0,56 y C-50-4.0 con A/Y=0,57), también se produce una disminución de la densidad, ocurriendo lo mismo en aquellas con un factor A/Y inferior al de referencia (C-30-0,6 con A/Y=0,53, C-30-2.5 con A/Y=0,45, C-40-2.5 con A/Y=0,49 y C-30-4.0 con A/Y=0,50) .

Fig 5.4.

Densidad en seco para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

Las líneas de tendencia derivadas de los resultados obtenidos se ajustan a ecuaciones casi lineales (Fig. 5.4.) y paralelas en función del tamaño del grano, es decir es directamente proporcional a la adición de caucho. Hay una excepción para el porcentaje de caucho del 50% en la granulometría más gruesa, en el que se produce un quiebro ascendente (mayor densidad), en correspondencia con los resultados de la relación A/Y.

²⁵ ARREDONDO Y VERDU, F. ; "Estudios de materiales" 1983, Madrid.
 S.N.F.I.P. "Chaiers Techniques", 1973-74, París.
 E. BLACHERE: *Saber construir*, Barcelona 1967
 COLLOMB y DALIGAND: *Comunicación a la Comisión Científico-técnica de Eurogysum*. Lyon, 1971.
 "Boletín Informativo del Yeso", núm. 4. Madrid, enero 1972.
 COLOMB: *Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico*. "Boletín Informativo del Yeso", núm. 14. Madrid, junio 1974.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Si analizamos la variación en la densidad en función del tamaño del grano, observamos que los mejores resultados (densidad más baja) se obtienen para el tamaño de grano más fino, 0-0.6. Sin embargo los siguientes mejores resultados se obtendrían para el grano más grueso, siendo el grano intermedio el que quedaría en tercer lugar. Coinciden estos valores con las relaciones A/Y en los que se apreciaba la influencia de este factor, resultado que el tamaño de grano más fino requería una mayor cantidad de agua que los otros dos. Este mayor requerimiento de agua que posteriormente se traduciría en una mayor porosidad podría estar relacionado con la mayor superficie específica del caucho de granulometría más fina.

El porcentaje de reducción de densidad (Fig. 5.5.) en relación a la serie de referencia de escayola varía entre el 7% y el 47%. Y si consideramos sólo la granulometría más fina, con la que se obtienen mejores resultados, la variación está entre el 26% y el 47%.

Fig 5.5.

Densidad en seco. Valores porcentuales en relación a la serie de referencia

Podemos decir que en la densidad influye más el porcentaje de carga añadida, que el efecto del tamaño de partícula. Aunque la disminución es mayor para las partículas más pequeñas, debido previsiblemente a la mayor porosidad del material compuesto obtenido. Albano et al (2005) obtenían resultados similares en hormigones. Estudiaba

dos tamaños de partículas (ambas más pequeñas que las de este trabajo 0,29 y 0,59) y manteniendo constante la relación a/c, la densidad disminuía más para el grano más fino.

5.2.4 Determinación de la dureza Shore C

Los resultados de los ensayos se reflejan en las tablas 5.4., 5.5. y 5.6.

El incremento de la cantidad de caucho NFU supone una disminución progresiva de la dureza superficial del compuesto. Al igual que en las gráficas de densidad la tendencia es lineal para el grano fino y medio (Fig. 5.6.), en el grano grueso se producen nuevamente distorsiones para las muestras C-50-4.0.

Fig 5.6.

Dureza Shore C para muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría. Valor mínimo establecido por normativa.

Si comparamos los resultados obtenidos en las gráficas de las muestras, teniendo en cuenta la variable de la granulometría observamos que para la granulometría más fina se obtienen los valores más bajos de Dureza Shore C. Podemos encontrar el motivo en que al aumentar el tamaño del grano, el caucho, como se observa al romper las probetas, queda recubierto por una capa de escayola de mayor espesor y nunca

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

queda completamente pegado a la superficie de la muestra, manteniéndose siempre flotando en la masa de escayola. De esta manera al presionar con el durómetro, lo hacemos inicialmente sobre una capa de escayola siempre mayor cuanto mayor es el tamaño del grano.

Según la normativa UNE 102-039 "Yesos y Escayolas de construcción. Determinación de la Dureza Shore C y de la dureza Brinell", para una muestra de yeso, sin aditivos, combinada con agua, la dureza Shore C, debería ser superior a 45ud (para los yesos aligerados y yesos tradicionales), dependiendo de la densidad del yeso, debiendo ser esta superior cuanto más denso sea aquel.

Si tenemos en cuenta esta limitación, los valores de dureza Shore C obtenidos para el grano fino y medio para las dosificaciones más elevadas del 50% y 60% de caucho NFU, serían inadmisibles, puesto que son inferiores al límite especificado. Así para la serie correspondiente al grano más fino la dureza Shore C con un 50% de caucho NFU, es de 29,2 .ud, y para el 60% de adición de caucho NFU, es de 13,9ud. En el grano media la dureza Shore C para la serie con un 50% de caucho NFU, es de 41,4 .ud, y para el 60% de adición de caucho NFU, es de 25 ud.

El resto de valores obtenidos en las mezclas son superiores a los exigidos por la norma.

En este apartado la influencia del factor A/Y utilizado parece tener una incidencia menor. Los valores que se obtendrían para las diferentes relaciones A/Y suponiendo que únicamente se utilizara escayola según Barriac²⁶ (Fig 1.7.) , serían de 89 ud para la serie de referencia y oscilarían entre 76 ud y 95 ud para el resto de relaciones A/Y, estando la mayoría en torno a 90 ud, con mejores resultados cuanto menor es la proporción de agua.

Aunque si podemos confirmar la correspondencia entre la proporción de agua y la dureza (a mayor proporción de agua, menor es la dureza), las importantes pérdidas de dureza comprobadas se deben a la incorporación de caucho NFU.

²⁶ *Influencia del agua de amasado sobre la dureza Shore C*

P. BARRIAC: *Medida de la dureza de los yesos, en laboratorio y en obra. Ponencia en la XXII Sesión de la Comisión Científico-técnica de Eurogypsum. Stuttgart, 1973. Boletín Informativo del Yeso, num. 12. Madrid, noviembre 1973.*

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Cara	M1	M2	M3	M4	M5	Valor medio probeta	Valor medio serie
R1	1	90	90	91	92	91	89.8	90.7
	2	87	90	90	87	90		
R2	1	91	90	91	92	92	91.1	
	2	87	92	95	90	91		
R3	1	90	94	91	93	91	91.3	
	2	90	92	90	91	91		
C-30-0.6-1	1	68	73	69	71	69	69.5	69.2
	2	70	70	72	68	65		
C-30-0.6-2	1	65	68	71	70	70	68.7	
	2	68	65	68	72	70		
C-30-0.6-3	1	70	69	69	70	70	69.5	
	2	68	70	70	69	70		
C-40-0.6-1	1	45	50	52	50	50	49.0	51.0
	2	49	45	51	53	45		
C-40-0.6-2	1	51	52	45	50	55	52.4	
	2	55	49	52	54	57		
C-40-0.6-3	1	49	50	54	50	55	51.8	
	2	54	49	52	54	51		
C-50-0.6-1	1	35	30	32	31	25	29.3	29.2
	2	30	25	25	32	28		
C-50-0.6-2	1	30	25	25	30	30	29.4	
	2	28	33	30	29	34		
C-50-0.6-3	1	30	23	30	26	29	29.0	
	2	26	30	32	34	30		
C-60-0.6-1	1	14	15	15	14	16	14.4	13.9
	2	10	14	16	15	15		
C-60-0.6-2	1	13	14	12	14	13	12.9	
	2	12	10	16	10	15		
C-60-0.6-3	1	14	14	13	15	12	14.3	
	2	15	13	16	16	15		

Tabla 5.4.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.0-0.6mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40,50 y 60% (unidades Shore C)

Fig 5.7.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.0-0.6 mm

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Cara	M1	M2	M3	M4	M5	Valor medio probeta	Valor medio serie
R1	1	90	90	91	92	91	89.8	90.7
	2	87	90	90	87	90		
R2	1	91	90	91	92	92	91.1	
	2	87	92	95	90	91		
R3	1	90	94	91	93	91	91.3	
	2	90	92	90	91	91		
C-30-2.5-1	1	85	78	78	84	72	78.7	78.5
	2	82	72	78	76	84		
C-30-2.5-2	1	78	84	80	82	75	79.0	
	2	86	74	81	80	70		
C-30-2.5-3	1	79	70	84	82	72	77.7	
	2	80	75	80	80	75		
C-40-2.5-1	1	65	62	60	64	56	60.8	60.4
	2	59	62	55	60	65		
C-40-2.5-2	1	60	66	63	73	62	62.8	
	2	56	64	60	64	60		
C-40-2.5-3	1	54	42	65	58	55	57.6	
	2	58	65	64	60	55		
C-50-2.5-1	1	40	40	42	35	45	39.0	41.4
	2	35	35	44	44	30		
C-50-2.5-2	1	45	42	44	44	39	42.7	
	2	44	41	45	39	44		
C-50-2.5-3	1	40	46	44	40	40	42.6	
	2	41	44	40	43	48		
C-60-2.5-1	1	25	24	30	28	30	26.5	25.0
	2	19	29	25	25	30		
C-60-2.5-2	1	20	26	21	20	20	23.3	
	2	26	25	25	25	25		
C-60-2.5-3	1	29	34	26	25	26	25.3	
	2	22	22	24	25	20		

Tabla 5.5.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.5-2.5 mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40,50 y 60% (unidades Shore C)

Fig 5.8.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 0.5-2.5 mm

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Cara	M1	M2	M3	M4	M5	Valor medio probeta	Valor medio serie
R1	1	90	90	91	92	91	89.8	90.7
	2	87	90	90	87	90		
R2	1	91	90	91	92	92	91.1	
	2	87	92	95	90	91		
R3	1	90	94	91	93	91	91.3	
	2	90	92	90	91	91		
C-30-4.0-1	1	70	83	80	85	78	76.2	78.7
	2	72	78	81	60	75		
C-30-4.0-2	1	75	78	83	84	81	80.2	
	2	82	82	80	72	85		
C-30-4.0-3	1	84	82	73	74	76	79.6	
	2	80	80	84	86	77		
C-40-4.0-1	1	55	60	55	45	50	50.4	54.3
	2	45	35	50	44	65		
C-40-4.0-2	1	63	60	54	69	62	55.7	
	2	50	49	45	65	40		
C-40-4.0-3	1	55	45	50	60	70	56.9	
	2	45	74	60	60	50		
C-50-4.0-1	1	55	55	50	42	46	62.0	52.3
	2	65	50	42	56	40		
C-50-4.0-2	1	47	50	42	43	45	46.4	
	2	57	40	50	50	40		
C-50-4.0-3	1	40	65	57	44	43	48.4	
	2	50	52	46	42	45		

Tabla 5.6.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm para adiciones de caucho NFU de 30, 40 y 50% (unidades Shore C)

Fig 5.9.

Dureza Shore C series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

5.2.5 Determinación de la resistencia a flexión

En la tabla 5.7. se reflejan los valores medios de resistencia a flexión alcanzados por cada una de las series estudiadas.

El valor medio de resistencia a flexión alcanzado por la muestra de referencia es de 7,5 N/mm², muy superior al recomendado por la Norma UNE-EN 13279, que establece para la escayola sin adiciones un valor mínimo recomendado de 1N/mm².

Las muestras que contienen caucho, independientemente de la cantidad del mismo y de la granulometría sufren un drástico descenso de la resistencia a flexión (Fig. 5.10.). Así, para las menores adiciones de caucho del 30% en peso, la disminución de resistencia en relación a la muestra patrón están entre el 58% de la serie C-30-0.6, correspondiente a la granulometría más fina, hasta el 66% de la serie C-30-4.0, correspondiente al mayor tamaño de grano.

Fig 5.10.

Resistencia a flexión series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola diferenciados por granulometrías.

Fig 5.11.

Resistencia a flexión de las series correspondiente a los compuestos caucho-escayola. Comparativa por granulometrías y % caucho en peso y valor mínimo admisible establecido por normativa

Si comparamos los resultados obtenidos en las gráficas teniendo en cuenta la variable de la granulometría (Fig. 5.11.), observamos que aunque las curvas son semejantes (con tendencias exponenciales que siguen una ley que se ajusta con un valor de R^2 que oscila entre 0,984 y 0.9996, dependiendo de la granulometría (Fig. 5.12)), la pendiente es diferente, disminuyendo a medida que el tamaño del grano aumenta. Esto se traduce en que, aunque la resistencia a flexión es mayor para un

Fig 5.12.

Resistencia a flexión de las series correspondientes a los compuestos caucho-escayola. Curvas de tendencia por granulometrías en función del % en peso del caucho.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

30% de caucho respecto al resto de granulometrías, en el 40% de caucho es mayor la resistencia a flexión en el grano medio y los valores llegan a ser prácticamente iguales para el 50% de caucho en las granulometrías media y gruesa, y claramente inferiores para la más fina. En torno al 40% de adición de caucho se producen las mayores similitudes en los valores de resistencia a flexión para las tres granulometrías analizadas.

La disminución generalizada que se produce en las muestras que contienen caucho, se debe en primer lugar a que las partículas de caucho, aunque se adhieren a la escayola, actúan como poros²⁷ que interfieren en la estructura cristalina del yeso. A este efecto hay que añadirle que además de los poros propios del yeso se produce un incremento de la porosidad como consecuencia de la incorporación de caucho, colaborando en la reducción de la resistencia tanto a flexión como a compresión, como se verá más adelante.

Turki et al. (2009) observaban la generación de microporos en torno a los agregados de caucho, en la zona de transición interfacial en morteros de cemento con caucho. Estas observaciones son compatibles con los resultados obtenidos. La mayor superficie de contacto entre los granos de caucho y la matriz de yeso en la granulometría más fina daría lugar a una mayor cantidad de aire ocluido que aumenta progresivamente con la proporción de caucho, produciendo previsiblemente una mayor porosidad y por lo tanto un mayor debilitamiento. Es decir en las partículas más finas el segundo aspecto, la microporosidad, aumentaría en mayor medida al aumentar el porcentaje de caucho. En las partículas de mayor tamaño, aunque también se produce un aumento de la cantidad de aire ocluido la progresión es menor al ser menor la superficie de contacto, dando como resultado esa diferencia en el desarrollo de las curvas (fig 5.12.) con una mayor pendiente para el grano más fino que para el más grueso.

El factor A/Y es otro elemento a tener en cuenta, que se valorará más adelante con el estudio de la porosidad.

Hay que destacar la diferencia en la rotura en la probeta de referencia de escayola sin adición y en el resto de probetas que contienen caucho.

²⁷ Eldin, N. and Senouci, A. (1993). "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate." *J. Mater. Civ. Eng.*, 5(4), 478–496.

La rotura de la probeta de referencia es frágil. (Fig. 5.13.)

En el resto de muestras (Fig. 5.14, Fig. 5.15 (a y b) y Fig. 5.16), aunque el ensayo se detiene porque la probeta parte, hay que separar los trozos manualmente porque los granos de caucho más próximos a la cara en que se aplica la fuerza, se mantienen adheridos a las dos superficies de fractura. El efecto es más acusado cuanto mayor

Fig 5.13.

Rotura a flexión muestra de referencia.

Fig 5.14.

Rotura a flexión muestra C-30-2.5

(a)

(b)

Fig 5.15.

Rotura a flexión muestras C-50-0.6(a) y C-60-2.5 (b)

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

es el tamaño del grano. Observándose para la granulometría más gruesa (al ser el tamaño del grano mayor se observa a simple vista) que las partículas de caucho se alargan como gomas elásticas, para finalmente quedar adheridas a una de las superficies de fractura, desprendiéndose de la otra sin romperse. De este efecto podemos sacar dos conclusiones.

La primera es que la adherencia entre el caucho y la matriz no es buena, aunque el NFU utilizado procede de tratamiento mecánico.

En este tipo de tratamiento la superficie de los granos de caucho es rugosa y la forma irregular, favoreciéndose así la adherencia con la matriz de escayola y mejorando por tanto la resistencia²⁸. Previsiblemente el resultado diferiría en el caso de que el granulado procediera de tratamiento criogénico cuya forma es más regular y su superficie es lisa, produciendo otras formas de rotura²⁹. Los granos rugosos producen una mayor resistencia por la mejor adherencia, pero en todo caso la adherencia no es buena.

Fig 5.16.

Rotura a flexión muestras C-50-4.0

²⁸ Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A., & Quéneudec, M. (2003). *Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. Cement and Concrete Composites*, 25(7), 711-720.

²⁹ Eldin, N. and Senouci, A. (1993). "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate." *J. Mater. Civ. Eng.*, 5(4), 478-496.

Hay que tener en cuenta que el caucho es un polímero no rígido que aguanta la fuerza hasta tal punto que es más fácil arrancar el grano entero de la escayola que romperlo.³⁰

La segunda conclusión es que el comportamiento³¹ observado pone de manifiesto la mejora de la tenacidad del compuesto³². Y por tanto hace necesario el estudio de su módulo de elasticidad.

La UNE EN13279 establece que, para yesos tipo B1 a B6, la resistencia a flexión debe ser superior a 1 N/mm², para yesos de alta dureza, tipo B7, superior a 2 N/mm² y para yesos con fibras, superior a 3 N/mm², como una categoría de yeso especial. No se establece ningún valor mínimo para el resto de yesos especiales (yesos acústicos, para aislamiento térmico,...). Por tanto podemos considerar admisibles aquellos compuestos cuya resistencia a flexión sea superior a 1 N/mm², que se da en las series cuyo contenido en caucho es del 30%, 40% y 50% para todas las granulometrías. Para contenidos de caucho más elevados la disminución de la resistencia a flexión es tan fuerte que no llega a los valores mínimos admitidos.

³⁰ *"Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (nfus)". Flores Medina, D. (2013). Tesis doctoral UPM.*

³¹ *"Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno" Melián, G.; Barluenga, G.; Hernández Olivares, F. Materiales de construcción, 2010, 60, 300, 83, Institut Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento., Madrid,*

³² *"Fiber-reinforced cement composites" Balaguru, Perumalsamy N.; Shah, Surendra P. Fuente: 1992, Mac Graw-Hill.*

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Carga (N)	Resistencia a Flexión (N/mm²)	Valor medio (N/mm²)
R1	2883.0	6.7462	7.5013
R2	3880.0	9.0792	
R3	2854.0	6.6784	
C-30-0.6-1	1347.0	3.1519	3.1605
C-30-0.6-2	1308.7	3.0623	
C-30-0.6-3	1396.3	3.2673	
C-40-0.6-1	822.2	2.0643	2.0511
C-40-0.6-2	872.6	2.0418	
C-40-0.6-3	874.9	2.0472	
C-50-0.6-1	549.8	1.2865	1.2442
C-50-0.6-2	517.0	1.2098	
C-50-0.6-3	528.4	1.2364	
C-60-0.6-1	340.0	0.7956	0.7789
C-60-0.6-2	323.3	0.7565	
C-60-0.6-3	335.3	0.7846	
C-30-2.5-1	1225.1	2.8667	3.0035
C-30-2.5-2	1313.7	3.0741	
C-30-2.5-3	1311.9	3.0698	
C-40-2.5-1	928.9	2.1736	2.1401
C-40-2.5-2	881.5	2.0627	
C-40-2.5-3	933.3	2.1839	
C-50-2.5-1	627.5	1.4683	1.4670
C-50-2.5-2	604.1	1.4136	
C-50-2.5-3	649.2	1.5191	
C-60-2.5-1	456.0	1.0670	1.0415
C-60-2.5-2	440.7	1.0312	
C-60-2.5-3	438.6	1.0263	
C-30-4.0-1	1172.3	2.7432	2.5738
C-30-4.0-2	1095.9	2.5644	
C-30-4.0-3	1031.5	2.4137	
C-40-4.0-1	742.2	1.7367	1.8517
C-40-4.0-2	784.1	1.8347	
C-40-4.0-3	847.8	1.9838	
C-50-4.0-1	658.4	1.5406	1.4963
C-50-4.0-2	639.6	1.4966	
C-50-4.0-3	620.4	1.4517	

Tabla 5.7.

Resistencia a flexión serie de referencia y compuestos escayola-caucho para todas las granulometrías.

5.2.6 Determinación de la resistencia a compresión

En las tablas 5.8., 5.9. y 5.10. se reflejan los valores medios de resistencia a compresión alcanzados por cada una de las series estudiadas.

El valor medio de resistencia a flexión alcanzado por la muestra de referencia es de 23,53 N/mm², muy superior al recomendado por la Norma UNE-EN 13279, que establece para los yesos de construcción un valor mínimo recomendado de 2 N/mm².

Las muestras que contienen caucho, independientemente de la cantidad del mismo y de la granulometría, sufren un descenso muy importante de la resistencia a compresión en relación a la serie de referencia (Fig. 5.17.), mucho más acusado que en la resistencia a flexión. Así para adiciones del 30% en peso de caucho, la disminución de la resistencia compresión en relación a la probeta de referencia está entre el 77% para la granulometría más fina y el 82% para la más gruesa, quedando en un valor intermedio del 79% para la de grano medio.

Fig 5.17 .

Resistencia a compresión series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola por granulometrías.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

La mayor reducción de la resistencia a compresión en relación a la resistencia a flexión coincide con los resultados obtenidos en todos los autores, tanto en morteros de yeso o cemento como en hormigones. En hormigones además las pérdidas eran superiores al sustituir el agregado grueso.

Este descenso es mayor a medida que incrementamos la cantidad de caucho.

La disminución generalizada que se produce en las muestras que contienen caucho, se justifica de la misma manera que la reducción de la resistencia a flexión, es decir porque las partículas de caucho actúan como poros que interfieren en la estructura cristalina del yeso y por el incremento de la porosidad con la adición de caucho.

Fig 5.18 .

Resistencia a compresión de las series correspondientes a los compuestos escayola-caucho.

Comparativa por granulometrías y % caucho en peso y valor mínimo admisible establecido por normativa.

Si comparamos los resultados obtenidos en las gráficas teniendo en cuenta la variable de la granulometría (Fig. 5.18.), observamos que en todas ellas disminuye la resistencia a compresión a medida que aumentamos el % de caucho, los resultados muestran la mayor influencia del porcentaje de caucho que el efecto del tamaño de partícula. Pero ocurre lo mismo que en la resistencia a flexión: aunque las curvas son

semejantes (con tendencias exponenciales que siguen una ley que se ajusta con un valor de R^2 que oscila entre 0,9941 y 0,9989, dependiendo de la granulometría (Fig. 5.19)), la pendiente es diferente, disminuyendo a medida que el tamaño del grano aumenta. Esto se traduce en que, aunque la resistencia a compresión es mayor en la granulometría más fina (0-0.6) para un 30% de caucho respecto al resto de granulometrías, en el 40% de caucho es mayor la resistencia a compresión en el grano medio, en el 50% de caucho es mayor la resistencia a compresión en el grano más grueso disminuyendo para el grano medio y el fino por este orden. Aunque para el 60% de caucho sólo podemos comparar en las granulometrías fina y media, la tendencia de la curva es la misma, acusándose más las diferencias de resistencia, por las diferentes pendientes de la curva.

Podemos atribuirlo, como en la resistencia a flexión, al mayor incremento de la superficie de contacto entre los granos de caucho y la matriz de yeso en la granulometría más fina que da lugar a una mayor cantidad de aire ocluido que aumenta progresivamente con la proporción de caucho, produciendo previsiblemente una mayor porosidad y por lo tanto un mayor debilitamiento.

Fig 5.19 .

Resistencia a compresión de las series correspondientes a los compuestos escayola-caucho. Curvas de tendencia por granulometrías en función del % de caucho en peso.

