



Universidad de Burgos

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS E INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

TESIS DOCTORAL

**Yesos aligerados fabricados a
partir de residuos de espumas de
poliuretano y polvo de poliamida**

Burgos, Julio 2012

AUTOR: Sara Gutiérrez González

DIRECTOR: Dra. Verónica Calderón Carpintero

CODIRECTOR: Dr. Jesús Gadea Sáinz



Dña. Verónica Calderón Carpintero, Profesora Titular Doctora y **D. Jesús Gadea Sáinz**, Catedrático Doctor de Escuela Universitaria, del Área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos,

INFORMAN DE:

Que la presente Memoria titulada **“Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida”** se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por la Ingeniera y Arquitecta Técnica Dña. Sara Gutiérrez González y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 3 de Julio de 2012

Fdo.: Dra. Verónica Calderón Carpintero

Fdo.: Jesús Gadea Sáinz

A Javier y a nuestro pequeño

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en el desarrollo de este trabajo, tanto desde el plano científico-técnico como desde el humano.

A mi compañera y directora de Tesis, la Dra. Verónica Calderón Carpintero, por su inestimable ayuda en el desarrollo científico de este trabajo, aportando su gran experiencia profesional y su apoyo personal. Por enseñarme que la investigación es el resultado de un trabajo en equipo, donde la generosidad siempre suma. Por sus consejos y por su confianza en mí. Sin duda, ha sabido ser una gran compañera y amiga. Sin ella, este trabajo y los logros que hemos conseguido, no hubieran sido posibles.

Al Dr. Jesús Gadea Sáinz, compañero y codirector de esta Tesis, por su apoyo y colaboración. Por las oportunidades brindadas y por haberme demostrado que siempre puedo contar con él.

A mi profesor y compañero Ángel Rodríguez Sáiz, por su gran capacidad de motivar y sobre todo, por su apoyo a nivel profesional y personal, desde mi época de estudiante universitaria. Por haber accedido con gran interés a revisar este trabajo, mejorándolo con sus aportaciones y sugerencias.

A mi compañero Carlos Junco Petrement, por sus buenos consejos y apoyo constante desde mi comienzo como profesora en la Escuela. Siempre amable y objetivo.

A mis demás compañeros de Materiales de Construcción, Ignacio Adán Ortega y Aitor Martín de la Fuente, por su ayuda, ánimos y el interés mostrado por este trabajo.

A mis compañeros del laboratorio de Materiales de Construcción, muy especialmente a José Luis Díez Campo y a Pablo Luis Campos de la Fuente, por su colaboración y ayuda en el proceso experimental, y por su buen hacer profesional. Buenos compañeros con los que siempre he podido contar.

A Lourdes, Sara y Yésica, por su colaboración en la realización de parte de los ensayos de este trabajo. Por su carácter metódico y por los buenos momentos que hemos pasado juntas en el laboratorio.

También quiero manifestar mi agradecimiento al personal investigador del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento (IETcc), muy especialmente a M^a Teresa Blanco Varela, por haberme brindado la oportunidad de realizar una estancia de investigación en el Departamento de Cementos y Reciclado de Materiales. Allí conocí a grandes investigadores y sobretodo, personas de gran calidad humana. Quiero hacer una especial mención a Mar Alonso, por su ayuda, apoyo y paciencia durante mi aprendizaje de la técnica de la reología. A Moisés Frías, por enseñarme el manejo de la técnica de granulometría láser, a José María Chillón, por los ensayos de conductividad térmica. A Patricia y Celia, por los ensayos de espectroscopía de rayos X, a Paula por su interpretación y apoyo, sin duda una gran compañera. A Cristina, por facilitarme los análisis del agua del IETcc. A Javi, por haberme transmitido sus conocimientos de las técnicas de cálculo de porosidades, a Gloria y a Maite, por su amistad, y al resto del personal investigación y de administración, por toda la ayuda y soporte prestado durante mi estancia.

A las empresas Grupo Antolín, Praxsa, Sika y Yesos Albi, por el suministro de materiales necesarios para la realización de los ensayos de este trabajo de investigación.

Agradezco también a mis alumnos de Materiales el interés que muestran por mi trabajo.

A mis padres, que me han dado todo. Por su continuo apoyo y comprensión. Por haber confiado en mí, permitiéndome siempre elegir el camino. Sois para mí el mejor modelo que he podido tener para ser feliz. Os quiero.

A mis hermanos, muy especialmente a mi hermano Alex, por su carácter ejemplar. Gracias, has sido mi motor y mi referente a la hora de afrontar cada momento difícil en este periodo.

A mi marido Javier, por su confianza y amor. Por haberme ayudado a superar las dificultades. Gracias por estar siempre ahí. Te quiero.

Y a nuestro hijo, que pronto estará junto a nosotros. Gracias por haberme hecho estos últimos seis meses tan feliz.

Resumen

En esta Tesis Doctoral se presentan los resultados de un estudio experimental referente a la reutilización de residuos de espumas de poliuretano y poliamida en polvo que, mezclados con el yeso, proporcionan nuevos compuestos con propiedades de materiales aligerados.

El residuo de espuma de poliuretano es un subproducto de la industria de la construcción y del automóvil que actualmente se deposita en vertederos, sin uso definido, con el consiguiente impacto ambiental. **El residuo de poliamida en polvo** procede de la materia prima de la industria del sinterizado láser (LS), empleada para la fabricación de piezas funcionales.