Pero Albano et al (2005) que utilizaba dos tamaños de grano (0,29 mm y 0,59 mm), cuando sustituía el árido fino en hormigones en porcentajes del 5% y 10%, obtenía reducciones de la resistencia a compresión mayores para el grano más fino. Si

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

calculamos el valor de la resistencia a compresión a partir de las curvas obtenidas en este estudio, se obtendrían valores superiores para el grano más fino, lo que nos llevaría a considerar el factor de la relación A/Y. Serna et al (2012), apuntaba a una mayor influencia en los resultados de resistencia por la relación A/Y, que por el tamaño de partícula. Aunque también hay que tener en cuenta que los tamaños analizados eran de 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, en Serna et al y de 0,29 mm y 0,59 mm, en Albano et al, es es decir todos inferiores a los empleados en este estudio. Y en ambos casos las adiciones eran inferiores (Serna sólo llegaba al 3% y 5%).

Como ocurría con la rotura a flexión, en la rotura a compresión se producen diferencias significativas en la forma de rotura de las distintas muestras.

La muestra patrón presenta la forma de rotura normal de los productos de yeso (Fig. 5.20.).

Fig 5.20 .

Rotura a compresión muestra de referencia

En las muestras que contienen caucho, cuando las probetas alcanzan la carga de rotura se producen distintas situaciones.

Las muestras de las series C-30-0.6 (Fig. 5.21.(a)) y C-40-0.6 (Fig. 5.21.(b)), correspondientes al grano más fino y con los menores porcentajes de adición de caucho utilizados del 30 y 40%, se fisuran pero quedan cosidas por el caucho.

Fig 5.21 .
Rotura a compresión muestras C-30-0.6(a) y C-40-0.6(b)

Las muestras de las series C-30-2.5. (Fig. 5.22.(a)) y C-30-4.0 (Fig. 5.22.(b)), correspondientes a los menores porcentajes de adición de caucho utilizados del 30 %, para los tamaños de caucho medio y grueso, sufren fisuras y abombamientos pero también se mantienen cosidas por el caucho aunque en menor medida que las anteriores.

Fig 5.22 .
Rotura a compresión muestras C-30-2.5(a) y C-30-4.0(b)

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

La muestra de la serie C-40-2.5. (Fig. 5.23.), después de fisurarse y abombarse como las anteriores, rompe.

Fig 5.23 .

Rotura a compresión muestra C-40-2.5

Para todas las granulometrías, las muestras con porcentajes de adición de caucho del 50% y 60% (Fig. 5.24. (a), (b), (c) y (d)), cuando llegan a la tensión de rotura, se desmoronan.

Nuevamente estas observaciones, que demuestran la tenacidad de los compuestos, nos llevan a considerar la necesidad del estudio de su comportamiento elástico mediante el cálculo del módulo de elasticidad para comprender mejor el comportamiento mecánico de los mismos.

Por otro lado las conclusiones sobre porosidad conducen al análisis de este aspecto con el mismo fin.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en compresión consideramos admisibles únicamente aquellos compuestos cuya resistencia a compresión es superior a 2 N/mm², valor recomendado por la Norma UNE-EN 13279. Por tanto tendríamos que descartar los compuestos con contenido en caucho del 50% y 60% en peso para los tres tamaños de grano (Tablas 5.8., 5.9. y 5.10.).

Fig 5.24 .

Rotura a compresión muestras C-50-0.6(a), C-60-0.6 (b), C-50-2.5(c) y C-60-2.5(d)

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Semiprobeta	Carga (N)	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Resistencia a compresión media (N/mm ²)
R1	1	38516	24.07	23.53
	2	38360	23.97	
R2	1	37766	23.60	
	2	38360	23.97	
R3	1	37731	23.58	
	2	35234	22.02	
C-30-0.6-1	1	8910	5.57	5.55
	2	8924	5.58	
C-30-0.6-2	1	8912	5.57	
	2	8893	5.56	
C-30-0.6-3	1	8842	5.53	
	2	8780	5.49	
C-40-0.6-1	1	4467	2.79	2.74
	2	4360	2.72	
C-40-0.6-2	1	4430	2.77	
	2	4419	2.76	
C-40-0.6-3	1	4258	2.66	
	2	4354	2.72	
C-50-0.6-1	1	2063	1.29	1.24
	2	2066	1.29	
C-50-0.6-2	1	1899	1.19	
	2	1900	1.19	
C-50-0.6-3	1	1970	1.23	
	2	1970	1.23	
C-60-0.6-1	1	861	0.54	0.55
	2	867	0.54	
C-60-0.6-2	1	893	0.56	
	2	890	0.56	
C-60-0.6-3	1	907	0.57	
	2	883	0.55	

Tabla 5.8.

Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 0-0.6mm

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Semiprobeta	Carga (N)	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Resistencia a compresión media (N/mm ²)
R1	1	38516	24.07	23.53
	2	38360	23.97	
R2	1	37766	23.60	
	2	38360	23.97	
R3	1	37731	23.58	
	2	35234	22.02	
C-30-2.5-1	1	8158	5.10	5.07
	2	7302	4.56	
C-30-2.5-2	1	8072	5.05	
	2	8599	5.37	
C-30-2.5-3	1	7897	4.94	
	2	8607	5.38	
C-40-2.5-1	1	4562	2.85	2.74
	2	4527	2.82	
C-40-2.5-2	1	4388	2.74	
	2	4430	2.76	
C-40-2.5-3	1	4321	2.70	
	2	4605	2.87	
C-50-2.5-1	1	2190	1.36	1.38
	2	2188	1.36	
C-50-2.5-2	1	2181	1.36	
	2	2337	1.46	
C-50-2.5-3	1	2172	1.35	
	2	2230	1.39	
C-60-2.5-1	1	1402	0.88	0.87
	2	1405	0.88	
C-60-2.5-2	1	1403	0.88	
	2	1389	0.87	
C-60-2.5-3	1	1357	0.85	
	2	1394	0.87	

Tabla 5.9.

Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 0.5-2.5 mm

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Semiprobeta	Carga (N)	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Resistencia a compresión media (N/mm ²)
R1	1	38516	24.07	23.53
	2	38360	23.97	
R2	1	37766	23.60	
	2	38360	23.97	
R3	1	37731	23.58	
	2	35234	22.02	
C-30-4.0-1	1	6906	4.32	4,24
	2	7233	4.52	
C-30-4.0-2	1	6756	4.22	
	2	6095	3.81	
C-30-4.0-3	1	6810	4.26	
	2	6843	4.28	
C-40-4.0-1	1	4028	2.52	2.50
	2	4141	2.59	
C-40-4.0-2	1	4086	2.55	
	2	3915	2.45	
C-40-4.0-3	1	3961	2.48	
	2	3814	2.38	
C-50-4.0-1	1	2771	1.73	1.56
	2	2487	1.55	
C-50-4.0-2	1	2555	1.60	
	2	2552	1.59	
C-50-4.0-3	1	2403	1.50	
	2	2257	1.41	

Tabla 5.10.

Resistencia a compresión series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm

5.3. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los resultados obtenidos son los que aparecen en las tablas 5.11, 5.12. y 5.13. Las denominaciones utilizadas en la tabla para las placas son las mismas que las de las probetas de los ensayos mecánicos añadiéndose al principio un número, 2 o 3, que hace referencia al espesor de la placa.

Aunque el espesor no influye en la conductividad térmica, se han confeccionado placas de dos espesores para los ensayos de aislamiento acústico y a partir de esas mismas placas se han obtenido los valores de conductividad. Por tanto la inclusión de valores con diferenciación por espesores es informativa.

Para cada una de las placas se han elaborado tablas con los datos de los 30 minutos seleccionados y se han realizado gráficas de las mismas, en las que se comprueba la estabilidad a lo largo de toda la medición.

A continuación se muestra un ejemplo para una de las placas (Fig. 5.25.).

Se han comprobado las temperaturas en todos los puntos de medición para cada una de las placas y sus fluctuaciones a lo largo del periodo de medición. Los resultados se reflejan en las figuras 5.26 a 5.30 incluyéndose tablas y gráficas.

- Fig. 5.26: T^a en el interior de la caja. Las temperaturas máximas alcanzadas se encuentran entre los 59,9°C y los 61,9°C. Si consideramos cada una de las placas las fluctuaciones están entre 0,2°C y 1,1°C (excepto 2 placas todas son <0,8°C). Se observan claras diferencias entre las placas de espesor 2 cm, cuyas fluctuaciones son menores, entre 0,2°C y 0,8°C, y las de 3 cm, que varían entre 0,6°C y 1,1°C. En la gráfica se aprecian estas variaciones pero resulta mucho más llamativo, en consonancia con lo anterior, que las temperaturas alcanzadas en las placas de espesor 3 cm son superiores a las alcanzadas por las de espesor 2 cm, para todas las mezclas analizadas. Estas diferencias por espesor como iremos viendo en las siguientes gráficas se trasladan a todos los puntos de medición.

Las diferencias por espesor se atribuyen a que debido a las pequeñas dimensiones de la caja de ensayo, la reducción de espacio que supone la diferencia de las placas de 2 a 3 cm unido a la mayor capacidad aislante de las

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

placas de 3 cm, producen una menor pérdida de calor y un aumento de la temperatura en el interior de la caja.

- Fig. 5.27: T^a en la cara interior de la placa. Las temperaturas máximas alcanzadas se encuentran entre los 56,7°C y los 60°C. Si consideramos cada una de las placas las fluctuaciones están entre 0,1°C y 0,6°C. Aunque sigue habiendo diferencias en las fluctuaciones por espesor, se reducen, como puede apreciarse en la gráfica, pero, sin embargo observándose una gran diferencia entre las temperaturas alcanzadas en las placas de espesor 3 cm y las alcanzadas por las de espesor 2 cm, para todas las mezclas analizadas. Efectivamente, se han trasladado las diferencias de temperatura media por espesores del interior de la caja.
- Fig. 5.28: T^a en la superficie de contacto entre placa y poliestireno. Las temperaturas máximas alcanzadas se encuentran entre los 51,6°C y los 54,5°C, invirtiéndose la situación anterior: ahora las temperaturas máximas medidas son mayores en las placas de espesor 2 cm que en las de espesor 3 cm, para todas las mezclas analizadas, como cabía esperar. Ya no se aprecian diferencias en las fluctuaciones en función del espesor y la estabilidad es mucho mayor, pues estas fluctuaciones, aunque llegan a alcanzar los 0,5°C en un caso, la mayoría están entre 0°C y 0,1°C.
- Fig. 5.29: T^a en la cara exterior del poliestireno. Todas las placas, varían entre 30°C y 33,5°C, con variaciones para cada placa $< 0,6^\circ\text{C}$, y la mayoría, $< 0,4^\circ\text{C}$.
- Fig. 5.30. Comprobamos que aunque las fluctuaciones en el interior de la caja tienen unos valores algo más elevados, podemos considerar que en los puntos de medición de las placas se llega a un buen estado de estabilización, puesto que las fluctuaciones están dentro de unos valores aceptables.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación: 2-R1 Conductividad: $\lambda=0,212 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$ Placa Escayola: $e=2 \text{ cm}$ Poliestireno: $e=2 \text{ cm}$ $\lambda= 0,037 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$ $T2-T3= 21,48 \text{ }^\circ\text{C}$ $T1-T2= 3,75 \text{ }^\circ\text{C}$					
Tiempo (min)	Tint caja ($^\circ\text{C}$)	T1($^\circ\text{C}$)	T2($^\circ\text{C}$)	T3($^\circ\text{C}$)	Text caja($^\circ\text{C}$)
0	60,6	58,2	54,4	32,9	
1	60,5	58,3	54,4	33,1	
2	60,5	58,1	54,4	33	
3	60,4	58,2	54,4	33	
4	60,5	58,2	54,5	32,9	
5	60,3	58,2	54,4	32,9	
6	60,6	58,2	54,4	32,8	
7	60,3	58,1	54,4	32,7	
8	60,6	58,2	54,4	32,8	
9	60,4	58,1	54,4	33	
10	60,6	58,2	54,4	32,9	
11	60,2	58	54,4	33	
12	60,5	58,2	54,5	33	
13	60,4	58,2	54,5	33	
14	60,6	58,2	54,4	33	
15	60,3	58,2	54,4	32,9	
16	60,7	58,3	54,5	32,9	
17	60,3	58,1	54,4	32,8	
18	60,6	58,2	54,5	33	
19	60,4	58,1	54,4	33	
20	60,6	58,3	54,4	33,1	
21	60,4	58,1	54,5	33,1	
22	60,5	58,1	54,5	33	
23	60,4	58,2	54,4	32,9	
24	60,6	58,2	54,4	33	
25	60,4	58,2	54,4	32,9	
26	60,5	58,2	54,4	32,9	
27	60,6	58,3	54,4	32,9	
28	60,6	58,2	54,5	33	
29	60,4	58,2	54,4	33	
media	60,48	58,18	54,43	32,95	28

Fig 5.25.

Ejemplo de tablas de temperaturas de los 30 minutos seleccionados y gráfica para una placa.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Placa Escayola: e=2-3 cm				
Poliestireno: e=2 cm $\lambda= 0,037$				
Denominación	Tint caja			
	Tmin	Tmax	Tmed	Δt int. caja
2-R1	60,3	60,7	60,48	0,4
2-R2	59,9	60,3	60,09	0,4
3-R1	60,8	61,5	61,18	0,7
3-R2	60,9	61,5	61,2	0,6
2-C-30-0.6-1	60,2	60,7	60,42	0,5
2-C-30-0.6-2	59,9	60,3	60,10	0,4
3-C-30-0.6-1	61,0	60,9	61,42	0,9
3-C-30-0.6-2	61,0	61,7	61,36	0,6
2-C-40-0.6-1	60,3	60,5	60,37	0,2
2-C-40-0.6-2	60,4	60,6	60,54	0,2
3-C-40-0.6-1	60,9	61,8	61,62	0,9
3-C-40-0.6-2	60,6	61,9	61,26	0,6
2-C-50-0.6-1	60,4	60,7	60,51	0,3
2-C-50-0.6-2	60,3	60,7	60,54	0,4
3-C-50-0.6-1	60,9	61,7	61,28	0,8
3-C-50-0.6-2	60,8	61,9	61,37	1,1
2-C-60-0.6-1	60,1	60,3	60,17	0,2
2-C-60-0.6-2	60,3	60,5	60,38	0,2
3-C-60-0.6-1	61,0	62,0	61,52	1,0
3-C-60-0.6-2	61,0	61,9	61,46	0,9
2-C-30-2.5-1	60,1	60,4	60,26	0,3
2-C-30-2.5-2	60	60,3	60,12	0,3
3-C-30-2.5-1	60,7	61,3	61,02	0,6
3-C-30-2.5-2	60,9	61,6	61,19	0,7
2-C-40-2.5-1	60,3	60,7	60,49	0,4
2-C-40-2.5-2	60,4	60,7	60,49	0,3
3-C-40-2.5-1	60,7	61,3	61,06	0,6
3-C-40-2.5-2	60,5	61,1	60,82	0,6
2-C-50-2.5-1	60,5	60,7	60,63	0,2
2-C-50-2.5-2	60,3	60,5	60,45	0,2
3-C-50-2.5-1	60,8	61,5	61,17	0,7
3-C-50-2.5-2	60,8	61,7	61,24	0,9
2-C-60-2.5-1	60,6	60,8	60,70	0,2
2-C-60-2.5-2	60,4	60,7	60,59	0,3
3-C-60-2.5-1	60,9	61,7	61,34	0,8
3-C-60-2.5-2	60,8	61,7	61,37	0,9
2-C-30-4.0-1	60,2	60,6	60,43	0,4
2-C-30-4.0-2	60,0	60,5	60,15	0,5
3-C-30-4.0-1	60,5	60,9	60,71	0,4
3-C-30-4.0-2	61,0	61,7	61,42	0,7
2-C-40-4.0-1	60,2	60,5	60,35	0,3
2-C-40-4.0-2	60,4	60,9	60,63	0,5
3-C-40-4.0-1	60,7	61,5	61,10	0,8
3-C-40-4.0-2	60,9	61,6	61,28	0,7
2-C-50-4.0-1	60,1	60,4	60,27	0,3
2-C-50-4.0-2	60,5	61,3	60,91	0,8
3-C-50-4.0-1	60,9	61,7	61,27	0,8
3-C-50-4.0-2	60,8	61,4	61,11	0,6

Fig 5.26.

Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en el interior de la caja.

Placa Escayola: e=2-3 cm Poliestireno: e=2 cm $\lambda= 0,037$				
Denominación	T1: cara interior placa			
	Tmin	Tmax	Tmed	ΔT int. placa
2-R1	58,1	58,3	58,18	0,2
2-R2	56,7	57,2	56,92	0,5
3-R1	58,6	58,9	58,80	0,3
3-R2	58,6	58,9	58,8	0,3
2-C-30-0.6-1	58,0	58,4	58,19	0,4
2-C-30-0.6-2	57,9	58,2	58,07	0,3
3-C-30-0.6-1	58,8	59,2	59,00	0,4
3-C-30-0.6-2	58,9	59,1	59,02	0,2
2-C-40-0.6-1	58,3	58,5	58,35	0,2
2-C-40-0.6-2	58,5	58,6	58,56	0,1
3-C-40-0.6-1	59,0	59,6	59,32	0,6
3-C-40-0.6-2	59,3	59,9	59,61	0,6
2-C-50-0.6-1	58,6	58,8	58,70	0,2
2-C-50-0.6-2	58,5	58,7	58,62	0,2
3-C-50-0.6-1	59,1	59,6	59,34	0,5
3-C-50-0.6-2	59,5	60,0	59,80	0,5
2-C-60-0.6-1	58,3	58,4	58,36	0,1
2-C-60-0.6-2	58,6	58,7	58,67	0,1
3-C-60-0.6-1	59,0	59,5	59,24	0,5
3-C-60-0.6-2	59,0	59,4	59,29	0,4
2-C-30-2.5-1	57,6	57,9	57,74	0,3
2-C-30-2.5-2	57,8	58,0	57,93	0,2
3-C-30-2.5-1	58,5	58,8	58,65	0,3
3-C-30-2.5-2	58,2	58,5	58,32	0,3
2-C-40-2.5-1	58,4	58,6	58,49	0,2
2-C-40-2.5-2	58,1	58,4	58,26	0,3
3-C-40-2.5-1	58,8	59,1	58,99	0,3
3-C-40-2.5-2	58,2	58,7	58,45	0,5
2-C-50-2.5-1	58,5	58,6	58,55	0,1
2-C-50-2.5-2	58,4	58,5	58,49	0,1
3-C-50-2.5-1	59,2	59,5	59,40	0,3
3-C-50-2.5-2	59,2	59,6	59,40	0,4
2-C-60-2.5-1	58,8	59,0	58,90	0,2
2-C-60-2.5-2	58,7	58,8	58,76	0,1
3-C-60-2.5-1	59,4	59,8	59,61	0,4
3-C-60-2.5-2	59,1	59,7	59,45	0,6
2-C-30-4.0-1	57,9	58,2	58,05	0,3
2-C-30-4.0-2	57,8	58,1	57,92	0,3
3-C-30-4.0-1	58,6	58,8	57,84	0,2
3-C-30-4.0-2	59,0	59,4	59,22	0,4
2-C-40-4.0-1	58,3	58,5	58,42	0,2
2-C-40-4.0-2	58,5	58,8	58,68	0,3
3-C-40-4.0-1	59,1	59,4	59,20	0,3
3-C-40-4.0-2	59,1	59,4	59,29	0,3
2-C-50-4.0-1	58,1	58,3	58,20	0,2
2-C-50-4.0-2	58,7	59,0	58,83	0,2
3-C-50-4.0-1	59,0	59,4	59,21	0,4
3-C-50-4.0-2	58,8	59,2	58,99	0,4

Fig 5.27.

Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la cara interior de la placa.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Placa Escayola: e=2-3 cm				
Poliestireno: e=2 cm $\lambda = 0,037$				
Denominación	T2: sup. contacto placa-poliestireno			
	Tmin	Tmax	Tmed	ΔT sup. pl-pol
2-R1	54,4	54,5	54,43	0,1
2-R2	53,6	54,0	53,63	0,4
3-R1	53,5	53,5	53,50	0
3-R2	53,5	53,6	53,51	0,1
2-C-30-0.6-1	53,4	53,9	53,70	0,5
2-C-30-0.6-2	53,1	53,3	53,20	0,2
3-C-30-0.6-1	52,8	53,1	52,93	0,3
3-C-30-0.6-2	53,1	53,3	53,20	0,2
2-C-40-0.6-1	53,4	53,4	53,40	0
2-C-40-0.6-2	53,9	54,0	53,95	0,1
3-C-40-0.6-1	52,2	52,5	52,33	0,3
3-C-40-0.6-2	52,8	52,8	52,80	0,0
2-C-50-0.6-1	53,4	53,6	53,49	0,2
2-C-50-0.6-2	53,3	53,4	53,36	0,1
3-C-50-0.6-1	52,3	52,6	52,46	0,3
3-C-50-0.6-2	52,5	52,6	52,53	0,1
2-C-60-0.6-1	52,6	52,7	52,62	0,1
2-C-60-0.6-2	52,9	52,9	52,90	0,0
3-C-60-0.6-1	51,7	51,7	51,7	0,0
3-C-60-0.6-2	51,6	51,6	51,6	0,0
2-C-30-2.5-1	53,2	53,5	53,39	0,3
2-C-30-2.5-2	53,7	53,7	53,70	0,0
3-C-30-2.5-1	52,7	52,8	52,71	0,1
3-C-30-2.5-2	51,7	51,9	51,82	0,2
2-C-40-2.5-1	54,2	54,2	54,20	0,0
2-C-40-2.5-2	53,7	54,0	53,85	0,3
3-C-40-2.5-1	52,7	52,8	52,79	0,1
3-C-40-2.5-2	52,1	52,5	52,33	0,4
2-C-50-2.5-1	54,0	54,1	54,02	0,1
2-C-50-2.5-2	53,8	53,8	53,80	0,0
3-C-50-2.5-1	52,9	53,0	52,96	0,1
3-C-50-2.5-2	52,3	52,4	52,40	0,1
2-C-60-2.5-1	53,6	53,7	53,67	0,1
2-C-60-2.5-2	53,4	53,4	53,40	0,0
3-C-60-2.5-1	52,1	52,2	52,14	0,1
3-C-60-2.5-2	51,7	51,8	51,79	0,1
2-C-30-4.0-1	54,0	54,2	54,12	0,2
2-C-30-4.0-2	53,7	53,8	53,75	0,1
3-C-30-4.0-1	53,0	53,1	53,09	0,1
3-C-30-4.0-2	53,6	53,7	53,69	0,1
2-C-40-4.0-1	53,9	53,9	53,90	0,0
2-C-40-4.0-2	54,2	54,3	54,21	0,1
3-C-40-4.0-1	53,2	53,2	53,20	0,0
3-C-40-4.0-2	52,8	52,8	52,80	0,0
2-C-50-4.0-1	53,5	53,6	53,52	0,1
2-C-50-4.0-2	54,0	54,1	54,02	0,1
3-C-50-4.0-1	53,2	53,2	53,20	0,0
3-C-50-4.0-2	52,3	52,5	52,40	0,2

Fig 5.28.

Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la superficie de contacto entre placa y poliestireno.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Placa Escayola: e=2-3 cm				
Poliestireno: e=2 cm $\lambda= 0,037$				
Denominación	T3: cara exterior de poliestireno			
	T _{min}	T _{max}	T _{med}	ΔT ext. pol.
2-R1	32,7	33,1	32,95	0,5
2-R2	32,0	32,2	32,11	0,2
3-R1	31,9	32	31,95	0,1
3-R2	31,9	32,1	32	0,2
2-C-30-0.6-1	33,2	33,6	33,39	0,4
2-C-30-0.6-2	31,6	32,1	31,78	0,5
3-C-30-0.6-1	31,9	32,2	32,05	0,3
3-C-30-0.6-2	32,2	32,8	32,37	0,6
2-C-40-0.6-1	30,5	30,8	30,69	0,3
2-C-40-0.6-2	33,0	33,4	33,22	0,4
3-C-40-0.6-1	32,0	32,3	32,07	0,3
3-C-40-0.6-2	31,8	32,2	31,94	0,4
2-C-50-0.6-1	32,2	32,7	32,41	0,5
2-C-50-0.6-2	32,2	32,6	32,33	0,4
3-C-50-0.6-1	32,1	31,5	32,25	0,4
3-C-50-0.6-2	31,9	32,2	32,01	0,3
2-C-60-0.6-1	31,4	31,8	31,56	0,4
2-C-60-0.6-2	31,6	31,8	31,73	0,6
3-C-60-0.6-1	31,7	31,8	31,73	0,1
3-C-60-0.6-2	31,0	31,2	31,1	0,2
2-C-30-2.5-1	32,8	33,3	33,02	0,5
2-C-30-2.5-2	30,8	31,1	30,90	0,3
3-C-30-2.5-1	30,6	30,9	30,74	0,3
3-C-30-2.5-2	32,6	33,0	32,72	0,4
2-C-40-2.5-1	33,0	33,2	33,07	0,2
2-C-40-2.5-2	32,7	33,1	32,83	0,4
3-C-40-2.5-1	30,4	30,5	30,43	0,1
3-C-40-2.5-2	32,7	32,9	32,79	0,2
2-C-50-2.5-1	33,0	33,2	33,08	0,2
2-C-50-2.5-2	32,9	33,1	33,06	0,2
3-C-50-2.5-1	32,5	32,7	32,55	0,2
3-C-50-2.5-2	30,1	30,3	30,18	0,2
2-C-60-2.5-1	32,8	33,0	32,87	0,2
2-C-60-2.5-2	32,3	32,4	32,34	0,1
3-C-60-2.5-1	30,3	30,5	30,40	0,2
3-C-60-2.5-2	30,0	30,4	30,17	0,4
2-C-30-4.0-1	32,5	32,7	32,59	0,2
2-C-30-4.0-2	32,3	32,7	32,47	0,4
3-C-30-4.0-1	32,4	32,7	32,46	0,3
3-C-30-4.0-2	32,3	32,6	32,46	0,3
2-C-40-4.0-1	32,4	32,7	32,53	0,3
2-C-40-4.0-2	32,5	32,7	32,63	0,2
3-C-40-4.0-1	32,0	32,5	32,26	0,5
3-C-40-4.0-2	30,5	30,7	30,57	0,2
2-C-50-4.0-1	31,6	31,9	31,76	0,3
2-C-50-4.0-2	31,7	32,5	32,14	0,8
3-C-50-4.0-1	31,9	32,1	31,99	0,2
3-C-50-4.0-2	31,6	32,0	31,77	0,4

Fig 5.29.

Temperaturas mínimas, máximas y medias para cada placa, durante el periodo de medición, en la cara exterior de poliestireno.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.30.

Variaciones de temperatura en cada uno de los puntos de medición durante el periodo seleccionado.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	λ (W/m.°C)	λ (W/m.°C) media por e	λ (W/m.°C) v. medio mezcla
2-R1	0,212	0,227	0,226
2-R2	0,242		
3-R1	0,226	0,226	
3-R2	0,226		
2-C-30-0.6-1	0,167	0,165	0,179
2-C-30-0.6-2	0,163		
3-C-30-0.6-1	0,190	0,194	
3-C-30-0.6-2	0,198		
2-C-40-0.6-1	0,170	0,168	0,166
2-C-40-0.6-2	0,166		
3-C-40-0.6-1	0,160	0,165	
3-C-40-0.6-2	0,170		
2-C-50-0.6-1	0,149	0,148	0,154
2-C-50-0.6-2	0,148		
3-C-50-0.6-1	0,163	0,160	
3-C-50-0.6-2	0,157		
2-C-60-0.6-1	0,136	0,136	0,141
2-C-60-0.6-2	0,136		
3-C-60-0.6-1	0,147	0,147	
3-C-60-0.6-2	0,148		

Tabla 5.11.

Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 0.0-0.6 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: $e=2$ cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).

Denominación	λ (W/m.°C)	λ (W/m.°C) media por e	λ (W/m.°C) v. medio mezcla
2-R1	0,212	0,227	0,226
2-R2	0,242		
3-R1	0,226	0,226	
3-R2	0,226		
2-C-30-2.5-1	0,173	0,185	0,184
2-C-30-2.5-2	0,197		
3-C-30-2.5-1	0,205	0,184	
3-C-30-2.5-2	0,163		
2-C-40-2.5-1	0,182	0,179	0,183
2-C-40-2.5-2	0,176		
3-C-40-2.5-1	0,200	0,188	
3-C-40-2.5-2	0,177		
2-C-50-2.5-1	0,171	0,171	0,173
2-C-50-2.5-2	0,171		
3-C-50-2.5-1	0,176	0,176	
3-C-50-2.5-2	0,176		
2-C-60-2.5-1	0,147	0,146	0,152
2-C-60-2.5-2	0,145		
3-C-60-2.5-1	0,161	0,159	
3-C-60-2.5-2	0,157		

Tabla 5.12.

Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 0.6-2.5 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: $e=2$ cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	λ (W/m.°C)	λ (W/m.°C) media por e	λ (W/m.°C) v. medio mezcla
2-R1	0,212	0,227	0,226
2-R2	0,242		
3-R1	0,226	0,226	
3-R2	0,226		
2-C-30-4.0-1	0,202	0,195	0,201
2-C-30-4.0-2	0,189		
3-C-30-4.0-1	0,202	0,207	
3-C-30-4.0-2	0,213		
2-C-40-4.0-1	0,175	0,176	0,184
2-C-40-4.0-2	0,178		
3-C-40-4.0-1	0,194	0,192	
3-C-40-4.0-2	0,190		
2-C-50-4.0-1	0,172	0,170	0,177
2-C-50-4.0-2	0,168		
3-C-50-4.0-1	0,196	0,185	
3-C-50-4.0-2	0,174		

Tabla 5.13.

Conductividad térmica experimental series de referencia y granulometría 2.5-4.0 mm para placas de espesor 2 y 3 cm. (Poliestireno: $e=2$ cm ; $\lambda=0,037$ w/m°C).

De los resultados obtenidos en las tablas 5.11., 5.12. y 5.13, podemos concluir:

Se producen pequeñas fluctuaciones que requerirían mayor afinamiento pero que

Fig 5.31.

Conductividad térmica experimental series de referencia y las correspondientes a los compuestos caucho-escayola por granulometrías

no invalidan el ensayo en función del rango de resultados. En la columna en la que se diferencia el valor de la conductividad en función de los espesores tampoco se producen desviaciones importantes.

En todos los compuestos estudiados se produce una disminución de la conductividad térmica en relación a las placas de referencia sin adición de caucho (Fig.5.31.). Para todas las granulometrías disminuye el valor de la conductividad térmica al incrementarse el % de caucho.

Si comparamos por granulometrías los menores valores de conductividad térmica se dan en el grano más fino, a continuación estaría el grano medio y los peores valores se obtienen para el grano más grueso (Fig.5.31).

Las disminuciones respecto a la muestra patrón suponen para el grano más fino entre un 20 % y un 40% aproximadamente para las mínimas y máximas adiciones de caucho en peso. Entre un 18 % y un 33% para el grano medio y entre un 11% y un 22% aproximadamente para el más grueso.

Benazzouk et al (2007) en matrices de cemento obtenía reducciones del 60% para muestras que contenían un 50% de partículas de caucho en volumen (que se corresponde, aproximadamente, con un 40% en peso para las muestras estudiadas en este trabajo para todas las granulometrías). Sukontasukkul et al (2009) destacaba un mejor comportamiento de los agregados más finos. En hormigón ligero en sustituciones de hasta el 30% en peso de los agregados finos obtenía reducciones de hasta el 50% en relación a hormigones en masa, cuando los agregados de caucho era más finos. Por tanto en hormigones las reducciones son mayores.

Teniendo en cuenta que la densidad de los materiales constructivos es un factor determinante de la capacidad térmica de los mismos, se ha calculado el valor teórico de la conductividad en función de la fracción volumétrica del caucho y de la escayola, y de la conductividad de ambos materiales para compararlo con los valores experimentales obtenidos. Es decir se ha considerado que el material consta de dos fases(caucho y escayola) y basándose en la ley de mezclas se han planteado dos posibles comportamientos de los compuestos obtenidos: en serie y en paralelo.

5.3.1 Análisis comparativo de la conductividad térmica experimental y la teórica en función de su densidad.

Para realizar el análisis comparativo de la conductividad térmica obtenida experimentalmente y la que en teoría debería haber resultado teniendo en cuenta la densidad de las mezclas analizadas, se han considerado dos posibles comportamientos térmicos del composite formado por ambos materiales: **en serie y en paralelo**.

Sean 1 y 2 los materiales que forman el composite.

Si consideramos un comportamiento **en serie**, como se muestra en la figura 5.32. siendo $T_1 > T_2$ (temperaturas en °C), $e = e_1 + e_2$ (espesor en m) y $S = S_1 = S_2$ (sección en m^2). El flujo calorífico sería:

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad \text{siendo } t \text{ el tiempo.} \quad (1)$$

De acuerdo con la ley de Fourier, y siendo λ_c la conductividad térmica del composite y λ_1 y λ_2 la conductividad térmica de los materiales componentes:

$$\phi \equiv \lambda_c \frac{T_1 - T_2}{e} = \lambda_1 \frac{T_1 - T}{e_1} = \lambda_2 \frac{T - T_2}{e_2} \quad (2)$$

Podemos expresarlo:

$$T_1 - T_2 = e \frac{\phi}{\lambda_c} \quad (3)$$

$$T_1 - T = e_1 \frac{\phi}{\lambda_1} \quad (4)$$

$$T - T_2 = e_2 \frac{\phi}{\lambda_2} \quad (5)$$

Sumando las expresiones (4) y (5) obtenemos:

$$T_1 - T_2 = \phi \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} \right), \quad (6)$$

igualando con la expresión (3),

$$\frac{e}{\lambda_c} \phi = \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} \right) \phi, \quad (7)$$

Fig 5.32.

Comportamiento en serie del compuesto.

y dividiendo por e tendríamos $\frac{1}{\lambda_c} = \frac{e_1}{e\lambda_1} + \frac{e_2}{e\lambda_2}$ (8)

Para cada fracción volumétrica

$$\frac{e_1}{e} = \frac{e_1 S}{e S} = \frac{V_1}{V_T} = V_{f1} \quad (9)$$

$$\frac{e_2}{e} = \frac{e_2 S}{e S} = \frac{V_2}{V_T} = V_{f2} \quad (10)$$

Sustituyendo en la expresión (8) se deduce:

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{V_{f1}}{\lambda_1} + \frac{V_{f2}}{\lambda_2} \quad (11)$$

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Si consideramos un comportamiento **en paralelo**, como se muestra en la figura 5.33. siendo $T_1 > T_2$ (temperaturas en °C), $e = e_1 = e_2$ (espesor en m) y $S = S_1 + S_2$ (sección en m^2). El flujo térmico sería:

$$\phi_1 = \frac{1}{S_1} \frac{\partial Q_1}{\partial t} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (12)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{S_2} \frac{\partial Q_2}{\partial t} \left(\frac{W}{m^2} \right) \text{ siendo } t \text{ el tiempo.} \quad (13)$$

De acuerdo con la ley de Fourier, y siendo λ_c la conductividad térmica del composite y λ_1 y λ_2 la conductividad térmica de los materiales componentes:

$$\phi_1 = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{e_1} \quad (14)$$

$$\phi_2 = \lambda_2 \frac{T_1 - T_2}{e_2} \quad (15)$$

$$\phi_{total} = \lambda_c \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (16)$$

El calor total será:

$$\phi S = \phi_1 S_1 + \phi_2 S_2, \quad (17)$$

luego:

$$\lambda_c \frac{T_1 - T_2}{e} S = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{e_1} S_1 + \lambda_2 \frac{T_1 - T_2}{e_2} S_2, \quad (18)$$

y teniendo en cuenta que $e = e_1 = e_2$:

$$\lambda_c S = \lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2 \quad (19)$$

dividiendo por S y considerando ambas fracciones volumétricas

$$V_{f1} = \frac{S_1}{S} \quad (20)$$

$$V_{f2} = \frac{S_2}{S} \quad (21)$$

Obtendríamos la expresión:

$$\lambda_c = V_{f1}\lambda_1 + V_{f2}\lambda_2 \quad (22)$$

Fig 5.33.

Comportamiento en paralelo del compuesto.

En conclusión las dos expresiones obtenidas podrían expresarse así:

COMPORTAMIENTO EN SERIE

$$\frac{1}{\lambda_{\text{compuesto}}} = \frac{\text{frac.volumétrica}_{\text{escayola}}}{\lambda_{\text{escayola}}} + \frac{\text{frac.volumétrica}_{\text{caucho}}}{\lambda_{\text{caucho}}}$$

COMPORTAMIENTO EN PARALELO

$$\lambda_{\text{compuesto}} = \lambda_{\text{escayola}} \times \text{fracc.volumetrica}_{\text{escayola}} + \lambda_{\text{caucho}} \times \text{frac.volumétrica}_{\text{caucho}}$$

Se han incluido en la tabla 5.14. los valores correspondientes a ambos comportamiento planteados de acuerdo a las expresiones obtenidas, así como los resultados experimentales para cada serie.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Los valores experimentales de la conductividad térmica λ se han calculado promediando los resultados obtenidos para los diferentes espesores de placa estudiados. Como era de esperar, estos valores son independientes del espesor de las muestras analizadas, pero no del tamaño de partículas de polvo de caucho.

Placa Escayola: e=2-3 cm Poliéstireno: e=2 cm $\lambda = 0,037$			
Denominación	λ (W/m.°C) paralelo	λ (W/m.°C) serie	λ (W/m.°C) experimental
R1	0,250	0,25	0,226
C-30-0.6	0,209	0,197	0,179
C-40-0.6	0,198	0,186	0,166
C-50-0.6	0,188	0,177	0,154
C-60-0.6	0,179	0,161	0,141
C-30-2.5	0,212	0,199	0,184
C-40-2.5	0,201	0,188	0,183
C-50-2.5	0,191	0,179	0,173
C-60-2.5	0,181	0,172	0,152
C-30-4.0	0,210	0,198	0,201
C-40-4.0	0,199	0,187	0,184
C-50-4.0	0,189	0,178	0,177

Tabla 5.14.

Conductividad térmica del composite experimental y teórica considerando comportamiento en serie y en paralelo.

En los tamaños fino y medio (Fig 5.34.) la conductividad térmica experimental está por debajo de la teórica en función de su densidad, tanto si consideramos un comportamiento en serie como en paralelo. Se observan mayores diferencias para el grano más fino. En el grano más grueso la curva experimental se aproxima bastante a un comportamiento en serie. En todos, el paralelismo de las curvas indica tendencias similares.

Se podría hacer una estimación de la posibilidad de un comportamiento compuesto por ambas opciones analizando el rango de valores de λ en función de la fracción volumétrica y del comportamiento real al que se asimile el compuesto. Pero las gráficas muestran valores experimentales inferiores a ambos comportamientos.

Las diferencias obtenidas entre $\lambda_{teórica}$ y $\lambda_{experimental}$ se atribuyen a que en el análisis teórico no se ha considerado la transmisión de calor por convección que produciría el "coeficiente de película", también llamado coeficiente de fricción (dependiente de muchos factores y que se determina experimentalmente o por métodos de análisis dimensional).

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.34.

Conductividad térmica experimental, teórica en serie y teórica en paralelo.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Las variaciones que se observan en función de la granulometría, estarían condicionadas por las diferentes rugosidades del material, (dado que la cara rugosa se coloca hacia el interior de la caja) que varía en función del tamaño del grano de caucho y de su % de adición, porque se modifica la capa límite tanto en su espesor como en el régimen del fluido (laminar o turbulento), alterando el coeficiente citado.

Podemos así hacer una estimación de su valor para cada tamaño de grano en función de los resultados obtenidos, llegando a los siguientes valores para un comportamiento en paralelo:

Coeficiente de película para granulometría 0.0-0.6 = 0,02 °Cm²/W

Coeficiente de película para granulometría 0.5-2.5 = 0,01 °Cm²/W

Coeficiente de película para granulometría 2.5-4.0 = 0,001 °Cm²/W

Estos valores son aceptables, dadas las dimensiones del recinto de ensayo, y permiten valorar como válida la técnica experimental diseñada para la medida de la conductividad térmica con muestras pequeñas.

A la vista de los resultados podemos considerar que el efecto de la convección es muy pequeño, debido a las condiciones del ensayo.

La aproximación a un comportamiento en paralelo permitiría predecir de forma aproximada la conductividad térmica de este tipo de materiales.

Los valores experimentales de λ , inferiores a 0,2, permiten considerar el material obtenido como firme candidato a aislante térmico, ya que los espesores requeridos para cumplir con las exigencias térmicas constructivas pueden ser conseguidos por aplicación neumática debido al rápido fraguado del material. Incluso podría estudiarse en un futuro su aplicación mediante extrusión por deposición, siempre que se introdujeran los aditivos necesarios para dar la plasticidad adecuada.

5.4. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

En los siguientes apartados se describen los resultados de los ensayos descritos en el capítulo 4. En el apartado 5.4.1 los resultados de aislamiento a ruido aéreo, en el apartado 5.4.2. los de aislamiento a ruido de impacto y en el 5.4.3. los de absorción acústica.

5.4.1 Aislamiento a Ruido aéreo

En las Figuras 5.35. y 5.36. se reflejan los resultados obtenidos. La Figura 5.35. incluye los valores para las placas de espesor 2 cm, en la 5.35. (a) los correspondientes a la colocación de la placa con la cara lisa hacia el emisor y en la 5.35. (b) los que resultan de la colocación de la placa con la cara rugosa hacia el emisor. En la Figura 5.36., se reflejan los resultados para las placas de espesor 3 cm, diferenciándose igualmente en (a) y (b) dependiendo de la colocación de la cara lisa o rugosa de las placas hacia el emisor.

Fig 5.35.

Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.36.

Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 3 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor.

En nuestro estudio sólo se ha analizado el comportamiento para una frecuencia de 1000Hz, pero se han considerado las variables del porcentaje de caucho, el tamaño del grano y el espesor de la placa.

En las placas de 2 cm de espesor el comportamiento parece similar para todas las series, y no pueden sacarse conclusiones claras. Así mismo no se aprecian diferencias en relación a la colocación de la cara rugosa en posición hacia receptor o hacia emisor.

Para las placas de espesor 3 cm si hay mayores diferencias, aunque tampoco las tendencias son claras. Aparentemente las que tienen un comportamiento mejor y más uniforme son las de grano más fino.

Por tanto, del análisis de las gráficas resultantes, y sin tener en cuenta otros factores, no se podría concluir una modificación sustancial en el comportamiento acústico.

Se decide calcular los valores teóricos de aislamiento acústico de acuerdo a la ley de masas para una frecuencia de 1000Hz, la utilizada en el ensayo.

Al comparar los resultados de aislamiento bruto obtenidos experimentalmente para las placas de escayola con caucho por espesores para cada granulometría con los valores teóricos obtenidos aplicando la ley de masas (tabla 5.15.), se observan

RUIDO AÉREO

Placa Escayola: e=2-3 cm

Partimos en vacío de 32. 33. 34 dB

Sonómetro SC-2C Level Meter CESVA . Emisión de salida 104 dB a 1Khz

Denominación	CARA LISA hacia emisor Media por espesor (dB)	CARA RUGOSA hacia emisor Media por espesor (dB)		
	Aislamiento Experim.(dB)	Aislamiento L masas (dB)	Aislamiento Experim.(dB)	Aislamiento L masas (dB)
2-R	44.34	40.76	43.42	40.76
3-R	43.84	44.26	42.55	44.26
2-C-30-0.6-1	44.02	39.3	42.34	39.3
3-C-30-0.6-1	46.42	42.82	47.48	42.82
2-C-40-0.6-1	43.96	38.12	43.18	38.12
3-C-40-0.6-1	44.95	41.64	43.06	41.64
2-C-50-0.6-1	43.27	36.77	42.56	36.77
3-C-50-0.6-1	44.22	40.29	45.40	40.29
2-C-60-0.6-1	38.43	35.33	44.12	35.33
3-C-60-0.6-1	41.79	38.85	43.7	38.85
2-C-30-2.5-1	42.95	40.16	43.6	40.16
3-C-30-2.5-1	44.97	43.68	46.31	43.68
2-C-40-2.5-1	43.55	39.21	42.03	39.21
3-C-40-2.5-1	45.76	42.73	44.91	42.73
2-C-50-2.5-1	44.86	38.02	43.85	38.02
3-C-50-2.5-1	43.33	41.54	43.28	41.54
2-C-60-2.5-1	43.71	36.62	41.78	36.62
3-C-60-2.5-1	41.49	40.14	44.98	40.14
2-C-30-4.0-1	44.35	39.66	43.38	39.66
3-C-30-4.0-1	40.86	43.19	44.14	43.19
2-C-40-4.0-1	42.14	38.67	43.07	38.67
3-C-40-4.0-1	40.16	42.2	41.96	42.2
2-C-50-4.0-1	43.34	38.04	42.77	38.04
3-C-50-4.0-1	41.25	41.56	42.06	41.56

Tabla 5.15.

Aislamiento experimental y según la ley de masas para placas de 2 cm y 3 cm de espesor.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

diferencias en el comportamiento, tanto en función del tamaño del grano como del espesor de las placas.

En relación al tamaño del grano (Fig. 5.37. y 5.38.) los mejores resultados obtenidos para el grano más fino, indicarían la influencia de la inercia del material en función del tamaño. Es más difícil poner en vibración al grano más grueso, con mayor inercia, que al grano más fino. Al tener este una inercia menor entra en vibración con más facilidad, y por lo tanto disipa energía.

El caucho es un material que puede disipar energía elástica al vibrar. La cantidad de energía elástica que puede disipar es función de la frecuencia y de la cantidad de caucho que contiene el compuesto³³.

Las propiedades del caucho para absorber y disipar energía ante acciones dinámicas permiten obtener mejores resultados que con otros materiales como el corcho, que aun siendo un buen absorbente acústico, debido a su falta de elasticidad no produce los buenos resultados que cabría esperar al producir un material compuesto de escayola con corcho³⁴.

Por otro lado los resultados contradicen los obtenidos en el artículo que ha servido de punto de partida para la realización de este trabajo³⁵ (sólo se obtenían mejoras para porcentajes de caucho muy elevados), pero hay que tener en cuenta que en el mismo no se consideraba la influencia del tamaño del grano.

En relación al espesor de las placas, comprobamos que para las placas sin contenido de caucho, de espesor 3 cm, tanto si colocamos la cara lisa como la cara rugosa hacia el emisor, el valor experimental obtenido es semejante al teórico de acuerdo a la ley de masas. Sin embargo en las de espesor 2 cm el aislamiento experimental es mayor que el teórico. Además en estas placas de referencia, sin contenido de caucho, el aislamiento acústico experimental es muy similar para las

³³ F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, M. Bollati, B. Witoszek "Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete", *Cement and Concrete Research*, 32 (2002).

³⁴ Rio Merino, M. del (1999) "Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos". Tesis(Doctoral), E.T.S. Arquitectura (UPM).

³⁵ Mayor Lobo, P.; Bustamante Montoro, R.; Rangel, C.; Hernandez Olivares, F.: "Propiedades térmica, acústica y mecánicas de placas de morteros de yeso-caucho". In: *II Jornadas de Investigación en Construcción*, 22/05/2008-24/05/2008, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

placas de 2 cm y las de 3 cm. Estos resultados nos indican la necesidad de valorar la influencia de la frecuencia. Habrá una frecuencia diferente para cada material que dará los mejores resultados para el mismo, en función del espesor de la placa y del módulo de elasticidad dinámico del material ³⁶.

En las que contienen caucho, aunque en valores absolutos el aislamiento acústico mejora al aumentar el espesor de la placa, como era de esperar, si esta comparación la hacemos para cada espesor en relación a la ley de masas, observamos que los mejores resultados se obtienen para el menor espesor (2 cm). Este aspecto nos lleva a considerar la posible existencia de un espesor crítico por encima del cual no mejorarían los resultados³⁷. Aunque también se tendría que considerar la frecuencia crítica como decíamos en las placas de referencia.

Así como el aislamiento térmico aumenta en función del espesor que se aplique, en el aislamiento acústico hay que considerar otros factores, no siendo tan importante el espesor, llegándose a valores por encima de los cuales no aumentaría sensiblemente la capacidad de aislamiento acústico. En consecuencia dependiendo del objetivo que se quiera conseguir con el material constructivo, aislamiento térmico o acústico, se requeriría un espesor diferente.

³⁶ Norma DIN-4109

³⁷ Rodríguez Montejano, Rosa María (2003) *"Propiedades acústica del caucho granular."* Tesis(Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM)

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

(a)

(b)

(c)

Fig 5.37.

Aislamiento acústico bruto experimental y de acuerdo a ley de masas. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm y 3 cm de espesor. Colocamos la cara lisa de la placa hacia el emisor.

(a)

(b)

(c)

Fig 5.38.

Aislamiento acústico bruto experimental y de acuerdo a ley de masas. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm y 3 cm de espesor. Colocamos la cara rugosa de la placa hacia el emisor.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

5.4.2 Ruido de impacto

En las Figuras 5.39. y 5.40. y en la tabla 5.16. se reflejan los resultados obtenidos. La Figura 5.39. incluye los valores para las placas de espesor 2 cm, en la 5.39. (a) los correspondientes a la colocación de la placa con la cara lisa hacia el emisor y en la 5.39. (b) los que resultan de la colocación de la placa con la cara rugosa hacia el emisor. En la Figura 5.40., se reflejan los resultados para las placas de espesor 3 cm, diferenciándose igualmente en (a) y (b) dependiendo de la colocación de la cara lisa o rugosa de las placas hacia el emisor.

RUIDO DE IMPACTO		
Placa de escayola: e=2-3 cm		
Partimos en vacío de 32. 33. 34 dB		
Sonómetro SC-2C Level Meter CESVA . Elegimos la opción LAF		
Denominación	CARA LISA hacia emisor	CARA RUGOSA hacia emisor
	Media por espesor (dB)	Media por espesor (dB)
2-R	107.21	100.83
3-R	99.9	102.76
2-C-30-0.6-1	81.92	81.06
3-C-30-0.6-1	86.58	79.48
2-C-40-0.6-1	89.33	80.13
3-C-40-0.6-1	80.32	81.05
2-C-50-0.6-1	83.71	82.76
3-C-50-0.6-1	84.51	87.98
2-C-60-0.6-1	84.23	78.30
3-C-60-0.6-1	85.78	82.72
2-C-30-2.5-1	81.44	90.35
3-C-30-2.5-1	90.6	92.50
2-C-40-2.5-1	80.13	80.75
3-C-40-2.5-1	86.39	90.63
2-C-50-2.5-1	92.58	89.02
3-C-50-2.5-1	84.58	80.63
2-C-60-2.5-1	84.45	85.43
3-C-60-2.5-1	90.08	88.00
2-C-30-4.0-1	90.25	87.28
3-C-30-4.0-1	92.72	90.15
2-C-40-4.0-1	85.07	81.85
3-C-40-4.0-1	89.75	90.63
2-C-50-4.0-1	78.93	82.37
3-C-50-4.0-1	81.43	84.18

Tabla 5.16.

Ruido de impacto. Presión sonora en el recinto receptor para placas de 2 cm y 3 cm.

No se aprecian tendencias claras en función del porcentaje de adición en ninguna de las granulometrías, los valores son similares en todos los casos.

Tampoco se observan grandes diferencias de unas granulometrías a otras. En casi todos los casos los mejores resultados se obtienen para la granulometría más fina y para todos los porcentajes de adición.

(a)

(b)

Fig 5.39.

Aislamiento a ruido de impacto. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 2 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

(a)

(b)

Fig 5.40.

Aislamiento a ruido de impacto. Presión sonora en recinto receptor. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso para placas de 3 cm de espesor. (a) cara lisa hacia emisor, (b) cara rugosa hacia emisor.

Se puede concluir que las placas de escayola para todas las granulometrías y proporciones de caucho mejoran la capacidad de aislamiento a ruido de impacto en relación a la muestra patrón. La disminución de la presión acústica en el recinto receptor se encuentra en valores en torno al 20%, bastante superiores a los máximos obtenidos por Mayor et al (2008) de aproximadamente un 6% para adiciones de 50% en volumen (el tamaño de partícula era 0-1mm, inferior a los empleados en este estudio).

5.4.3 Coeficiente de absorción acústica

Se muestran en las figuras 5.41. y 5.42. los coeficientes de absorción, en tercios de octava, obtenidos para las muestras analizadas diferenciados por granulometrías. Se han elaborado dos gráficas para cada granulometría, en las primeras se presentan los resultados de la primera medición con las muestras sin ningún tratamiento. En la segunda los obtenidos después de raspar ligeramente la superficie rugosa orientada hacia el tubo, con el objetivo de eliminar la capa superficial de escayola y hacer aflorar el caucho, para así analizar la diferencia entre las dos medidas.

En primer lugar observamos que la forma de las curvas difiere notablemente de las habituales de materiales absorbentes porosos acústicos utilizados en construcción. La curva de absorción de estos materiales es mucho más uniforme, con valores elevados al aumentar la frecuencia. En todas las series ensayadas, aparecen una serie de máximos y mínimos, que coinciden aproximadamente para determinadas frecuencias, aunque difieren en los resultados de las muestras sin raspar y las raspadas. En las muestras sin raspar, los máximos se encuentran en 300 Hz, 600 HZ, 1000 Hz y 4000 Hz; en las muestras raspadas coinciden los máximos para 300 Hz pero para frecuencias más altas se desplazan a 800 Hz y 5000 Hz. Los mínimos coinciden para 500 Hz pero en las muestras sin raspar se localizan en torno a los 2000 Hz para las muestras si raspar y en el tramo entre 1000 y 2500 Hz para las raspadas. Es decir coinciden para frecuencias medias y aparecen desplazados para frecuencias más altas.

Las curvas de absorción de la granza de caucho presentan una serie de máximos y mínimos muy acusados como consecuencia de las interferencias entre onda incidente y reflejada que tienen lugar dentro de la estructura interna del material (Rodríguez Montejano, R.M. (2003).

La diferencia de comportamiento de cada muestra en función del tamaño de partícula es un factor importante a destacar.

De la observación de las figuras anteriores, se deduce que muestras de granulometría media, presenta las mejores condiciones de absorción en todo el rango de frecuencias en las muestras sin tratar. En las muestras sometidas a raspado los resultados son similares para el grano fino y medio y algo peores para el grano más grueso.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

El diferente comportamiento en función del tamaño de partícula está íntimamente ligado con la estructura interna del material. El tamaño de grano puede condicionar a su vez el tamaño de las cavidades (poros) y, por lo tanto, la degradación de energía acústica que tiene lugar en su interior. Cuando el tamaño de los poros es mayor, se favorece la penetración de la onda, y empiezan a manifestarse, por lo tanto, las interferencias entre la onda incidente y la reflejada que tienen lugar en el conglomerante que hace de soporte, es decir en el yeso, dando lugar a la serie de diferentes máximos y mínimos tan acusados que presentan las figuras.

En la granza de caucho, con resistividades y porosidades menores, hay una menor disipación lo que favorece la interacción entre onda incidente y reflejada.

Aunque el coeficiente de absorción mejora en todo el rango de frecuencia con la adición de caucho, los compuestos de escayola con caucho no demuestran tener unas buenas propiedades como material acústico absorbente, pues los valores de absorción acústica obtenidos son muy bajos. Aunque parece posible adaptar la curva de absorción, además de seleccionando el tamaño de partícula, eligiendo el tratamiento adecuado.

Sukontasukkul et al (2009) obtenían mejores resultados en frecuencias altas, por encima de los 1000 Hz en el hormigón con polvo de neumático (reemplazando los agregados finos) comparándolo con el hormigón en masa, aproximadamente un 36% al comparar el NCR. Pero los resultados eran peores al compararlo con hormigones ligeros.

Fig 5.41.

Coefficiente de absorción acústica. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso. Muestras sin raspar.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.42.

Coeficiente de absorción acústica. Comparativa por granulometrías y % de caucho en peso. Muestras raspadas.

5.5. COMPORTAMIENTO ELÁSTICO

En los siguientes apartados se dan los valores de los módulos de elasticidad estático y dinámico longitudinal por ultrasonidos. Con los datos obtenidos se obtienen conclusiones sobre la estructura del material y su comportamiento y se busca establecer una relación entre ambos valores.

5.5.1 Módulo de elasticidad dinámico

En la tabla 5.17. se reflejan los valores medios del módulo de elasticidad dinámico para cada una de las series estudiadas.

Se observan dispersiones en algunas de las series, debidas a las características del material. Las variaciones en los valores obtenidos para las tres probetas de cada serie aumentan al aumentar el tamaño del grano, siendo el grano más grueso el que da resultados más heterogéneos, indicando la menor homogeneidad del compuesto.

Para analizar los resultados del ensayo se han elaborado tres gráficas diferentes, en todas ellas se incluyen tres curvas diferencias por el tamaño de grano. En la primera se relaciona el módulo de elasticidad dinámico con el porcentaje de adición de caucho, en la segunda con la densidad aparente, y en la tercera con la resistencia a compresión.

En la primera gráfica (Fig. 5.43.) comprobamos, en primer lugar, que la velocidad ultrasónica se reduce de forma progresiva a medida que aumenta la adición de caucho, para todas las granulometrías estudiadas. Algo previsible puesto que el caucho y el yeso tienen módulos de elasticidad muy diferentes.

La pendiente de la gráfica en función del porcentaje de adición de caucho es diferente para cada granulometría (Fig. 5.44.), mostrando la incidencia que tiene el tamaño del grano en el comportamiento elástico del material. En todas las granulometrías, las muestras forman curvas de tendencia asintótica, con buenos coeficientes de correlación para el grano fino y medio. El descenso del módulo de elasticidad a medida que se incrementa la proporción de caucho es muy pronunciado, pero más en el triturado fino.

Para la granulometría más fina de hasta 0.6 mm se producen, para la misma adición de caucho, los menores valores en el módulo de elasticidad dinámico. Estos

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

resultados contribuyen a la explicación del mejor comportamiento acústico de esta granulometría.

Hay una variable directamente relacionada con la variación de la velocidad ultrasónica: el aumento del contenido de aire. Una mayor porosidad, influye directamente en la propagación de la onda ultrasónica, produciendo una mayor atenuación y una menor velocidad de ultrasonidos, que dan como resultado un menor módulo de elasticidad dinámico ya que es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de propagación del ultrasonido (Albano et al, 2005). Si tenemos en cuenta esta afirmación, como es en las partículas de menor tamaño donde se obtienen los menores valores del módulo de elasticidad dinámico, son los compuesto en lo que se previsiblemente se produce la mayor porosidad, en los otras dos granulometrías depende de la proporción de caucho añadida. Topcu et al (1997) propuso un modelo para determinar el módulo de elasticidad basado en la ley de mezclas en el que consideraba al material compuesto formado por tres fases (mortero, árido y caucho). Se podría comparar con este modelo considerando la tercera fase el volumen de poros (aire) en sustitución del árido.

El módulo de elasticidad dinámico también es sensible a la existencia de discontinuidades que modifican la velocidad ultrasónica. En este sentido, si las series del grano más grueso son menos homogéneas, podemos entender el caucho especialmente el de mayor tamaño como una discontinuidad en el material, dejando de ser el compuesto un material isótropo y homogéneo, en cuyo caso el procedimiento empleado no sería válido porque es sensible a la existencia de discontinuidades que modifican la velocidad ultrasónica. Si podemos aceptar su validez como método comparativo. Turki et al. (2009) no consideraba fiables las medidas del módulo de elasticidad dinámico en las mezclas de mortero con caucho porque se producían modificaciones en el coeficiente de Poisson difíciles de determinar, proponiendo como alternativa más útil el "índice de continuidad" de Gorisse, F. (1978). No hay que olvidar que se ha eliminado en la ecuación el término correspondiente al coeficiente de Poisson, y que por tanto en la muestra patrón se considera una sobreestimación de aproximadamente el 17%.

En este tipo de materiales porosos los valores de las constantes elásticas, como el módulo de elasticidad, están relacionados con la densidad y la resistencia a compresión. Si valoramos de forma porcentual la pérdida que experimenta el módulo

de elasticidad dinámico en comparación con las muestras de referencia, se comprueba que las pérdidas son algo inferiores a las que experimenta la resistencia a compresión, siguiendo una tendencia similar en todas las granulometrías. La diferencia es mayor para las menores adiciones de caucho y se tienen una mayor semejanza a medida que aumenta el porcentaje de adición. Por ejemplo en el grano más fino, con incorporaciones del 30%, la resistencia a compresión sufre decrementos del 76 %, mientras que el módulo de elasticidad los sufre del 65 %; sin embargo para adiciones del 60%, estos valores son del 95% y 98% respectivamente.

En la Fig. 5.45.(a) se relaciona la resistencia a compresión con el módulo de elasticidad obteniéndose tendencias lineales en todas las series. Estas mismas tendencias se observan en la Fig. 5.45.(b) en la que relacionamos la densidad aparente con el módulo de elasticidad. Por tanto los resultados son acordes con los obtenidos en resistencia a compresión y densidad.

Los resultados de los módulos de elasticidad muestran la gran diferencia en la rigidez de las distintas series analizadas en relación a la serie de referencia sin adición de caucho.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Tabla 5.43.

Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometría, en función de su porcentaje de adición.

Tabla 5.44.

Curvas de tendencia módulo de elasticidad elástico por granulometrías.

Tabla 5.45.

Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola caucho por granulometría, en relación a (a) su resistencia a compresión (b) su densidad aparente.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	Tiempo de propagación (μ s)	Longitud de recorrido (m)	Velocidad de propagación (m/s)	Densidad (Kg/m ³)	M. Young dinámico (Edym) (Mpa)	M. Young dinámico (Edym)media (Mpa)
R1	64,8	0,16	2469,14	1270	7742,72	7825,18
R2	63,6	0,16	2515,72	1270	8037,66	
R3	65	0,16	2461,54	1270	7695,15	
C-30-0.6-1	98,3	0,16	1627,67	1040	2755,28	2724,04
C-30-0.6-2	99,6	0,16	1606,43	1040	2683,83	
C-30-0.6-3	98,7	0,16	1621,07	1040	2733,00	
C-40-0.6-1	121,2	0,16	1320,13	910	1585,90	1562,42
C-40-0.6-2	124,2	0,16	1288,24	910	1510,21	
C-40-0.6-3	121	0,16	1322,31	910	1591,15	
C-50-0.6-1	149,7	0,16	1068,80	790	902,45	892,56
C-50-0.6-2	150,3	0,16	1064,54	790	895,26	
C-50-0.6-3	151,6	0,16	1055,41	790	879,97	
C-60-0.6-1	215,4	0,16	742,80	690	380,71	382,51
C-60-0.6-2	213,5	0,16	749,41	690	387,52	
C-60-0.6-3	215,8	0,16	741,43	690	379,30	
C-30-2.5-1	96,6	0,16	1656,31	1150	3154,89	3622,70
C-30-2.5-2	85,3	0,16	1875,73	1150	4046,13	
C-30-2.5-3	89,6	0,16	1785,71	1150	3667,09	
C-40-2.5-1	108,6	0,16	1473,30	1030	2235,72	2336,31
C-40-2.5-2	103,5	0,16	1545,89	1030	2461,48	
C-40-2.5-3	106,8	0,16	1498,13	1030	2311,72	
C-50-2.5-1	144,2	0,16	1109,57	910	1120,34	1127,23
C-50-2.5-2	146	0,16	1095,89	910	1092,89	
C-50-2.5-3	141,2	0,16	1133,14	910	1168,45	
C-60-2.5-1	197	0,16	812,18	810	534,31	556,53
C-60-2.5-2	189,5	0,16	844,33	810	577,44	
C-60-2.5-3	192,8	0,16	829,88	810	557,84	
C-30-4.0-1	88,4	0,16	1809,95	1090	3570,77	3342,52
C-30-4.0-2	89,8	0,16	1781,74	1090	3460,30	
C-30-4.0-3	96,5	0,16	1658,03	1090	2996,48	
C-40-4.0-1	110,5	0,16	1447,96	930	1949,84	1846,31
C-40-4.0-2	111,3	0,16	1437,56	930	1921,91	
C-40-4.0-3	119,5	0,16	1338,91	930	1667,20	
C-50-4.0-1	133,5	0,16	1198,50	910	1307,13	1414,14
C-50-4.0-2	127	0,16	1259,84	910	1444,35	
C-50-4.0-3	125	0,16	1280,00	910	1490,94	

Tabla 5.17.

Valores medios de módulo de elasticidad dinámico de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola caucho por granulometrías

5.5.2 Módulo de elasticidad estático. Curvas de tensión-deformación.

Las gráficas de tensión/deformación (Fig. 5.46.) se han elaborado a partir de los valores registrados de flecha en función de la carga aplicada para cada una de las series analizadas, de acuerdo a las expresiones reflejadas en el capítulo de "Método Experimental"

Se muestran dos gráficas para cada granulometría, en la primera se reflejan los valores de deformación producida en función de la tensión, a partir de los datos obtenidos a lo largo de todo el ensayo.

En las segundas gráficas se ha seleccionado para cada serie el tramo lineal correspondiente al comportamiento elástico, obteniéndose el módulo de elasticidad estático a partir de la pendiente de las ecuaciones de ajuste. Para ello se ha eliminado el tramo inicial que produce un error debido a la máquina de ensayo, y el final que correspondería a la zona plástica.

Se observa en todas las granulometrías la disminución del módulo de elasticidad al aumentar la proporción de caucho, que se refleja en la disminución de la pendiente de las curvas de forma progresiva, indicando la menor fragilidad de los compuestos que contienen caucho. También se observan mermas en la tensión máxima alcanzada a medida que aumenta el porcentaje de caucho en todos los tamaños de caucho.

Las pendientes en función del porcentaje de adición de caucho y las tensiones máximas son diferentes para cada granulometría, mostrando la incidencia que tiene el tamaño del grano en el comportamiento elástico del material. El comportamiento dúctil predomina cuando el tamaño del agregado de caucho disminuye, porque el módulo de elasticidad es inferior para casi todas las adiciones de caucho. Benazzouk et al (2003) llegaba a la conclusión contraria al comparar dos tamaños de caucho.

Aunque las pendientes de las ramas elásticas de las curvas difieren en gran medida y las resistencias máximas también, la forma de las curvas es similar en este tramo para todos los compuestos estudiados, incluso para la muestra de referencia. Sin embargo después de alcanzar la tensión máxima, en lo que sería el periodo plástico de la curvas, difieren de la de referencia, registrándose un quiebro a partir de un primer tramo lineal que no aparece en la muestra de referencia. En ese punto las

muestras rompen pero permanecen cosidas en mayor o menor medida, dependiendo del tipo y proporción de caucho añadido, manteniendo un remanente de carga.

Hernández Olivares et al (2002) en hormigones con fracciones volumétricas de caucho (3,5% y 5%) observaba comportamientos similares en las curvas de tensión-deformación, aunque con reducciones mínimas de resistencia. Podemos sacar conclusiones similares a las suyas en los compuestos estudiados: en la rama elástica de la gráfica de tensión-deformación las características de comportamiento del material le vienen dadas por la matriz de escayola, suponiendo los granos de caucho defectos en la estructura del material que llevan a mermas de resistencia, a lo que habría que añadir el previsible aumento de la porosidad como consecuencia de la incorporación del caucho. En cambio después de superar la resistencia última el caucho colabora con el yeso produciendo una rotura paulatina y aumentando la capacidad de absorción de energía por deformación (tenacidad).

En la tabla 5.18. se reflejan los valores de los módulos de elasticidad obtenidos. Nuevamente comprobamos la gran diferencia en la rigidez de las distintas series analizadas en relación a la serie de referencia sin adición de caucho. El aumento en contenido de caucho aumenta la flexibilidad en todas las series, obteniéndose valores muy similares para las menores proporciones de caucho en las series de grano fino y medio y algo superiores para las de grano grueso (Fig. 5.47.).

La disminución de módulo de elasticidad en relación a la serie de referencia varía entre el 48% y el 88% del grano más grueso hasta el 68% y 96% para el grano más fino, obteniéndose reducciones muy similares a estas últimas para el grano medio. En cualquier caso para las mayores adiciones de caucho se obtienen valores de módulos de elasticidad inadmisibles para la mayoría de las aplicaciones, como ya se comprobaba en el módulo de elasticidad dinámico.

Si comparamos estos descensos con los obtenidos para el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a compresión, por ejemplo en el grano más fino, con adiciones del 30%, la resistencia a compresión en relación a la serie de referencia sufre decrementos del 76 %, mientras que el módulo de elasticidad dinámico los sufre del 65 % y el estático del 68%; para adiciones del 60%, estos valores son del 95%, 96% y 97% respectivamente. Es decir las tendencias son muy similares para el módulo de elasticidad estático y el dinámico para el grano fino. En el grano medio se produce un comportamiento similar y en el grano grueso es donde encontramos

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

mayores diferencias siendo la reducción del módulo de elasticidad estático para una adición del 30% del 48% mientras el dinámico se reduce en un 57% y para adiciones del 40% estos valores son del 69% y 89% respectivamente.

Normalmente los módulos de elasticidad estáticos difieren sustancialmente de los dinámicos, siendo estos últimos mayores. El módulo de elasticidad dinámico se consideraba sobreestimado en aproximadamente un 17%, al menos en la muestra de referencia, por haber eliminado el coeficiente de Poisson. Al comparar el módulo de elasticidad dinámico con el estático, se observa en este último un valor 14% aproximadamente inferior, en la muestra patrón. Estos valores se incrementan de forma progresiva con la incorporación de caucho en los granos fino y medio, con valores entre el 22 y el 39% en el grano fino, y entre el 31 y el 42% en el grano medio. En el grano más grueso los resultados son muy variables, quizá por la menor isotropía del material compuesto. Podemos entonces concluir que los granos de caucho efectivamente actúan como discontinuidades en el material que afectan al coeficiente de Poisson que es difícil de medir en la práctica y requiere instrumentos muy especiales. Por tanto la medida de la velocidad ultrasónica puede no ser un método fiable en este tipo de materiales.

Se confirma que la adición de caucho disminuye la rigidez, modificándose su comportamiento vibratorio que favorece su utilización en determinadas aplicaciones que requieren un mejor comportamiento acústico o resistencia al impacto o a la fisuración y el agrietamiento. Es decir, la adición de caucho mejora la capacidad para disipar y absorber energía, como ya se adelantaba al comparar los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo con los teóricos en función de la ley de masas.

Pero los valores tan bajos de módulos de elasticidad obtenidos para las mayores incorporaciones de caucho del 50 y 60 %, hacen inviable su uso para la mayoría de las aplicaciones.

Figura 5.46.

Curvas tensión-deformación en flexión para series de referencia y ecuaciones de tendencia lineal de compuestos escayola-caucho para granulometría (a) 0-0.6 mm, (b) 0.5-2.5 mm y (c) 2.5-4.0 mm.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Denominación	reducción respecto a serie R %	Módulo elasticidad estático (MPa)
R		6742,9
C-30-0.6	68	2138,1
C-40-0.6	74	1759,7
C-50-0.6	91	611,9
C-60-0.6	96	236,5
C-30-2.5	63	2523,5
C-40-2.5	77	1552,1
C-50-2.5	84	1083,9
C-60-2.5	95	322,88
C-30-4.0	48	3528,7
C-40-4.0	69	2109,6
C-50-4.0	88	828,75

Tabla 5.18.

Módulo de elasticidad estático a flexión de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría. Porcentaie de reducción respecto a muestra de referencia.

Figura 5.47.

Módulo de elasticidad estático a flexión de muestras de referencia y series correspondientes a cada granulometría.

5.6. COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA

En los siguientes apartados se muestran los resultados de los ensayos de porosidad abierta, absorción de agua por inmersión, absorción de agua por capilaridad y dilatación lineal por hinchamiento descritos en el capítulo "Método Experimental".

5.6.1 Porosidad abierta, densidad aparente y coeficiente de absorción por inmersión

En las figuras 5.48. a 5.51. y en las tablas 5.19. a 5.21. se incluyen los resultados obtenidos en los ensayos de absorción por inmersión y porosidad abierta realizados sobre las distintas series analizadas. Se han elaborado tres tablas, una por cada granulometría, incluyendo en cada una de ellas los valores de la serie de referencia.

Los resultados que se presentan en las gráficas comprenden, para cada granulometría, los valores de densidad aparente, coeficiente de absorción por inmersión y porosidad abierta en relación a la proporción de caucho. Se ha añadido una gráficas más, en la que se analizan los resultados de porosidad abierta en relación a la proporción de A/Y empleada en cada una de las series elaboradas.

El incremento en la cantidad de caucho supone en todas las granulometrías una disminución progresiva de la densidad aparente y un incremento del coeficiente de absorción y la porosidad abierta, con la excepción de la serie C-50-4.0, en la que observamos nuevamente una distorsión en la tendencia general.

Los menores valores de densidad se obtienen para el grano más fino, en valores similares se encuentra el grano grueso (salvo la serie en que se adiciona el 50% de caucho) y los valores más altos se dan en el grano medio. Pero en todas las series se observa una disminución respecto a la serie de referencia.

Estos resultados se trasladan en sentido inverso al coeficiente de absorción y a la porosidad abierta, resultando que el grano más fino tiene los mayores valores para estos parámetros, disminuyen ligeramente para el grano más grueso y los menores valores se dan en el grano medio. En relación a la serie de referencia, el valor del coeficiente de absorción es muy similar al de la serie C-30-2.5 y en general a todas aquellas en las que la adición de caucho es del 30%. Sin embargo la porosidad abierta

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

no mantiene esta misma relación, pudiendo estar vinculada a la relación A/Y utilizada en cada una de las mezclas.

En la gráfica en la que relacionamos la porosidad abierta con la proporción A/Y utilizada (Fig. 5.51.), observamos que las series en las que se adiciona caucho estarían dentro de una tendencia casi lineal para el grano fino y medio, en el grano más grueso encontramos la excepción de la serie C-50-4.0. Las muestras patrón sin contenido de caucho muestran una porosidad abierta bastante inferior a las de las tres granulometrías con relaciones A/Y similares. Por tanto podemos confirmar que la adición de caucho produce una mayor porosidad, más oclusión de aire en el interior de las muestras, como ya se venía sugiriendo anteriormente. Los resultados coinciden con los de anteriores investigaciones como las de Fedroff et al. (1996) que obtenían mayores cantidades de aire en hormigones con caucho incluso sin el uso de aditivos aireantes, Khatib et al. (1999) hacia observaciones similares y Siddique et al. (2004) señalaba que el efecto puede ser debido a la naturaleza no polar del caucho y su tendencia a atrapar aire en su superficie rugosa.

En la misma gráfica comprobamos al relacionar las diferentes granulometrías, que aunque las curvas están muy próximas, la porosidad en función de la relación A/Y es mayor para el grano más fino, a continuación para el medio y por último el grueso, salvo la distorsión ya observada anteriormente. Se confirma así que el grano más fino produce una mayor porosidad, como ya se venía apuntando con anterioridad, por la mayor superficie específica, es decir la mayor superficie de contacto entre el grano fino y la matriz de yeso.

Por tanto, aunque en la porosidad abierta es determinante la relación A/Y empleada en la mezcla, como podemos comprobar al comparar la proximidad en las curvas de las figuras 5.50. y 5.51., también contribuyen otros factores como las características, el tamaño y la proporción de la carga añadida.

Además, la interacción entre el caucho, el yeso y el agua podrían modificar no sólo el volumen de poros sino también la estructura porosa, es decir la distribución y el tamaño de los poros, aspectos estos que sería necesario estudiar para poder completar la explicación de los resultados obtenidos en relación a densidad, resistencia mecánica, el módulo de elasticidad, la durabilidad del material, y el comportamiento térmico y acústico.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

DENSIDAD APARENTE, ABSORCIÓN Y POROSIDAD ABIERTA : SERIES REFERENCIA Y GRANULOMETRÍA 0.6												
Denominación	Peso Seco medio	Peso Seco medio	Peso Saturado medio	Peso Sumerg. medio	Volumen aparente medio	Densidad aparente	Absorc. media	Absorc. media	Poros. Abierta	Poros. Abierta	Poros. Abierta	Poros. Abierta
	(g)	(g)	(g)	(g)	(cm³)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
R1	321,8	399,26	146,01	253,25	1,27	1,27	24,07		30,59			
R2	322,5	321,57	399,01	145,73	253,60	1,27	24,02	24,08	30,47			30,54
R3	320,4	397,79	144,50	253,29	1,26		24,15		30,55			
C-30-0.6-1	269,9	354,53	95,70	258,83	1,04		31,36		32,70			
C-30-0.6-2	269,7	269,4	354,03	95,23	258,59	1,04	31,33	31,42	32,63			32,73
C-30-0.6-3	268,6	353,36	95,40	257,96	1,04		31,56		32,86			
C-40-0.6-1	230,6	323,09	68,81	254,28	0,91		40,11		36,37			
C-40-0.6-2	230,5	230,4	323,03	70,04	253,64	0,91	40,32	40,20	36,68			36,52
C-40-0.6-3	230,1	322,56	69,32	253,24	0,91		40,18		36,51			
C-50-0.6-1	203,5	300,92	43,50	257,42	0,79		47,87		37,84			
C-50-0.6-2	201,6	201,57	298,22	42,59	256,27	0,79	47,89	47,95	37,78			37,72
C-50-0.6-3	199,6	295,59	39,77	255,82	0,78		48,09		37,52			
C-60-0.6-1	176,1	279,74	26,74	253,00	0,70		58,85		40,96			
C-60-0.6-2	174,3	175,07	279,03	25,92	253,11	0,69	59,51	59,38	41,10			41,07
C-60-0.6-3	174,8	279,31	25,40	253,91	0,69		59,79		41,16			

Tabla 5.19
Densidad aparente, absorción y porosidad abierta para serie de referencia y las correspondientes a la granulometría de 0.6 para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso..

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

DENSIDAD APARENTE, ABSORCIÓN Y POROSIDAD ABIERTA : SERIES REFERENCIA Y GRANULOMETRÍA 2.5												
Denominación	Peso Seco	Peso Seco medio	Peso Saturado medio	Peso Sumerg. medio	Peso Sumerg.	Volumen aparente	Densidad aparente	Absorc.	Absorc. media	Poros. Abierta	Poros. Abierta Media	Poros. Abierta Media
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(cm³)	(g/cm³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
R1	321,8	399,26	146,01	253,25	1,27	1,27	24,07	30,59	24,08	30,47	30,54	30,54
R2	322,5	321,57	399,98	145,73	253,60	1,27	1,27	24,02	24,02	30,47	30,55	30,55
R3	320,4	397,79	144,50	253,29	1,26	1,26	24,15	24,15	24,15	30,55	30,55	30,55
C-30-2.5-1	295,4	362,81	107,05	255,76	1,15	1,15	22,82	26,36	23,03	26,73	26,57	26,57
C-30-2.5-2	293,9	361,97	107,29	254,68	1,15	1,15	23,16	26,73	23,10	26,61	26,61	26,61
C-30-2.5-3	293,5	361,29	106,58	254,71	1,15	1,15	23,10	26,61	23,10	26,61	26,61	26,61
C-40-2.5-1	265,1	341,17	84,13	257,04	1,03	1,03	28,69	29,59	28,63	29,75	29,56	29,56
C-40-2.5-2	265,7	342,34	84,71	256,95	1,03	1,03	28,84	29,75	28,84	29,75	29,56	29,56
C-40-2.5-3	265,0	340,14	83,95	256,19	1,03	1,03	28,35	29,33	28,35	29,33	29,33	29,33
C-50-2.5-1	226,6	310,20	59,88	250,32	0,91	0,91	36,89	33,40	37,95	35,00	34,39	34,39
C-50-2.5-2	227,6	315,71	63,97	251,74	0,90	0,90	38,71	35,00	38,71	35,00	34,39	34,39
C-50-2.5-3	227,8	314,93	64,26	250,67	0,91	0,91	38,25	34,76	38,25	34,76	34,76	34,76
C-60-2.5-1	201,0	291,54	46,41	245,13	0,82	0,82	45,04	36,94	46,56	39,16	37,90	37,90
C-60-2.5-2	203,4	302,50	49,45	249,21	0,80	0,80	48,72	39,16	46,56	39,16	37,90	37,90
C-60-2.5-3	204,3	298,12	48,66	249,46	0,82	0,82	45,92	37,61	45,92	37,61	37,61	37,61

Tabla 5.20

Densidad aparente, absorción y porosidad abierta para serie de referencia y las correspondientes a la granulometría de 2.5 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.

Fig 5.48.

Valores medios de densidad aparente de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías.

Fig 5.49.

Valores medios de coeficiente de absorción de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.50.

Valores medios de porosidad abierta de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías en relación a la adición de caucho en peso.

Fig 5.51.

Valores medios de porosidad abierta de tres muestras para serie de referencia y series compuestos escayola-caucho por granulometrías en relación a la proporción A/Y de cada serie.

5.6.2 Coeficiente de absorción por capilaridad

En las figuras 5.52 a 5.57. y las tablas 5.22 a 5.24. se incluyen los resultados obtenidos en los ensayos de absorción por capilaridad realizados sobre las distintas series realizadas. Se han elaborado tres tablas y tres gráficas, una por cada granulometría, incluyendo en cada una de ellas los valores de la serie de referencia.

El incremento de peso en función del área ($\Delta P = (P_t - P_0)/A_s$) de contacto se relaciona gráficamente con la raíz cuadrada del tiempo, siendo la pendiente de la gráfica obtenida el coeficiente de absorción por capilaridad (UNE EN 1925:1999: "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad").

Los resultados que se presentan comprenden, para cada granulometría, los valores del agua absorbida en los intervalos de tiempo considerados y la representación gráfica comparativa de la masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo (fig. 5.52, 5.54 y 5.56.). En todos los casos se han obtenido ecuaciones lineales con una correlación de los puntos experimentales con la recta de ajuste superiores a 0,99. A partir de estos resultados se han determinado los coeficientes de absorción por capilaridad, también denominados de absorción hídrica o velocidad de absorción característica del material, como las pendientes de las rectas de ajuste obtenidas (tablas 5.25, 5.26 y 5.27).

El incremento en la cantidad de caucho supone en todas las granulometrías un aumento progresivo de la absorción de agua por capilaridad.

Los valores más bajos del coeficiente de absorción se obtienen para las series de granulometría medía y los más altos para la más fina, todo ello en consonancia con los resultados de porosidad y absorción por inmersión. En general observamos que se produce una disminución de la absorción por capilaridad en las series que adicionan un 30% de caucho para todas las granulometrías estudiadas y para el grano medio con una adición del 40 % de caucho. Es significativo el resultado para el grano más fino con un 30% de adición de caucho, que aun teniendo una porosidad abierta superior a la serie de referencia en un 7%, da como resultado un coeficiente de absorción por capilaridad inferior en aproximadamente un 22%. Y es aún más destacable el resultado en el grano medio con una proporción de caucho del 30%, que

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

con una porosidad abierta inferior en un 13% a la serie de referencia, da como resultado un coeficiente de absorción por capilaridad inferior en un 52%.

Si buscamos valores casi coincidente con la muestra de referencia encontramos las series C-50-2.5 y C-40-4.0 y se aproximan bastante los de la serie C-40-0.6, aunque este es ligeramente superior. Pero hay que tener en cuenta que en estas series la porosidad abierta es mayor que en la serie de referencia.

El valor del coeficiente de absorción depende de la porosidad abierta y del tamaño de los espacios vacíos. Por tanto si la porosidad abierta es menor en la serie de referencia y su coeficiente de absorción es el mismo, es que el tamaño de los poros es superior. En consecuencia podemos concluir que la introducción de caucho produce un menor tamaño de poro medio o una segunda porosidad de menor tamaño que la correspondiente a la matriz de escayola.

Si comparamos entre granulometrías el grano medio da los menores valores de absorción por capilaridad (fig. 5.58) pero con tendencias semejantes a las observadas en la porosidad abierta.

En series con valores similares para las distintas granulometrías, las diferencias son muy pequeñas. Así, en relación a la serie C-30-0.6 (grano fino), las series C-40-2.5 (grano medio) y C-30-4.0 (grano grueso) tienen porosidades abiertas inferiores en un 10% y un 13% respectivamente, mientras que los coeficientes de absorción por capilaridad son inferiores en un 5% y un 10% (la relación A/Y en todas ellas está en torno a 0,5). Algo semejante encontramos al comparar la serie C-40-0.6 (grano fino) con las series C-50-2.5 (grano medio) y C-50-4.0 (grano grueso) con porosidades abiertas inferiores en un 6% y un 10% respecto a la serie de grano fino y coeficientes de absorción por capilaridad inferiores en un 5% y un 7% (la relación A/Y está en torno a 0,6 en las tres series). Es decir, aunque con muy pequeñas diferencias, en las series de grano medio la porosidad abierta es proporcionalmente menor que el coeficiente de absorción por capilaridad y en consecuencia podemos decir que el grano medio produce previsiblemente tamaños de poro medio superiores, seguido del grano grueso y siendo, por tanto, el grano fino el que daría como resultado menores tamaños de poro medio.

En conclusión, así como la adición de caucho produce una modificación sustancial en la porosidad y previsiblemente en su tamaño y distribución, el diferente tamaño de grano no parece influir de manera destacable.

En cualquier caso, el estudio del tamaño de los poros y su distribución en función de la granulometría y la adición de caucho, parece pertinente para poder completar el análisis.

En el segundo ensayo a intervalos de tiempo mayores de 30, 90, 180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos, se observa un primer periodo lineal que se corresponde con el del primer ensayo en el que se calculaba la pendiente de la recta para obtener el coeficiente de absorción, y a partir de un determinado valor del tiempo se produce una variación de la pendiente llegándose a una curva casi horizontal para un valor próximo al de saturación máxima (fig. 5.53, 5.55 y 5.57). Hay que destacar que los resultados en relación a la serie de referencia mantienen la tendencia inicial en el grano fino y en el grano grueso aunque en este último hay algunas diferencias. Sin embargo en el grano medio los valores máximos quedan por debajo de la muestra de referencia para todos los porcentajes de adición, lo que lleva a pensar en la existencia de mayores diferencias en la distribución de los poros para esta granulometría, con una mayor cantidad de poros de mayor tamaño que actuarían en la primera parte de la curva y una menor cantidad de poros de menor tamaño que condicionarían el segundo periodo.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD: SERIES REFERENCIA Y GRANULOMETRÍA 0.6																	
t(seg) √t			R			C-30-0.6			C-40-0.6			C-50-0.6			C-60-0.6		
			Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct
			(g)	(g)	(g/m².s¹/²)	(g)	(g)	(g/m².s¹/²)	(g)	(g)	(g/m².s¹/²)	(g)	(g)	(g/m².s¹/²)	(g)	(g)	(g/m².s¹/²)
INTERVALOS DE TIEMPO CORRESPONDIENTES A ALTA ABSORCIÓN. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD																	
0	0	0,00	321,57	0,00	0,00	269,40	0,00	0,00	230,47	0,00	0,00	201,66	0,00	0,00	175,15	0,00	0,00
1	60	7,75	328,93	7,36	549,13	274,98	5,58	450,23	238,87	8,40	677,77	210,28	8,62	695,52	189,35	14,20	1145,49
3	180	13,42	333,09	11,52	536,81	278,17	8,77	408,39	242,86	12,39	577,19	214,90	13,24	616,78	194,27	19,12	890,55
5	300	17,32	335,95	14,38	518,89	280,55	11,15	402,34	245,77	15,30	552,09	218,47	16,81	606,70	198,44	23,28	840,16
10	600	24,49	341,67	20,10	512,78	284,01	14,61	327,87	251,69	21,22	541,35	225,36	23,70	604,63	206,60	31,45	802,38
15	900	30,00	346,06	24,49	510,21	288,24	18,84	392,43	256,20	25,73	536,11	230,04	28,38	591,32	210,57	35,42	737,92
20	1200	34,64	350,50	28,93	521,90	291,20	21,80	393,32	260,11	29,64	534,71	235,56	33,90	611,69	218,61	43,46	784,05
40	2400	48,99	361,05	39,48	503,68	300,47	31,07	396,34	272,49	42,02	536,08	249,92	48,26	615,65	236,06	60,91	777,08
INTERVALOS DE TIEMPO CORRESPONDIENTES A BAJA ABSORCIÓN																	
0	0	0,00	311,97	0,00	0,00	264,10	0,00	0,00	231,30	0,00	0,00	197,70	0,00	0,00	205,93	0,00	0,00
30	1800	42,43	364,07	46,10	679,07	295,37	31,27	460,60	270,43	39,13	576,49	242,30	44,60	657,02	271,13	65,20	960,54
90	5400	73,48	390,13	72,16	613,76	312,17	48,07	408,82	290,43	59,13	502,94	265,30	67,60	574,95	302,33	96,40	819,93
180	10800	103,92	409,47	91,5	550,27	327,13	63,03	379,09	313,10	81,80	491,95	288,67	90,97	574,08	314,00	108,07	649,94
480	28800	169,71	410,10	92,13	339,3	348,97	84,87	312,55	324,07	92,77	341,65	294,23	96,53	355,52	314,47	108,54	399,72
1440	86400	293,94	411,00	93,03	197,81	349,90	85,80	182,44	324,70	93,40	196,60	295,37	97,67	207,67	315,70	109,77	233,40
2880	172800	415,69	412,20	94,23	141,68	354,47	90,37	135,87	326,70	95,40	143,44	297,57	99,87	150,15	318,53	112,60	169,30
4320	259200	509,12	414,23	96,26	118,17	354,80	90,70	111,34	329,07	97,77	120,02	300,20	102,50	125,83	321,93	116,00	142,41

Tabla 5.22.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6. Valores medios de peso, incremento de masa y absorción por capilaridad en función del tiempo para tres muestras de las series de referencia y las correspondientes a la granulometría más fina de 0.6 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD: SERIES REFERENCIA Y GRANULOMETRÍA 2.5													
t(min) t(seg)		R			C-30-2.5			C-40-2.5			C-50-2.5		
		Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct	Peso Medio	Inc. Masa acum.	Cct
		(g)	(g)	(g/m ² .s ^{1/2})	(g)	(g)	(g/m ² .s ^{1/2})	(g)	(g)	(g/m ² .s ^{1/2})	(g)	(g)	(g/m ² .s ^{1/2})
INTERVALOS DE TIEMPO CORRESPONDIENTES A ALTA ABSORCIÓN. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD													
0	0	321,57	0,00	0,00	294,38	0,00	0,00	265,47	0,00	0,00	227,50	0,00	0,00
1	60	328,93	7,36	549,13	297,47	3,09	249,32	271,11	5,64	455,34	235,07	7,58	611,34
3	180	333,09	11,52	536,81	299,46	5,08	236,50	273,71	8,24	383,86	238,45	10,96	510,41
5	300	335,95	14,38	518,89	301,52	7,14	257,76	275,83	10,36	373,71	242,04	14,55	524,91
10	600	341,67	20,10	512,78	302,88	8,50	216,97	279,64	14,17	361,64	247,54	20,04	511,42
15	900	346,06	24,49	510,21	305,75	11,37	236,88	284,08	18,61	387,78	252,07	24,57	511,94
20	1200	350,50	28,93	521,90	307,59	13,21	238,40	286,65	21,18	382,13	255,85	28,36	511,62
40	2400	361,05	39,48	503,68	313,23	18,85	240,48	294,73	29,26	373,33	267,74	40,24	513,37
INTERVALOS DE TIEMPO CORRESPONDIENTES A BAJA ABSORCIÓN													
0	0	311,97	0,00	0,00	298,47	0,00	0,00	264,27	0,00	0,00	235,10	0,00	0,00
30	1800	364,07	46,10	679,07	323,03	24,56	361,85	297,73	33,46	492,96	275,47	40,37	594,66
90	5400	390,13	72,16	613,76	336,33	37,86	322,03	315,47	51,20	435,44	295,97	60,87	517,68
180	10800	409,47	91,5	550,27	350,53	52,06	313,11	333,67	69,40	417,36	314,67	79,57	478,52
480	28800	410,10	92,13	339,3	372,53	74,06	272,76	345,60	81,33	299,53	319,77	84,67	311,81
1440	86400	411,00	93,03	197,81	373,53	75,06	159,61	346,93	82,66	175,77	321,60	86,50	183,92
2880	172800	412,20	94,23	141,68	374,77	76,30	114,71	349,83	85,56	128,65	323,77	88,67	133,31
4320	259200	414,23	96,26	118,17	376,53	78,06	95,83	353,00	88,73	108,93	326,27	91,17	111,92

Tabla 5.23. Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5. Valores medios de peso, incremento de masa y absorción por capilaridad en función del tiempo para tres muestras de las series de referencia y las correspondientes a la granulometría medio de 2.5 mm para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.52.

Absorción por capilaridad series de referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos

	R	C-30-0.6	C-40-0.6	C-50-0.6	C-60-0.6
Coefficiente de absorción (g/m².s½)	500,74	389,73	523,39	606,22	740,29

Tabla 5.25.

Coefficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%

Fig 5.53.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30, 90, 180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos

Fig 5.54.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos

	R	C-30-2.5	C-40-2.5	C-50-2.5	C-60-2.5
Coefficiente de absorción (g/m².s½)	500,74	237,55	371,16	506,08	643,34

Tabla 5.26.

Coefficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%.

Fig 5.55.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 2.5, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30,90,180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.56.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 4.0, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos

	R	C-30-4.0	C-40-4.0	C-50-4.0
Coefficiente de absorción (g/m².s½)	500,74	351,9	488,39	546,79

Tabla 5.27.

Coefficiente de absorción por capilaridad referencia y granulometría 0.6, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60%

Fig 5.57.

Absorción por capilaridad referencia y granulometría 4.0, para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de incremento de masa de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. Intervalos de 30, 90, 180, 480, 1440, 2880 y 4320 minutos

5.6.3 Tamaño de poro y número de poros

En la tabla 5.28 se presentan los valores del radio de los poros y su distribución, obtenidos a partir de los incrementos de masa en los ensayos de absorción por capilaridad para cada una de las muestras estudiadas.

Con estos valores se han elaborados dos tipos de gráficas. En las tres primeras (Fig. 5.58) se relaciona el tamaño medio del poro con el tiempo, diferenciándolas por granulometrías e incluyendo en todas ellas la serie de referencia.

Comprobamos que los poros de mayor tamaño medio se producen para las adiciones de caucho del 30% en todas las granulometrías, disminuyendo progresivamente conforme añadimos caucho. Podemos asociar estas diferencias a la relación A/Y utilizada.

En relación a los diferentes tamaños de grano, el análisis de los datos revela que los valores más altos de tamaño de poro se obtienen para el grano medio, siendo además el que presenta mayores diferencias en función de la cantidad de caucho añadida. Los valores más bajos se dan en el grano grueso.

Si comparamos con la serie de referencia, las series que dan valores más cercanos en función del tamaño de grano, son las que tienen un contenido de caucho del 40% para el grano fino (C-40-0.6) y del 50% para el grano fino, el medio y el grueso (C-50-0.6, C-50-2.5 y C-50-4.0). En todas ellas, podemos atribuírselo a la similitud en la relación A/Y utilizada, con la excepción de la serie C-50-0.6 con una relación A/Y más elevada. Podemos considerar entonces que los poros de mayor tamaño de cada serie estarían asociados a la relación A/Y utilizada, vinculada más a la matriz de escayola que a la adición de caucho.

Pero en el apartado anterior se resaltaba el comportamiento singular de estas mismas series, que aun teniendo un valor similar de coeficiente de absorción por capilaridad al de la muestra de referencia, la porosidad abierta era mayor en valores destacables y por tanto, si el tamaño de los poros mayores es similar en ambas series y en consecuencia no es el factor que influye en las diferencias encontradas en porosidad abierta, es necesario estudiar su distribución.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Como se decía en el capítulo "Procedimiento experimental", el estudio del tamaño de poro y su distribución, teniendo en cuenta que el procedimiento empleado es el de absorción por capilaridad, se limita a megaporos con radios superiores a $92,8\ \mu\text{m}$, que es el permitido por las dimensiones de las muestras de 16 cm.

En las fig. 5.59., 5.60. y 5.61. se relaciona el tamaño medio del poro con su número. Comprobamos que los materiales obtenidos tienen características similares en cuanto a tamaño y distribución de poros, con una menor proporción de poros de gran tamaño que se incrementa de forma notable en torno a tamaños de poro inferiores a $200\ \mu\text{m}$. Este efecto se produce en mayor medida al aumentar la proporción de caucho.

Para la granulometría menor comparamos la serie C-40-0.6 con la de referencia y observamos valores similares de coeficiente de absorción por capilaridad, relación A/Y, tamaños de poro máximos, tamaños medios de megaporo en función del tiempo y número de megaporos hasta tamaños medios en torno a $200\ \mu\text{m}$. En el tramo comprendido entre los $100\ \mu\text{m}$ y los $200\ \mu\text{m}$ se observa un mayor incremento en el número de poros para la serie de referencia, aunque con tendencias paralelas (los megaporos están asociados a la matriz de escayola y su relación A/Y, pero la serie C-40-0.6 tiene un menor contenido de escayola que la de referencia, por eso la tendencia es la misma pero con un menor número de poros). Por tanto, si esta tendencia se mantuviera constante, la porosidad abierta de la serie de referencia debería ser mayor; Sin embargo, contrariamente, su porosidad abierta es inferior en un 17 % a la de la serie C-40-0.6 y en consecuencia el número de poros de menor tamaño en esta serie tiene que ser mayor.

Si hacemos esta misma comparación de la serie de referencia con la C-50-2.5 para el grano medio y la C-50-4.0 encontramos resultados similares.

Siguiendo un razonamiento semejante, podemos hacer una comparación con las tres series seleccionadas de cada una de las granulometrías (C-40-0.6 para grano fino, C-50-2.5 para grano medio y C-50-4.0 para grano grueso) observamos valores similares de coeficiente de absorción por capilaridad, relación A/Y, tamaños medios de megaporo en función del tiempo y número de megaporos hasta tamaños medios en torno a $200\ \mu\text{m}$. Los tamaños de poro máximos son superiores en el grano medio, dándose los más pequeños en el grano grueso; pero el número de poros de mayor tamaño es mayor en el grano grueso y menor en el medio, compensándose así las diferencias iniciales y siguiendo en conjunto un comportamiento similar. El análisis de

los datos en el tramo comprendido entre los 100 μm y los 200 μm revela un mayor incremento en el número de poros para la serie correspondiente al grano grueso, manteniéndose el grano fino en valores inferiores (fig. 5.62). Por tanto, si esta tendencia se mantuviera constante, la porosidad abierta de la serie correspondiente al grano grueso debería ser mayor; sin embargo, contrariamente, su porosidad abierta es inferior en aproximadamente un 10 % a la de la serie C-40-0.6 y en consecuencia el número de poros de menor tamaño en esta serie tiene que ser mayor.

De la observación de las series de los grano fino y medio no se pueden hacer deducciones similares.

Podemos concluir que hay una porosidad de mayor tamaño condicionada por la matriz de yeso que depende del contenido de yeso utilizado y su relación A/Y y una microporosidad añadida consecuencia de la adición de caucho con diferentes características según el tamaño del mismo. Los compuestos que contienen caucho con tamaños de grano fino (0.0-0.6) y medio (0.5-2.5), con una mayor superficie específica, producen una microporosidad mayor que los correspondientes a la granulometría más gruesa (2.5-4.0). Estos resultados están de acuerdo con las observaciones de Turki et al. (2009) que constataba mediante microscopía electrónica de barrido la generación de microporos en torno a los agregados de caucho en compuestos cemento-caucho.

Este efecto puede deberse según Siddique et al (2004) a la naturaleza no polar del caucho y a su tendencia a atrapar aire en su superficie rugosa.

La microporosidad añadida que se genera en torno a los agregados de caucho confirma la justificación de la fuerte disminución de la resistencia a flexión y a compresión y del módulo de elasticidad, así como del diferente desarrollo de las correspondientes curvas en función de la granulometría.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

RADIO Y NÚMERO DE POROS																														
t t min)(seg)√t			R		0.0-0.6												0.5-2.5								2.5-4.0					
					C-30-0.6			C-40-0.6			C-50-0.6			C-60-0.6			C-30- 2.5		C-40-2.5		C-50-2.5		C-60-2.5		C-30-4.0		C-40-4.0		C-50-4.0	
			Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros	Rad. cap. (μm)	Nº de poros
0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	60	7,75	891	177	1086	110	810	222	857	216	655	465	1350	49	990	122	948	172	594	415	1061	111	675	322	768	234				
3	180	13,42	594	150	781	87	619	138	646	154	469	225	948	45	730	76	665	109	455	208	718	83	518	166	571	143				
5	300	17,32	495	124	645	79	495	126	489	157	377	237	768	58	594	76	524	147	381	190	586	76	437	148	479	122				
10	600	24,49	384	319	489	152	368	345	356	414	286	613	636	46	464	176	387	304	291	520	445	189	332	400	371	318				
15	900	30,00	301	313	377	240	301	322	297	339	250	341	500	123	371	257	314	310	246	489	371	180	278	355	307	281				
20	1200	34,64	250	380	329	193	260	321	247	478	207	832	432	91	318	173	270	301	215	468	316	176	243	355	268	302				
30	1800	42,43	212	422	247	364	212	556	183	1135	139	2003	354	169	275	376	232	429	186	911	290	234	212	606	218	489				
40	2400	48,99	180	759	219	495	184	803	174	574	146	839	320	191	239	292	190	816	157	1071	226	472	175	771	197	670				
90	5400	73,48	99	7082	148	2457	124	3061	116	3585	95	7983	158	2582	130	3623	111	3993	93	5795	142	2575	120	1621	112	5760				

Tabla 5.28.

Radio medio de megaporo y número de ellos para muestras de referencia y para las tres granulometrías estudiadas con adiciones de caucho del 30%, 40%, 50% y hasta 60% en peso. Resultados obtenidos a diferentes intervalos de tiempo.

Fig 5.58.

Radio de poro referencia y diferentes granulometría para adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso. Valores medios de tamaño de poro frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.59.

Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 0.0-0.6 mm y adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.

Fig 5.60.

Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 0.5-2.5 mm y adiciones de caucho de 30, 40, 50 y 60% en peso.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Fig 5.61.

Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y de granulometría 2.5-4.0 mm y adiciones de caucho de 30, 40 y 50% en peso.

Fig 5.62.

Numero de poros de radios superiores a 90 μm y detalle para radios entre 90 y 230 μm para series de referencia y C-40-0.6 para grano fino, C-50-2.5 para grano medio y C-50-4.0 para grano grueso.

5.6.4 Microestructura

Se ha estudiado la zona de transición entre pasta y caucho mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) con el fin de definir el efecto de la incorporación de caucho en la microestructura del yeso.

Se han seleccionado las series C-30-0.6, C-30-2.5 y C-30-4.0, es decir las que tienen un contenido de caucho del 30% para las tres granulometrías.

Fig 5.63.

Micrografía SEM serie C-30-0.6 (x30 500 µm)

En la figura 5.63. se observa la existencia de poros de gran tamaño en la matriz de escayola.

En las figuras 5.64 a, b, c y d se muestra la interfase escayola/caucho. Los cristales de yeso rodean las partículas de caucho, creándose una unión mecánica estable sin reacciones químicas en la interfase. Se confirma que la cohesión entre ambos materiales es aceptable pero podría mejorarse con la adición de fibras de refuerzo tales como vidrio o polipropileno.

Fig 5.64.

Micrografía SEM serie C-30-2.5.

En las figuras 5.65. a y b, ambas correspondientes a la muestra C-30-4.0 se observan, a simple vista, diferencias en la naturaleza de los productos de hidratación, tanto en su tamaño como en su morfología.

En la figura 5.65. a que corresponde a la matriz de yeso los cristales formados son de mayor dimensión y tienen una estructura más esponjosa. Sin embargo en la figura 5.65. b, se observa que alrededor de las partículas de caucho se general cristales más pequeños y delgados en forma de aguja.

A partir de las microfotografías de la muestra C-30-4.0 se ha hecho una estimación de la talla de los cristales y de la dimensión de los poros en tres zonas diferentes mediante la individualización de su geometría.

(a) Zona 1: Escayola. x1000

(b) Zona 2: Interfase escayola-caucho. x1000

Fig 5.65.

Micrografías SFM serie C-30-4 0

(a) Zona 1

(b) Zona 2

(c) Zona 3

Figura 5.66. Individualización cristales y poros de las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

La zona 1 corresponde a la matriz de escayola, y las zonas 2 y 3 a la superficie de contacto caucho-escayola. En la zona 2 el caucho presenta una mayor rugosidad y en la zona 3 la interfase es más neta porque el caucho es más liso.

Una vez individualizados en las 3 zonas (fig. 5.66.), se ha obtenido para cada uno de los cristales su superficie y sus dimensiones en dos sentidos perpendiculares, siendo *a* la dimensión mayor y *b* la menor. El cociente entre *a* y *b* da como resultado un valor que denominaremos "coeficiente de forma", porque daría idea de la morfología de los cristales, de manera que los valores próximos a 1 indicarían una aproximación a formas cuadradas o circulares y cuanto mayor fuera este valor indicaría formas más alargadas.

Se han introducido en la tabla 5.29 los valores obtenidos de las superficies de cristales y poros y coeficientes de forma de los cristales individualizados *de las 3 zonas estudiadas* y a partir de ellos se han elaborado gráficas de distribución normal.

En la figura 5.67 se reflejan las gráficas de distribución normal de las superficies de cristales diferenciadas por zonas. La clara separación entre la correspondiente a la zona 1 y las de las zonas 2 y 3, indicaría la diferencia de talla de los cristales en la matriz de escayola en relación a los que se encuentran en contacto con el caucho. En la zona 1 la mayoría de los valores se encuentran entre las 40 y 90 μm^2 , y en las zonas 2 y 3 entre las 5 y 35 μm^2 y 10 y 40 μm^2 respectivamente. Es decir la talla de los cristales correspondientes a la matriz de escayola es superior en valores destacables a la de los cristales correspondientes a la interfase caucho-escayola, independientemente de la rugosidad del caucho.

En la figura 5.68. se representan las gráficas de distribución normal correspondiente a los denominados "coeficientes de forma". De nuevo la clara separación entre la correspondiente a la zona 1 y las de las zonas 2 y 3, indican la diferente morfología existente, con una mayor dispersión morfológica en las zonas 2 y 3. En la zona 1 el valor medio es de 1,57 y en las zonas 2 y 3 es de 7,3 y 8,67 respectivamente. Es decir la forma de los cristales que se forman en torno al caucho es más alargada.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

En la figura 5.69 se reflejan las gráficas de distribución normal de superficies de poros diferenciadas por zonas. Nuevamente se comprueba la gran diferencia entre las 3 zonas analizadas, que indican el menor tamaño de poro que aparece en torno al caucho, vinculado a la forma y tamaño de los cristales, independientemente de la rugosidad del caucho.

	ZONA 1					ZONA 2					ZONA 3				
	CRISTALES				POROS	CRISTALES				POROS	CRISTALES				POROS
	$S_{crist.}$ μm^2	a μm	b μm	a/b	$S_{por.}$ μm^2	$S_{crist.}$ μm^2	a μm	b μm	a/b	$S_{por.}$ μm^2	$S_{crist.}$ μm^2	a μm	b μm	a/b	$S_{por.}$ μm^2
1	38,8	9,3	6,7	1,39	39,4	1,8	3,98	0,41	9,82	10,6	28,7	17,65	2,51	7,04	0,0
2	54,5	11,6	12,3	0,94	60,2	62,3	24,99	3,98	6,28	11,7	12,4	13,78	1,47	9,35	4,9
3	40,7	12,0	6,6	1,81	28,0	3,7	6,23	1,62	3,84	37,8	24,0	21,01	1,70	12,39	5,0
4	91,0	15,4	10,5	1,47	51,6	60,8	24,07	3,61	6,66	9,4	21,5	21,30	1,51	14,10	5,4
5	62,5	15,2	9,5	1,60	49,0	30,0	19,13	2,06	9,27	18,2	22,0	11,57	2,76	4,19	6,0
6	39,7	7,6	7,3	1,05	127,5	7,9	10,02	1,40	7,16	21,5	25,3	7,00	5,34	1,31	7,6
7	56,0	14,8	7,0	2,10	35,9	13,7	12,27	1,25	9,79	33,5	18,7	17,25	1,55	11,14	7,9
8	58,3	14,0	8,0	1,75	32,3	4,5	6,49	0,85	7,65	26,2	25,0	15,04	2,03	7,42	9,0
9	71,7	12,8	11,7	1,09	14,1	3,1	7,15	0,37	19,4	23,2	34,2	21,74	1,99	10,93	12,1
10	77,4	13,8	7,7	1,79	40,6	8,1	7,81	1,22	6,42	8,3	57,2	23,66	3,10	7,64	14,8
11	93,7	13,0	13,0	1,00	15,8	43,3	21,34	3,17	6,73	10,2	22,3	16,07	2,17	7,39	16,0
12	55,7	14,5	6,3	2,31	20,4	11,8	9,73	1,55	6,29	15,9	18,5	12,05	0,44	27,25	17,1
13	25,4	6,7	6,3	1,07	20,9	20,2	16,44	1,73	9,49	7,1	24,0	13,01	1,88	6,92	17,8
14	68,3	9,8	9,7	1,01	7,7	21,3	14,45	1,55	9,33	3,4	16,6	11,50	2,10	5,47	18,1
15	67,4	13,0	8,1	1,60	14,0	31,5	15,04	3,39	4,43	12,2	7,6	7,04	1,73	4,06	25,7
16	108,4	22,9	9,3	2,46	63,3	9,4	8,70	1,58	5,49	9,0	18,3	14,52	1,33	10,94	26,6
17	86,2	20,5	7,4	2,75	272,6	8,0	8,66	1,33	6,53	20,2	21,9	15,52	1,73	8,96	31,4
18	161,9	21,2	10,2	2,08	21,5	11,8	9,84	1,62	6,07	23,9	37,8	16,55	3,32	4,99	35,2
19	41,8	10,7	8,9	1,20	54,5	6,1	7,89	1,36	5,78	10,6	25,1	13,08	2,25	5,82	37,5
20	92,0	17,4	11,6	1,50	59,1	9,6	9,99	1,66	6,02	29,9	19,8	10,87	2,40	4,54	48,5
21	71,8	11,5	11,4	1,00	23,8	26,3	15,66	2,43	6,44	6,7	63,6	26,09	2,58	10,11	50,9
22	36,8	10,4	6,6	1,57	12,5	9,6	8,29	1,66	5,00	11,1					
23	47,1	13,3	7,4	1,79	46,6	16,4	12,79	1,81	7,08	2,3					
24	37,8	11,1	6,2	1,79	18,5	41,2	18,43	3,43	5,38	20,9					
25	51,7	11,9	6,9	1,72	28,4					36,1					
26	40,6	8,8	9,1	0,97	46,6					29,7					

Tabla 5.29.

Valores de superficies de cristales y poros y coeficiente de forma de cristales individualizados de las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0.

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

Tabla 5.67.

Distribución normal de las superficies de cristales para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0

Tabla 5.68.

Distribución normal de los coeficientes de forma de los cristales para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0

En la tabla 5.30. se han incluido los valores medios de cada uno de los parámetros estudiados, incluyéndose a modo de ejemplo las formas individualizadas más próximas a estos valores medios en las tres zonas estudiadas.

Se ha comprobado así la diferencia existente tanto en la morfología como en la talla de los cristales que conducen a la formación de redes capilares diferentes.

La presencia de caucho lleva asociada una modificación de la forma y el tamaño de los cristales y por tanto de su red capilar como consecuencia de la apolaridad del caucho y su tendencia a atrapar aire en su superficie rugosa porque la escayola tendría una menor cantidad de agua para hidratarse produciendo este tipo de cristales de menor dimensión.

Otro aspecto a considerar en un estudio más profundo y pormenorizado, sería la influencia del soporte sobre el que se forman los cristales, en este caso el caucho, de formas heterogéneas, diferentes rugosidades, etc. que dan lugar a diferencias en la

Fig. 5.69.

Distribución normal de las superficies de poros para las 3 zonas estudiadas de la muestra C-30-4.0

CAPÍTULO 5: Resultados experimentales y análisis

formación de cristales, como se observa en las zonas 2 y 3.

Podemos concluir que se produce un fenómeno de superficie de manera que los cristales que se forman en torno al caucho son más pequeños y delgados, en forma de aguja, produciendo una reducción significativa de la ligazón intercrystalina y por tanto de la resistencia, y una red capilar de menor tamaño.

ZONAS C-30-4.0	ZONA1	ZONA 2	ZONA 3
SUP. CRISTALES VALOR MEDIO μm^2	64,5	19,3	25,9

COEF. DE FORMA CRISTALES VALOR MEDIO	1,57	7,3	8,67

SUP. POROS VALOR MEDIO μm^2	46,3	14,5	18,9

Tabla 5.30.

Valores medios de superficies y coeficientes de forma de cristales y de superficies de poros para las tres zonas estudiadas de la muestra C-40-0.6.

5.6.5 Expansión volumétrica por absorción de agua

La tabla 5.31 muestra los resultados de los valores de las dimensiones iniciales (L_{inicial}) en las tres direcciones ortogonales de las probetas ensayadas secas, el incremento de longitud (ΔL) después de haber transcurrido 8 horas desde el inicio del ensayo de absorción por capilaridad y la deformación correspondiente (ϵ).

Los porcentajes de deformación finales son similares tanto en la muestra de referencia como en la que incorpora un 30% de caucho en la granulometría más fina, aunque en esta última es algo menor. Sin embargo en esta granulometría conforme la adición de caucho es mayor las deformaciones son menores.

En las granulometrías media y gruesa los porcentajes de deformación finales son similares con valores inferiores a la muestra de referencia y a las series correspondientes al grano más fino. También disminuye su valor conforme la proporción de caucho se incrementa. Las series C-60-2.5 y C-50-4.0 no sufren casi deformación.

Aunque no se ha incluido en estas tablas se continuó con la medición en periodos de tiempo posteriores, coincidente con el ensayo de absorción con capilaridad. Merece reseñarse que en las muestras de grano fino y medio en las mediciones realizadas a partir de las 24 horas se producen pérdidas de material en las series con adiciones de caucho del 50% y 60%. En menor grado en la granulometría más fina, incrementándose este efecto para las adiciones del 60%. El deterioro de la matriz de escayola, con un menor espesor en estas series, destruye su efecto ligante con el caucho desprendiéndose este con facilidad especialmente en el grano más fino. Se llega así a valores en sus dimensiones incluso inferiores a los iniciales.

La menor deformación en las muestras que contienen caucho son atribuibles a la elasticidad del mismo que absorbe en parte esa deformación. El grano más fino muestra al tener una sección menor la menor capacidad para absorber esas deformaciones.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

		A				B				H			
		$L_{inicial}$ mm	L_{180} mm	ΔL mm	ε %	$L_{inicial}$ mm	L_{180} mm	ΔL mm	ε %	$L_{inicial}$ mm	L_{180} mm	ΔL mm	ε %
R	1	40,70	40,85	0,15	0,35	40,10	40,20	0,10	0,25	160,25	160,40	0,15	0,09
	2	40,80	40,90	0,10	0,25	40,05	40,20	0,15	0,37	160,30	160,50	0,20	0,13
	3	40,80	40,85	0,05	0,12	40,10	40,20	0,10	0,25	160,20	160,45	0,25	0,16
C-30-0.6	1	40,10	40,20	0,10	0,25	40,80	40,95	0,05	0,12	160,25	160,30	0,05	0,03
	2	40,00	40,00	0,00	0,00	41,00	41,20	0,20	0,48	160,40	160,45	0,05	0,03
	3	40,00	40,10	0,10	0,25	41,10	41,15	0,05	0,12	160,35	160,40	0,05	0,03
C-40-0.6	1	40,10	40,10	0,00	0,00	41,15	41,30	0,15	0,36	160,00	160,10	0,10	0,06
	2	39,95	40,05	0,10	0,25	41,00	41,15	0,15	0,36	160,00	160,00	0,00	0,00
	3	39,90	40,00	0,10	0,25	40,90	41,00	0,10	0,24	160,00	160,10	0,10	0,06
C-50-0.6	1	40,20	40,25	0,05	0,12	40,70	40,70	0,00	0,00	160,25	160,25	0,00	0,00
	2	40,30	40,35	0,05	0,12	40,95	40,95	0,00	0,00	160,45	160,45	0,00	0,00
	3	40,10	40,10	0,00	0,00	41,30	41,35	0,05	0,12	160,35	160,40	0,05	0,03
C-60-0.6	1	40,00	40,10	0,10	0,25	40,90	40,95	0,05	0,12	160,30	160,30	0,00	0,00
	2	40,10	40,20	0,10	0,25	40,95	41,10	0,15	0,37	160,25	160,25	0,00	0,00
	3	40,10	40,20	0,10	0,25	40,75	40,85	0,10	0,24	160,35	160,40	0,05	0,03
C-30-2.5	1	40,15	40,20	0,05	0,12	42,10	42,20	0,10	0,24	160,40	160,40	0,00	0,00
	2	40,40	40,45	0,05	0,12	42,15	42,25	0,10	0,24	160,45	160,50	0,05	0,03
	3	40,00	40,00	0,00	0,00	42,50	42,55	0,05	0,12	160,40	160,45	0,05	0,03
C-40-2.5	1	40,05	40,10	0,05	0,12	41,10	41,20	0,10	0,24	160,50	160,50	0,00	0,00
	2	40,20	40,20	0,00	0,00	41,40	41,50	0,10	0,24	160,45	160,50	0,05	0,03
	3	40,00	40,05	0,05	0,12	41,40	41,45	0,05	0,12	160,55	160,60	0,05	0,03
C-50-2.5	1	40,05	40,10	0,05	0,12	39,85	39,85	0,00	0,00	160,20	160,30	0,10	0,06
	2	40,00	40,00	0,00	0,00	39,90	40,00	0,10	0,25	160,15	160,30	0,15	0,09
	3	40,00	40,00	0,00	0,00	39,60	39,70	0,10	0,25	160,25	160,30	0,05	0,03
C-60-2.5	1	40,00	40,00	0,00	0,00	40,70	40,70	0,00	0,00	160,20	160,20	0,00	0,00
	2	40,00	40,00	0,00	0,00	40,00	40,10	0,10	0,25	160,40	160,40	0,00	0,00
	3	40,00	40,00	0,00	0,00	40,25	40,25	0,00	0,00	160,10	160,20	0,10	0,06
C-30-4.0	1	40,10	40,15	0,05	0,12	42,20	42,20	0,00	0,00	160,25	160,30	0,05	0,03
	2	40,00	40,05	0,05	0,12	41,80	41,85	0,05	0,12	160,20	160,30	0,10	0,06
	3	40,15	40,20	0,05	0,12	41,60	41,70	0,10	0,24	160,15	160,30	0,15	0,09
C-40-4.0	1	40,00	40,00	0,00	0,00	40,45	40,45	0,00	0,00	160,35	160,40	0,05	0,03
	2	40,10	40,15	0,05	0,12	40,55	40,55	0,00	0,00	160,30	160,35	0,05	0,03
	3	40,05	40,05	0,00	0,00	40,40	40,40	0,00	0,00	160,30	160,35	0,05	0,03
C-50-4.0	1	40,00	40,05	0,05	0,12	41,50	41,50	0,00	0,00	160,00	160,00	0,00	0,00
	2	40,00	40,00	0,00	0,00	41,90	41,95	0,05	0,12	160,00	160,00	0,00	0,00
	3	40,00	40,00	0,00	0,00	41,30	41,30	0,00	0,00	160,00	160,00	0,00	0,00

Tabla 5.31.

Expansión volumétrica por absorción de agua series de referencia y adiciones de caucho del 30%, 40%, 50% y hasta 60% en peso para todas las granulometrías. Los valores A y B se corresponden con las dimensiones de la sección transversal de las muestras (40 mm x 40 mm) y el valor H con la dimensión longitudinal o altura.

6. CONCLUSIONES

En este capítulo se incluye un primer apartado de conclusiones generales en el que se recogen las conclusiones parciales que se han ido obteniendo a lo largo de la tesis. Se pretende así comprender mejor la modificación en el comportamiento de los materiales compuestos con la incorporación de caucho en relación con los conglomerantes tradicionales. Estas conclusiones conducen a la necesidad de proponer nuevas líneas de investigación que den continuidad a la labor iniciada mediante el avance en el estudio de nuevos materiales con propiedades mejoradas y que contribuyan al reciclado de neumáticos fuera de uso.

Se quiere reseñar que aunque se comprobó en fases iniciales que algunas de las mezclas propuestas no cumplían los requisitos mecánicos exigidos por la normativa vigente, se continuó con su estudio, porque se pretendía explorar los mecanismos de funcionamiento que actúan al incorporar caucho NFU de diferentes granulometrías para extraer leyes de comportamiento que sirvan de base a investigaciones futuras.

En un segundo apartado se evalúa, a partir de los diferentes resultados obtenidos, la viabilidad de la incorporación de caucho a conglomerantes de escayola para obtener un nuevo material compuesto que mejore las propiedades térmicas y acústicas en relación a los conglomerantes tradicionales. El material obtenido presenta también beneficios medioambientales y económicos; porque se amplía la vida útil de un residuo tan problemático como los NFU, evitando su depósito en vertedero y porque se puede conseguir un ahorro energético si se utiliza como aislante térmico.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Para hacer esta evaluación se ha efectuado una recopilación de los resultados parciales que conducen a la selección de compuestos.

Una vez conocidas las propiedades del material y seleccionadas las mezclas más adecuadas se proponen aplicaciones constructivas para los compuestos desarrollados.

6.1 . CONCLUSIONES GENERALES

La incorporación de caucho nfu, su granulometría y dosificación son factores determinantes en el comportamiento de las mezclas. En mayor medida la dosificación que la granulometría.

Se resumen a continuación las conclusiones para cada una de las propiedades estudiadas.

Trabajabilidad y relación A/Y

- La incorporación de caucho dificulta ligeramente el amasado pero las mezclas obtenidas han sido muy homogéneas y con buena trabajabilidad para el grano fino y medio. En general se comprueba que cuanto mayor es la proporción de caucho y más grueso es el residuo, menor es la trabajabilidad del compuesto y la homogeneidad. Si no consideramos la serie C-50-4.0, podemos afirmar que no hay dispersión en los resultados. Por tanto es factible obtener compuestos trabajables con elevadas proporciones de caucho.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la relación A/Y se requiere mayor cantidad de agua al incrementarse el % de caucho como consecuencia de la tendencia del caucho a atrapar aire en su superficie rugosa debido a la naturaleza no polar del caucho. Este fenómeno se produce en mayor medida en el grano más fino, por tener una mayor superficie específica, es decir una mayor superficie de contacto con la matriz. El incremento de agua, alarga el tiempo de fraguado.

Densidad

- La reducción de la densidad es directamente proporcional al incremento en la proporción de caucho para todas las granulometrías. Esta reducción se debe a la

menor densidad del caucho y al incremento de la porosidad por su incorporación a las mezclas, que se produce en mayor medida en el grano más fino, por el mismo motivo que se incrementa la relación A/Y. Las densidades más bajas se obtienen para la granulometría más fina, que alcanza reducciones del 47% respecto a la serie de referencia.

- Es destacable que el rango de valores de densidad obtenidos en los compuestos estudiados permite incluirlos dentro de los denominados yesos aligerados.

Dureza Shore C

- La dureza Shore C disminuye de forma lineal conforme aumenta el % de caucho y en correspondencia con la proporción de agua (a mayor cantidad de agua, menor dureza). Los valores más altos se obtienen para el grano medio.

Resistencias mecánicas

- La adición de caucho produce una drástica disminución de la resistencia a flexión y en mayor medida la resistencia a compresión, llegando a valores muy bajos para adiciones del 50-60%, para todas las granulometrías, debido a varios motivos: la escasa adherencia que se produce entre el caucho y la matriz, la generación de microporos en la zona de transición interfacial y a que los propios granos de caucho actúan como poros que interfieren la estructura cristalina del yeso. La falta de adherencia y la progresiva generación de microporos se manifiesta en mayor grado en los granos más finos al aumentar la superficie de contacto entre el caucho y la matriz, repercutiendo en el mayor incremento en la pérdida de resistencia conforme incrementamos la proporción de caucho. Este efecto se muestra en el diferente desarrollo de las curvas en función de la granulometría.
- Las tendencias exponenciales de las curvas de flexión y compresión siguen una ley que se ajusta con buenos valores de R^2 y que permitiría, siempre que se mantenga la misma ley con un mayor número de muestras, predecir el comportamiento mecánico en función del porcentaje de caucho añadido.
- La forma de rotura de las muestras que contiene caucho indica una mejora en la tenacidad de los compuestos.

Comportamiento elástico

- La velocidad ultrasónica se reduce de forma progresiva y muy pronunciada a medida que aumenta la adición de caucho, para todas las granulometrías estudiadas, pero más para el triturado fino. Se producen tendencias similares en la medida del módulo de elasticidad estático. Se muestra así la gran diferencia en la rigidez de las series analizadas en relación a la de referencia y la incidencia que tiene el tamaño del grano en el comportamiento elástico del material.
- La incorporación de caucho, especialmente el de grano más grueso, da resultados poco uniformes en el módulo de elasticidad dinámico. Podemos entender que los granos de caucho actúan como discontinuidades del material, que dadas sus características elásticas atenúan y absorben parte de las ondas ultrasónicas. El compuesto dejaría así de ser isótropo y homogéneo, y teniendo en cuenta la sensibilidad del módulo de elasticidad ultrasónico a la existencia de discontinuidades, el procedimiento de medida no sería fiable.
- Del análisis de las curvas de tensión-deformación podemos concluir que en la rama elástica las características de comportamiento del material le vienen dadas por la matriz de escayola, suponiendo los granos de caucho defectos en la estructura del material que llevan a mermas de resistencia (como se demuestra por la disminución progresiva de la tensión máxima alcanzada a medida que aumenta la incorporación del caucho) y disminución de la rigidez. En cambio después de superar la resistencia última el caucho colabora con el hormigón produciendo una rotura paulatina y aumentando la capacidad de absorción de energía por deformación (tenacidad).
- En todas las series, para las mayores incorporaciones de caucho del 50 y 60 %, se obtienen valores de módulos de elasticidad inadmisibles para la mayoría de las aplicaciones.
- Se confirma que la adición de caucho disminuye la rigidez, modificándose su comportamiento vibratorio que favorece su utilización en determinadas aplicaciones que requieren un mejor comportamiento acústico o resistencia al impacto o a la fisuración y el agrietamiento. Es decir, la adición de caucho mejora la capacidad para disipar y absorber energía.

Aislamiento térmico

- La adición de polvo de caucho NFU mejora la capacidad de aislamiento térmico en todas las series realizadas. Para todas las granulometrías disminuye el valor de la conductividad térmica al incrementarse el % de caucho, obteniéndose los mejores resultados para el grano más fino.
- La reducción de la conductividad térmica es relevante y permite considerar al material candidato a aislante térmico, pues se alcanzan valores similares a los de otros productos denominados morteros aislantes térmicos implantados en el mercado.
- Teniendo en cuenta que la densidad de los materiales constructivos es un factor determinante en su capacidad térmica se ha propuesto un modelo teórico basado en la ley de mezclas en el que se ha considerado que el material consta de dos fases (caucho y escayola). A partir de la conductividad térmica y la fracción volumétrica de ambos materiales y considerando dos posibles comportamientos, en serie y en paralelo, se ha comprobado la validez del procedimiento empleado siempre que se considere el coeficiente de película, condicionado por la rugosidad del material (que depende de la granulometría). El modelo planteado permite predecir el comportamiento térmico de los compuestos.

Comportamiento acústico

- Mediante la comparación de los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo con los teóricos en función de la ley de masas se comprueban las características del caucho como material elástico absorbente de vibraciones y la importancia del tamaño de las partículas de caucho en la mejora del comportamiento acústico del material compuesto.
- Las placas de escayola-caucho mejoran en todos los casos la capacidad de aislamiento acústico frente a ruido de impacto.
- Aunque en valores absolutos el aislamiento acústico mejora al aumentar el espesor de la placa, los mejores resultados se obtienen para el menor espesor (2 cm). Este aspecto nos lleva a considerar la posible existencia de un espesor crítico por encima del cual no mejorarían los resultados.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

- Aunque el coeficiente de absorción mejora en todo el rango de frecuencia con la adición de caucho, los compuestos de escayola con caucho no demuestran tener unas buenas propiedades como material acústico absorbente, pues los valores de absorción acústica obtenidos son muy bajos. Aunque parece posible adaptar la curva de absorción, además de seleccionando el tamaño de partícula, eligiendo el tratamiento adecuado.

Absorción de agua y porosidad

- El incremento en la cantidad de caucho supone en todas las granulometrías un incremento progresivo del coeficiente de absorción de agua por inmersión, la porosidad abierta y el coeficiente de absorción de agua por capilaridad, siendo en el grano más fino en el que se obtienen los mayores valores para estos parámetros.
- De la relación entre la porosidad abierta y la relación A/Y utilizada se concluye que en todas las series se produce una porosidad abierta mayor que en la de referencia sin contenido en caucho. Por tanto podemos confirmar que la adición de caucho produce una mayor porosidad, más oclusión de aire en el interior de las muestras. Este valor es mayor para la granulometría más fina por su mayor superficie de contacto con la matriz. Por tanto podemos concluir que la porosidad no sólo depende de la relación A/Y empleada en la mezcla, sino que también contribuyen otros factores como las características, el tamaño y la proporción de la carga añadida.
- El mayor valor del coeficiente de absorción por capilaridad en la serie de referencia respecto a otras series con similares valores de porosidad abierta, confirman que el tamaño de los poros es mayor en la muestra patrón y que, por tanto, la introducción de caucho produce un menor tamaño de poro o una segunda porosidad, de menor tamaño que la correspondiente a la matriz de escayola.
- El tamaño y número de los megaporos está condicionado por la matriz de yeso y depende del contenido de yeso utilizado y su relación A/Y y la microporosidad añadida es consecuencia de la adición de caucho con diferentes características según el tamaño del mismo, siendo los tamaños de grano fino y medio con una mayor superficie específica los que dan como resultado una microporosidad mayor.

- Se produce un fenómeno de superficie de manera que los cristales que se forman en torno al caucho son más pequeños y delgados, en forma de aguja, produciendo una reducción significativa de la ligazón intercrystalina y por tanto de la resistencia, y una red capilar de menor tamaño.
- Es decir, la interacción entre el caucho y la escayola modifican no solo el volumen de poros, sino también la estructura porosa, su distribución y tamaño.
- Este incremento de la porosidad y la estructura porosa consecuencia de la incorporación de caucho son de gran trascendencia pues son determinantes en los siguientes resultados: la disminución de la densidad, la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad y la conductividad térmica y pueden afectar a la absorción acústica.

Las propiedades del caucho que han modificado los resultados de los compuestos, independientemente de su dosificación y granulometría son las siguientes:

- La baja densidad
 - Disminuye la densidad de los compuestos (hasta en un 47%).
 - Mejora el aislamiento térmico (hasta valores de $\lambda=0,14 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$).
- La baja resistencia.
 - Disminuye la resistencia mecánica tanto a flexión como a compresión, pues las partículas de caucho actúan como poros que interfieren en la estructura cristalina del yeso.
 - Los cristales que se forman en torno al caucho son más pequeños y delgados, en forma de aguja, produciendo una reducción significativa de la ligazón intercrystalina y por tanto de la resistencia.
 - Se llega a valores inadmisibles para los compuestos con contenidos de caucho del 50-60% en peso.
- La elasticidad.
 - Disminuye el módulo de elasticidad.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

- Aumenta la tenacidad, al aumentar la capacidad de absorber energía por deformación, evitando la rotura frágil y mejorando por tanto sus cualidades de resistencia al impacto o a la fisuración.
- Mejora el aislamiento a ruido aéreo por la capacidad de absorber y disipar energía elástica ante acciones dinámicas.
- Mejora el aislamiento a ruido de impacto.
- La apolaridad que produce un incremento de la porosidad, en concreto de la microporosidad que se genera en torno a los agregados, por la formación de cristales de menor tamaño y morfología más alargada que conducen a una modificación de la red capilar. Se da en mayor medida en los compuestos de menor granulometría por su mayor superficie específica y afecta a los siguientes resultados:
 - La densidad, pues la disminución en la misma se debería no sólo a la menor densidad del caucho, sino a que la incorporación de este produce un aumento en el volumen de poros.
 - Los resultados de resistencia mecánica, confirmándose la existencia de una relación inversa entre la porosidad y la resistencia. La estructura porosa y la interfase caucho-escayola son aspectos también determinantes en la modificación de la resistencia y en el desarrollo de las curvas.
 - El módulo de elasticidad, que disminuye de acuerdo con la fracción de volumen de poros y que también está condicionada por la estructura porosa y la interfase caucho escayola.
 - La durabilidad del material, pues aumenta la posibilidad de que los líquidos fluyan a través del compuesto.
 - El comportamiento térmico y acústico, mejorando el aumento de la porosidad la capacidad de aislamiento térmico y el coeficiente de absorción acústica. En ambos casos también influye la distribución y el tamaño de los poros.

6.2. SELECCIÓN DE COMPUESTOS

En la tabla 6.1. se ha hecho una recopilación de los valores más importantes obtenidos para todos los compuestos analizados, con el objetivo de tener una visión global que permita seleccionar los compuestos óptimos, que tengan el mejor conjunto de propiedades. Se han incluido los resultados de : relación A/Y, densidad, dureza Shore C, resistencia a flexión y a compresión, conductividad térmica, aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impacto, módulo de elasticidad estático y dinámico, coeficiente de absorción por inmersión y por capilaridad, porosidad abierta y deformación por absorción de agua.

Se han marcado en rojo aquellos valores que se considera inadmisibles por ser extremos o por no cumplir los mínimos exigidos por la normativa vigente. Se han marcado en verde aquellos que suponen una mejora respecto a la serie de referencia.

Se comprueba que las series C-30-0.6, C-40-0.6, C-30-2.5 y C-40-2.5 (las que incorporan proporciones de caucho del 30% y 40% para el grano fino y medio), tienen todos los valores dentro de los límites admisibles y mejoran en varios aspectos los resultados respecto a la serie de referencia. En concreto en densidad, conductividad térmica y aislamiento acústico y menor absorción por capilaridad.

La dureza superficial Shore C disminuye en relación a las muestras de referencia, pero en las series seleccionadas se mantiene por encima de los mínimos exigidos por las normas UNE 102-031 y UNE 102-032 para los yesos tradicionales y de terminación (45 ud). Es algo inferior al mínimo recomendado por la norma UNE 102-015 para los yesos de proyección mecánica.

La reducción de la densidad seca supone un aligeramiento del material y por lo tanto una mejora en sus prestaciones.

La resistencia a flexión de los compuestos seleccionados es inferior a la de referencia pero cumple las recomendaciones mínimas para yesos de construcción establecidas en la norma UNE EN 13279 de 1MPa, incluso con dosificaciones mayores de caucho se cumpliría.

El valor de la resistencia a compresión se sitúa muy por debajo del obtenido en la muestra de referencia que es muy superior al requerido en los usos habituales. Las

CAPÍTULO 6: Conclusiones

series seleccionadas superan los valores recomendados por la norma UNE EN 13279 de al menos 2 MPa para los yesos de construcción.

Además del cumplimiento de los valores mecánicos exigidos por la norma, hay que destacar otros aspectos relacionados con la mejora de la tenacidad, el aislamiento térmico y acústico, así como la menor absorción por capilaridad.

Se ha comprobado la mejora de la tenacidad, tanto por los resultados obtenidos en el módulo de elasticidad como por la simple inspección visual. Han disminuido la deformación por absorción de agua y los valores de absorción por capilaridad.

La conductividad térmica es menor en los compuestos seleccionados en valores entre el 21-26 % en el grano más fino y en un 19% en el grano medio.

En el aislamiento acústico a ruido aéreo se consiguen mejoras de hasta 3 dB aproximadamente y en el aislamiento acústico a ruido de impacto se obtienen reducciones de la presión acústica en torno a un 20% en el grano más fino y un 10% en el grano medio.

Así el compuesto queda caracterizado tanto física como mecánica, térmica y acústicamente. Y la viabilidad y oportunidad para su fabricación y comercialización queda demostrada.

6.3. APLICACIONES

Todas las asociadas al yeso, mejorando algunas de sus prestaciones.

La reducción de la densidad seca supone un aligeramiento del material y consecuentemente: una reducción de la carga que tienen que soportar las estructuras y facilita en el caso de uso en elementos prefabricados su transporte, reduciendo sus costes, e instalación, por su facilidad de manipulación en obra. Como se decía anteriormente los valores alcanzados permiten considerarlo mortero aligerado.

La mejora de la tenacidad y por tanto la capacidad de deformación permite una rotura dúctil que evita la fisuración y los desprendimientos en caso de rotura. La disminución en la deformación por absorción de agua evita los problemas de agrietamiento y fisuración por esta causa.

Se añade una cualidad muy importante: la capacidad de aislamiento térmico y acústico sin alterar el sistema constructivo utilizado. Se pueden fabricar placas de espesor variable, en función de las necesidades de aislamiento térmico y acústico. Estas pueden colocarse en la misma posición que cualquiera de los productos industrializados derivados del yeso y escayola. Los espesores requeridos también pueden conseguirse por aplicación manual o con máquina de proyectar.

Así se pueden utilizar como:

- Revestimiento interior de edificios: trasdosados o guarnecidos. Mortero de yeso con caucho nfu para aislamiento térmicos y acústicos mediante aplicación manual o con máquina de proyectar y aplicable también en placas de revestimiento.
- Elemento separador de estancias: en forma de placas de diferentes formatos, similares a los comercializados en la actualidad.
- Techos o falsos techos de placas industrializadas.
- Como mortero para recrecido de suelos con propiedades aislantes, especialmente a ruido de impacto y considerable reducción de peso en obra.

Todas estas aplicaciones son especialmente interesantes en trabajos de rehabilitación por la reducción de la carga añadida como consecuencia de la reducción de la densidad.

Entre las aplicaciones posibles se excluyen aquellas relacionadas con los yesos especiales como las que requieran un acabado superficial más fino, las que requieran un nivel de higroscopicidad elevado para exposición a ambientes húmedos o las de resistencia mejorada para funciones estructurales.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

series	A/Y	Densidad seca	Shore c	R _{FLEX}	R _{COMP}	λ	Ruido aéreo			Ruido de impacto			Módulo de elasticidad				Absorción por Inmersión	Porosidad por abierta	Absorción por capilaridad	ε _{max}		
							Aislamiento acústico bruto			Presión sonora R _{receptor}			e=3 cm		e=3 cm						estático	dinámico
							C. lisa	C. rug.	C. lisa	C. rug.	C. lisa	C. rug.	Mpa	Mpa	%	%						
R	0,58	1222,3	90,7	7,50	23,53	0,226	43,84	42,55	99,9	102,76	7825	6743	24,08	30,54	500,7	0,13						
C-30-0.6	0,53	1032,4	69,2	3,16	5,55	0,179	46,42	47,48	86,58	79,48	2724	2138	31,42	32,73	389,7	0,03						
C-40-0.6	0,60	901,6	51,0	2,05	2,74	0,166	44,95	43,06	80,32	81,05	1562	1760	40,20	36,52	523,7	0,04						
C-50-0.6	0,67	771,5	29,2	1,24	1,24	0,154	44,22	45,40	84,51	87,98	892	612	47,95	37,72	606,2	0,01						
C-60-0.6	0,77	653,9	13,9	0,78	0,55	0,141	41,79	43,70	85,78	82,72	382	236	59,38	41,07	740,3	0,01						
C-30-2.5	0,45	1140,2	78,5	3,00	5,07	0,184	44,97	46,31	90,60	92,50	3623	2523	23,03	26,57	237,5	0,02						
C-40-2.5	0,49	1021,5	60,4	2,14	2,74	0,183	45,76	44,91	86,39	90,63	2336	1552	28,63	29,56	371,2	0,02						
C-50-2.5	0,57	891,0	41,4	1,47	1,38	0,173	43,33	43,28	84,58	80,63	1127	1084	37,95	34,39	506,1	0,06						
C-60-2.5	0,69	758,2	25,0	1,04	0,87	0,152	41,49	44,98	90,08	88,00	557	323	46,56	37,90	643,3	0,02						
C-30-4.0	0,50	1076,9	78,7	2,57	4,24	0,201	40,86	44,14	92,72	90,15	3343	3529	26,16	28,53	351,9	0,05						
C-40-4.0	0,56	960,9	54,3	1,85	2,50	0,184	40,16	41,95	89,75	90,63	1846	2110	37,22	34,72	488,4	0,03						
C-50-4.0	0,57	893,4	52,3	1,50	1,56	0,177	41,25	42,06	81,43	84,18	1414	829	36,30	33,04	546,8	0,00						

Tabla 6.1.

Resultados de : relación A/Y, densidad, dureza Shore C, resistencia a flexión y a compresión, conductividad térmica, aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impacto, módulo de elasticidad estático y dinámico, coeficiente de absorción por inmersión y por capilaridad, porosidad abierta y deformación por absorción de agua, para los compuestos analizados.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Debido a la importante pérdida de resistencia que se ha producido en todos los compuestos, sería interesante estudiar la mejora en este aspecto mediante la incorporación de fibras y/o aditivos que eviten la microporosidad que se produce en torno a los agregados de caucho.
- Ampliar los estudios realizados en relación a los siguientes aspectos:
 - análisis de la interfase caucho-escayola y de la microporosidad añadida.
 - Ampliar el estudio acústico realizado a un rango de frecuencias que incluya el tipo de espectros típicos en Acústica de la Edificación.
 - Importancia del tamaño de las partículas de caucho y el espesor de las placas en el comportamiento acústico. Estudio del espesor crítico para cada frecuencia y tamaño de partícula.
 - rugosidad de la superficie para determinar la resistencia térmica en función de la granulometría,
 - resistencia al impacto de un cuerpo duro y fisuración
 - estudio del comportamiento frente al fuego, teniendo en cuenta el alto poder calorífico del caucho NFU y la generación de gases nocivos durante la combustión y obtención de la clasificación de

CAPÍTULO 7: Futuras líneas de investigación

reacción al fuego de los productos de construcción según RD 312/2005.

- Estudio comparativo, sobre la base de un proyecto de construcción o rehabilitación, de las mejoras que suponen la aplicación de los compuestos obtenidos en relación a los productos tradicionales, en aspectos relativos a disminución de la carga y mejora del comportamiento térmico y las consecuentes ventajas estructurales, constructivas, económicas y medioambientales.
- Dado que el yeso y sus mezclas combinadas es un material con grandes posibilidades para el nuevo campo de la fabricación aditiva, conocida como impresión 3D, y teniendo en cuenta la mejora en varias propiedades del yeso que incorpora caucho NFU (densidad, comportamiento térmico y acústico, etc.) procede el estudio de la posibilidad de obtener un nuevo material para su uso en este campo, mediante la incorporación de aditivos que permitan su deposición por capas.

8. BIBLIOGRAFIA

Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J. L., & Hernández, M. (2005). *"Influence of scrap rubber addition to portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing"*. Composite Structures, 71(3–4), 439-446.

ALIAPUR (2005). *"Utilisation des pneumatiques usages entiers ou broyés en bassin de rétention d'eaux pluviales"*.

Arroyo, M., Estaire, J. San Martín, I. & LloreT, A. (2008). *"Size effect on tire derived aggregate mechanical properties. Scrap Tire Derived Geomaterials - Opportunities and Challenges"*. IW-TDGM 2007, Yokosuka (Japón), Marzo 2007. Ed. Taylor & Francis. p. 151-160.

Arredondo y Verdú, F., (1976). *"El yeso"* (8th ed.). Madrid: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento : Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

Atahan, A. O., & Yücel, A. Ö. (2012). *"Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation"*. Construction and Building Materials, 36, 617-622.

Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). *"Fiber-reinforced cement composites"* Mac Graw-Hill.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Barriac, P., (noviembre 1973) *"Medida de la dureza de los yesos, en laboratorio y en obra"*. Ponencia en la XXII Sesión de la Comisión Científico-técnica de Eurogypsum. Stuttgart, 1973. Boletín Informativo del Yeso, num. 12. Madrid.

Bashar S. Mohammed, Khandaker M. Anwar Hossain, Jackson Ting Eng Swee, Grace Wong, M. Abdullahi, (2012). "Properties of crumb rubber hollow concrete block". *Journal of Cleaner Production*, 23 (1), 57-67.

Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A., & Quéneudec, M. (2003). *"Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates"*. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 711-720.

Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B., Quéneudec, M., (2007). "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling". *Construction and Building Materials*, 22, 573-579.

Blasco Laffón, B.; Blasco Laffón, E.; Fernández Valdés, J. M.; Losada González, J.C.; Viñas Arrebola, C.(2000); *"Fundamentos Físicos de la Edificación II"* Ed. DELTA publicaciones

Bustamante Montoro, R., Mayor Lobo, P., Rangel, C., & Hernandez Olivares, F. (2008) *"Propiedades térmica, acústica y mecánicas de placas de mortero caucho-cemento"* II Jornadas De Investigación En Construcción, 22-24/05/2008, Instituto De Ciencias De La Construcción Eduardo Torroja, Madrid,

Cano Serrano, E., Cerezo García, L., Urbina Fraile, M. (2007)*"Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. informe de vigilancia tecnológica"* CEIM Dirección General de Universidades e Investigación.

Cao, W. (2007). *"Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process"*. *Construction and Building Mat.*, vol. 21, p. 1011-1015

Caspar, J.P. y Et Al, (1996). *"Influencia de la microestructura del yeso fraguado sobre sus propiedades mecánicas"*, XXI Congreso de la Eurogypsum, 1996.

CEDEX. (2007). *"Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas"*. Madrid: Ministerio de Fomento.

CEDEX. (Diciembre 2013). *"Neumáticos fuera de uso (NFU)".* Ficha técnica. Madrid: Ministerio de Fomento.

Chung, J.Y. and Blaster, D.A. *"Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory."* J. Acoust. Soc. Am. 68 (3) (1980), pp. 907-913.

CIWMB (1998). *"Tire shreds as final cover foundation layer material at municipal solid waste landfills"*. Guidance Manual. California Integrated Waste Management Board. Sacramento, California.

CIWMB (1998). *"Tire shreds as gas collection material at municipal solid waste landfills"*. Guidance Manual. California Integrated Waste Management Board. Sacramento, California.

CIWMB (1998). *"Tire shreds as leachate drainage material at municipal solid waste landfills"*. Guidance Manual. California Integrated Waste Management Board. Sacramento, California.

Club Español de los Residuos. (20 de diciembre de 2000). *"Seminario sobre innovación en el aprovechamiento de neumáticos fuera de uso (NFU)"* Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid.

COLLOMB (1974) *"Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico"*. Boletín informativo del Yeso núm. 14. Madrid.

Del Río Merino, M., Dominguez, J. D., & Hernandez Olivares, F. (1998). *"Escayola aligerada con sólidos celulares"*. Informes De La Construcción, 50(468), 43-60.

Del Río Merino, M.; Hernández Olivares, F.; (1998). *"Nuevos Materiales compuestos de yeso-corcho"*. Arquimacom 98. Burdeos. Francia.

Del Río Merino, M. (1999). *"Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos"*. Tesis doctoral UPM.

Del Río Merino, M., & Hernandez Olivares, F. (2000). *"Escayola reforzada por acción sinérgica entre aditivos del hormigón (fluidificantes, superfluidificantes y aireantes-plastificantes) y fibras de vidrio E"*. Materiales De Construcción, 50(260), 27.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Del Río Merino, M., & Comino, P. (2001). *"Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola"*. *Materiales De Construcción*, 51(261), 33.

Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., & Hernandez Olivares, F. (2002). *"Nuevos elementos prefabricados de escayola aligerada para particiones y trasdosados"*. *Informes De La Construcción*, 53(477), 41.

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 Vol. 52*, nº 268; págs.. 33-42.

Del Río Merino, M.; González Cortina, M.; Rodríguez Orejón, A. y Otros. (2003). *"Revestimientos interiores con yesos"*. ATEDY.

Del Río Merino, M., Hernandez Olivares, F., & Comino, P. (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.

Del Río, M., & Hernandez Olivares, F. (2004). *"Escayola aligerada: Propuestas alternativas a la adición de sólidos celulares"*. *Materiales De Construcción*, 54(275), 65.

Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., & González Cortina, M. (2005). *"Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría y la adicción de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico"*. *Informes De La Construcción*, 57(497), 39.

Del Río Merino, M., González Cortina, M., Izquierdo Gracia, P., Santa Cruz Astorqui, J., & Salto Weis Azevedo, I. (2006) *"Los nuevos materiales de construcción como alternativa al reciclaje de los residuos industriales: Mortero de cemento-caucho reciclado (CCR)"*. In: I Jornada de Investigación en Edificación, junio 2006.

Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., González Cortina, M. (2007). *"Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar)"*, *Construction and Building Materials*, 21(8), 1785-1791

Diamant, R.M.E. (1967); *"Aislamiento térmico y acústico de los edificios"* Ed. Blume, Madrid.

Eldin, N. and Senouci, A. (1993). *"Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate."* J. Mater. Civ. Eng., 5(4), 478–496.

Fedroff, D., Ahmed S., Savas D.Z. (1996). *"Mechanical properties of concretewith ground waste tire rubber"*. Trans. Res. Rec., 1532, p. 66-72.

Flores Medina, D., Flores Medina, N. y Hernández-Olivares, F. (2013). *"Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes"*. Materials and Structure (MAAS), 47, p. 1185-1193.

Flores Medina, D. (2013). *"Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (nfus)"*. Tesis doctoral UPM.

Fort, R. (1996). *"El agua en los materiales pétreos: comportamiento hídrico"*. En: Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico (F. Mingarro. Ed.), Ed. Complutense, Madrid, 237-248.

García Santos, A. (1988). *"Modelo teórico del comportamiento mecánico del yeso y sus compuestos fibrosos poliméricos"*. Tesis doctoral UPM.

García Santos, A. (2004). *"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.

García Santos, A. (2009). *"Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido"*. Materiales De Construcción, 59(293), 105.

González Madariaga, F. J. (2005). *"Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción"*. Tesis doctoral UPC

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.

Gorisse F. (1978) *"Essais et contrôle des bétons"*, Eyrolles.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

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, 28(2012), 653-658.

Gutiérrez González, S.; Gadea, J.; Rodríguez, A; Blanco-Varela, M.T.; Calderón, V. (2012). *"Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties"*. Construction and Building Materials, 34(2012), 179-185.

Haselein, C. R. (2002). *"Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante"*. Ciência Florestal, 12(1),81-87.

Hernandez Olivares, F. PhD f.hernandez@upm.es Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica. EUATM (UPM) Comunicación privada (2011).

Hernandez Olivares, F., Bollati M.R., Del Rio Merino, M., & Parga-Landa, B. (1999). *"Development of cork-gypsum composites for building applications"*. Construction Building Materials, 13(4), 179-186.

Hernandez Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., & Witoszek, B. (2002). *"Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete"*. Cement and Concrete Research, 32(10), 1587-1596.

Hernandez Olivares, F., & Barluenga, G. (2004). *"Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete"*. Cement and Concrete Research, 34(1), 109-117.

Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Parga-Landa, B., Bollati, M., Witoszek, B. (2007). *"Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements"*. Construction and Building Materials, 21(10), 1918-1927.

Jeandot, G. y Murat, M., (1971). *"Morphologie des produits d'hydratation des sulfates de calcium es des plâtres industriels"*. Reveuev des matériaux de construction, Vol. 674-675, pp. 313-317.

Jeulin, D., Monnaie, P. y Péronnet, F., (2001). *"Gypsum morphological analysis and modeling"*. Cement and Concrete Composites, Vol. 23, pp. 299-311.

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, pp. 146-152.

Khaloo, A. R., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). *"Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles"*. Waste Management, 28(12), 2472-2482.

Khatib Z.K., Bayomy F.M., (1999). *"Rubberized Portland cement concrete"*. Journal of materials in civil engineering. Vol 11, 3, pp. 206-213.

Lasheras, F., (1989). *"Modelo teórico de comportamiento mecánico del yeso"*. Tesis Doctoral UPM.

Lee, J.H., Salgado, R. Bernal, A & Lovell, C.W. (1999). *"The use of recycled tire chips to minimize dynamic Earth pressure during compaction of backfill"*. Construction and Building Materials, vol. 21, p. 1016-1026.

Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., & Huang, B. (2004). *"Development of waste tire modified concrete"*. Cement and Concrete Research, 34(12), 2283-2289.

López, F.A., Centeno, T.A. & Alguacil, F.J. (2012). *"Aprovechamiento energético de residuos: el caso de los NFU"*. www.energia2012.es

López, F.A., Centeno, T.A., Alguacil, F.J. & Lobato, B. (2013). *"The GRAUTHERMIC-Tyres process for the recycling of granulated scrap tyres"*. Journal of Analytical and Applied Pirólisis, vol 103, p. 207-215.

Maganto Suarez, F. J. *"Fundamentos físicos. Transmisión de calor"*. Apuntes EUATM.

Mayor Lobo, P., Bustamante Montoro, R., Rangel, C., Hernandez Olivares, F. (2008) *"Propiedades térmicas, acústica y mecánicas de placas de morteros de yeso-caucho"*. II Jornadas De Investigación En Construcción, 22-24/05/2008, Instituto De Ciencias De La Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

Melián, G., Barluenga, G., & Hernandez Olivares, F. (2010). *"Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno"*. Materiales De Construcción, 60(300), 83.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Meshgin, P., Xi, Y., & Li, Y. (2012). *"Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar"*. Construction and Building Materials, 28(1), 713-721.

Mottana, A., Crespi, R. y Liborio, G., (1991). *"Guía de minerales y rocas"*. Barcelona: Grijalbo.

Murat, M., Pusztaszeri, L. y Gremion, M., (1974). *"Correlations «texture cristalline-propriétés mécaniques» des plâtres durcis. Étude préliminaire"*. Matériaux et Contructions, Vol. 8(47), pp. 377-385.

Murat y Focult. "Actas del colóquio de RILEM sobre yeso. RIELEMCOMMISSION 23" GP. Saint Remy les Chevreuse. (1976). Citado por Villanueva 2001, en Manual del yeso.

Oliver Ramírez, Alicia (2009) *"Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios"*. Tesis doctoral UPM.

Oteiza San José, 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.

Oteiza San José, I. (1993). *"Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste"*. Tesis doctoral UPM.

Pfretzschner, J., & M^a. Rodriguez, R. (1999). *"Acoustic properties of rubber crumbs"*. Polymer Testing, 18(2), 81-92.

Raghavan, D., Huynh, H., & Ferraris, C. F. (1998). *"Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite"*. Journal of Materials Science, 33(7), 1745.

Rodriguez, R., Cano, H. & Estaire, J (2010). *"Geotechnical and Environmental Properties of Tire-used Shreds for Use in Civil Construction"*. 6th International Congress on Env. Geotechnics. New Delhi (India), Nov. 2010. p. 986-991.

Rodríguez, R., Cano, H. & Estaire, J (2011). *"Terraplén experimental construido con neumáticos troceados"*. Jornada Técnica sobre Experiencias recientes en estructuras de Tierra para Infraestructuras Viarias. Madrid, febrero 2011.

Rodríguez, R., Cano, H. & Estaire, J (2012). Ficha de Actuación N°11 *"Terraplenes ejecutados con NFU sobre suelos blandos"*. Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con neumáticos fuera de uso troceados. Informe Final. Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

Rodríguez Montejano, R. M., (2003). *"Propiedades acústicas del caucho granular"*. Tesis Doctoral UPM.

Rodríguez Orejón, A., Río Merino, M. d., & Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. (2010). *"Adición de residuos de yeso laminado tratado en el yeso de construcción"*. A. Rodríguez).

Rodríguez Orejón, A., Del Río-Merino, M. , Fernández-Martínez, F. (2014). *"Characterization mixtures of thick gypsum with addition of treated waste from laminated plasterboards"*. Materiales de Construcción 64(314).

Rosa, D. (2006). *"Estudio de la incidencia del caucho reciclado de neumáticos sobre el medio ambiente y la salud humana"*. Instituto de Biomecánica de Valencia.

Sanz Arauz, D., (2009). *"Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas"*. Tesis Doctoral UPM

Segre, N., & Joeques, I. (2000). *"Use of tire rubber particles as addition to cement paste"*. Cement and Concrete Research, 30(9), 1421-1425.

Serna, A., Del Rio M., Palomo, G., González, M. (2012). *"Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres"*. Construction and Building Materials, 35, 633-641.

Siddique, R. (2004). *"Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview"*. Waste Management, 24(6), 563.

Sukontasukkul, P. (2009). *"Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel"*. Construction and Building Materials, 23(2), 1084-1092.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Topçu, I. B., & Avcular, N. (1997). "Analysis of rubberized concrete as a composite material". *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1135-1139.

Topçu, I.B., Bilir, T., (2009). "*Experimental Investigation of Some Fresh and Hardened Properties of Rubberized Self Compacting Concrete*". *Materials & Design*, Vol. 30, Issue 8, pp. 3056-3065.

Topçu, I.B., Bilir, T., (2009). "*Analysis of Rubberized Concrete as a Three Phase Composite Material*". *Journal of Composite Materials*, V. 43, Issue 11, pp. 1251-1263.

Toutanji, H. A. (1996). "*The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates*". *Cement and Concrete Composites*, 18(2), 135-139.

Tung-Chai Ling, (2012). "Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks". *Construction and Building Materials*, 28(1) 164-175.

Turgut, P., & Yeşilata, B. (2009). "*Investigation of thermo-mechanical behaviors of scrap rubber added mortar plate and bricks. [Atık lastik katkili harç plak ve briketlerin termo-mekanik davranışlarının araştırılması]*" *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24(4), 651-658.

Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.-L. (2005) "Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres" *Building and Environment*, 40 (2), 221-226.

Turki, M., Bretagne, E., Rouis, M. J., & Quéneudec, M. (2009). "*Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures*". *Construction and Building Materials*, 23(7), 2715-2722.

Uygunoğlu, T., & Topçu, I. B. (2010). "*The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars*". *Construction and Building Materials*, 24(7), 1141-1150.

Villanueva Dominguez, Luis de (1975) "*Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción*", Separata del boletín informativo yeso nº-19. Ministerio de la vivienda. INCE.con la colaboración de ATEDY y de S.E. Eurogysum. Madrid

Villanueva Dominguez, Luis de; García Santos, Alfonso; (2001) *"Manual del yeso"*, Asociación técnica y empresarial del yeso(ATEDY) Dossat, Madrid

NORMATIVA

Asociación Española de Normalización y Certificación (1984) *"UNE 102-032: Yesos y escayolas de construcción, métodos de análisis químico"*. Marzo. Madrid. Aenor

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1985). *"UNE 102039:1985. Yesos y escayolas de construcción. Determinación de la dureza Shore C, y de la dureza Brinell"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1986). *"UNE 102-001-86 aljez o piedra de yeso: Clasificación características"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1986). *"UNE 102-011-86 escayolas para la construcción. Especificaciones."* Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1990). *"Aislamiento térmico: Transmisión de calor : Definiciones, simbología y unidades : UNE 92-001-90, parte 1, erratum"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1995). *"UNE-EN ISO 10140-3:1995. acústica. medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1998). *"UNE-EN ISO 11654:1998. acústica. absorbentes acústicos para su utilización en edificios. evaluación de la absorción acústica"*. (ISO 11654:1997) Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1998) *"UNE-EN ISO 11654:1998. Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica"*. Madrid: Aenor.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1999) *"UNE 102-032: Yesos y escayolas de construcción, métodos de análisis químico"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (1999). *"UNE EN 1925:1999: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad"* Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2006). *"UNE EN 13279-1: yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. parte 1, definiciones y especificaciones"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2006). *"UNE EN 13279-2 yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. parte 2, métodos de ensayo"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2006). *"UNE EN 12504-4 2006: Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007) *"UNE EN 1936 2007: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2010). *"UNE-EN ISO 10140-2: 2010. Acústica. medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2010). *"UNE-EN ISO 10140-3: 2010. Acústica. medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos"*. Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2010). *"UNE-EN ISO 10140-2: 2010. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo"*, Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2010). *"UNE-EN ISO 10140-3: 2010. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos"*. Madrid. Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2013) *"UNE EN 14617-1 2013: Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua"*. Madrid. Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación. *"UNE 7-064. : Ensayos físicos de yesos y escayolas empleados en la construcción"*. Madrid: Aenor.

Código técnico de la edificación: Ley 38-1999, de 5 de noviembre, de ordenación de la edificación, real decreto 314-2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el código técnico de la edificación, real decreto 1371-2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el *documento básico DB-HR protección frente al ruido y se modifica el CTE* (4a ed.). (2009). Madrid: Tecnos.

Código técnico de la edificación. Documento básico DB-HR Protección frente al ruido: Vías de transmisión del sonido. *Anejo 01 de la "Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al Ruido"* elaborada por el Instituto Eduardo Torroja .IETcc-CSIC. Unidad de calidad en la construcción.

Ministerio de Fomento. España (2004). *"Condiciones acústicas en los edificios : CA-88"* : [norma básica de la edificación] (2a rev, 5a reimp ed.). Madrid: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones.

Ministerio de la Presidencia. España (2002). NORMA BÁSICA NBE-CT 79 *"Condiciones térmicas de los edificios: CT-79"* (15 reimp, febrero 2002 ed.). Real Decreto 2429/1979, de 6 de Julio, de la Presidencia de Gobierno (BOE. de octubre de 1979). Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, & Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. España (1982). *"Norma básica de la edificación NBE-CA-81 sobre condiciones acústicas de los edificios"*. Madrid: Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.

Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, *relativa al vertido de residuos* (DOCE núm. L 182, de 16 de julio de 1999)

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Directiva del Consejo 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, *relativa a los residuos* (con las modificaciones de la Directiva del Consejo 91/156/CEE, de 18 de marzo de 1991) (DOCE núm. L 194, de 27 de julio de 1975, y núm. L 78, de 26 de marzo de 1991)

Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre de 2000, *relativa a los vehículos al final de su vida útil* DOUE 269/L, de 21-10-00

Directiva 2008/98/CE, de 19 de diciembre de 2008, sobre residuos «DOUE» núm. 312, de 22 de noviembre de 2008

Ley 10/1998, de 21 de abril, de **Residuos** (BOE núm. 96, de 26 de abril de 1998)

Ley 22/2011, de 28 de julio, de **Residuos y Suelos Contaminados** (BOE núm. 181, de 29 de julio de 2011)

Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de **medidas urgentes en materia de medio ambiente** (BOE núm. 305, de 20 de diciembre de 2012)

PLAN NACIONAL DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO 2001-2006. Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006 (BOE nº 260, de 30.10.01).

PLAN NACIONAL INTEGRADO DE RESIDUOS PARA EL PERIODO 2008-15. RESOLUCIÓN de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el *Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015* (BOE núm. 49, jueves 26 de febrero de 2009).

Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre *gestión de neumáticos fuera de uso* (BOE nº 2, de 03/01/06)

PAGINAS WEB CONSULTADAS

www.atedy.es Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY)

www.eurogypsum.org The European manufacturers of gypsum products (Eurogypsum)

www.etra-en.org The European tyre Recycling Association.

www.etrma.org Annual Report 2013-14. Informe de la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Producto de Caucho ETRMA (EUROPEAN TYRE & RUBBER manufactures association)

www.recuperación.org Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje

www.renecal.com

www.signusecovalor.com. Sociedad Signus Ecovalor

www.tnu.es Tratamiento de neumáticos usados (TNU). Memoria 2013

www.waste.ideal.es.

www.etrma.org "Anual report 2013-14". EUROPEAN TYRE & RUBBER manufactures association. (Informe de la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Producto de Caucho ETRMA)

RENDIMIENTO CIENTÍFICO

Artículo publicado en la revista "Materials and Design"

S. Herrero, P. Mayor, F. Hernández-Olivares. (2013). *"Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars"*. Materials and Design 47(2013), 633-642.