Buscar usos alternativos al almacenamiento masivo de este tipo de polímeros, es un reto que los investigadores deben explorar para conseguir productos reciclados funcionales, útiles, durables en el tiempo y respetuosos con el entorno en el que se disponen. Al mismo tiempo, y aunque la revalorización de residuos en sí misma ya es un parámetro que justifica este Trabajo, conseguir que estos productos puedan competir económicamente con los tradicionales, resulta un argumento muy interesante para defender políticas de aprovechamiento y reutilización de los residuos poliméricos.

En el trabajo que recoge esta Tesis Doctoral, desarrollado dentro del marco de un proyecto del Ministerio de Economía y Competitividad dentro de un proyecto del CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico

Industrial, proyecto YESA. MQM-20110220), se planteó como objetivo principal “Estudiar el comportamiento de los yesos aligerados con residuos poliméricos”, proponiendo la reutilización de espumas de poliuretano y polvo de poliamida como agregados de baja densidad para la fabricación de yesos aligerados.

En el presente Trabajo de Investigación se ha utilizado un yeso para la construcción de referencia tipo B1, dos residuos de espuma de poliuretano de diferente procedencia y distinta estructura y finura; un residuo de poliamida en polvo, dos aditivos (basados en policarboxilatos y en melaminas) y tres tipos de fibras de refuerzo (fibras de polipropileno de diferente geometría, y fibras de celulosa reciclada).

Experimentalmente se han preparado mezclas de yeso con diferentes proporciones de sustitución en volumen por polímero. Las características de las mezclas resultantes se han definido y ensayado fijando la consistencia adecuada a una buena trabajabilidad, estudiándose, entre otras propiedades, las resistencias mecánicas a 7 y a 28 días, la dureza superficial Shore C, la adherencia sobre materiales cerámicos, la permeabilidad al vapor de agua, la porosidad y la absorción por capilaridad.

Asimismo, se ha tenido en cuenta que la inclusión de polímeros en las muestras conlleva un incremento de la porosidad y por lo tanto del aire ocluido en los materiales, lo que ha supuesto una mejora en el aislamiento térmico, medido en términos de conductividad térmica. Por otro lado, y debido a la posibilidad de combustión de los polímeros, se ha estimado el comportamiento de los materiales frente al calor mediante termogravimetría.

Se ha estudiado el comportamiento reológico de las distintas dosificaciones y composiciones con el fin de conocer su trabajabilidad en el momento de su puesta en obra.

Las mezclas obtenidas mediante la caracterización física-mecánica, han sido evaluadas de acuerdo con la normativa vigente de aplicación a los diversos productos derivados del yeso para, posteriormente, ser mejoradas mediante la incorporación de aditivos y fibras de refuerzo.

Se ha elaborado un estudio económico comparativo entre los yesos obtenidos con residuos poliméricos y un yeso convencional aligerado, estableciendo las ventajas competitivas que se obtienen con la utilización de los desechos poliméricos empleados.

Por último, se han referido las conclusiones finales de la Tesis Doctoral y se han reflejado algunas propuestas para posibles trabajos futuros.

Abstract

This Doctoral Thesis presents the results of a pilot study on the reuse of polyurethane foam waste and polyamide powder waste mixed with plaster, which provides new compounds with lightweight material properties.

Polyurethane foam waste is a by-product of the construction and automobile industries, with no definite use up until the present. Nowadays, it is dumped at landfill sites, with inevitable environmental consequences. **Polyamide powder is a waste product** from raw materials used in the laser sintering industry (LS) for the manufacture of functional parts.

The search for alternatives to the mass dumping of these types of polymers is a challenge that researchers should explore, to obtain functional, useful, recycled products that are durable over time and in harmony with their surrounding environment. Likewise, even though waste revaluation in itself is a parameter that already justifies this work, a very interesting argument to defend policies on the exploitation and reuse of polymeric waste would be to show that these products can compete economically with traditional ones.

The work of this Doctoral Thesis was developed within the framework of a Ministry of Economy and Competitiveness project, itself within a project of the CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, project YESA. MQM-20110220). Its principal objective was the “Study of the behaviour of lightweight plasters with polyamide powder waste”,

proposing the reuse of polyurethane foams and polyamide powder as low-density aggregates for the manufacture of lightweight plasters.

The materials used in this present research work are as follows: a reference type B1-type plaster for construction work; two polyurethane powder wastes from different sources and of different structures and fineness; two additives (based on polycarboxylates and on melamines); and, three types of reinforcement fibers (polypropylene fibers of different sizes, and recycled cellulose fibers).

Experimental mixtures of plaster were prepared with substitutions by volume of different proportions of polymer powder waste. The characteristics of the resulting mixtures were defined and tested, setting acceptable consistency at good workability, and studying, among other properties, mechanical resistance at 7 and at 28 days, Shore C surface hardness, adhesion to ceramic materials, permeability to water vapor, porosity, and absorption by capillarity.

It has also been taken into account that the inclusion of polymers in the samples entails an increase in porosity and therefore in occluded air within the material, which brings with it improvements in thermal insulation, measured in terms of thermal conductivity. Moreover, due to the possibility of combustion of the polymers, the reaction of the materials to heat has been studied with thermogravimetry.

The rheological behavior of the different dosages and compositions has been examined to establish its workability when applied on site.

Physical-mechanical characterization of the mixtures allowed their evaluation in accordance with current standards applicable to various

plaster-related products for subsequent improvement through the incorporation of additives and reinforcement fibers.

A comparative economic study has been prepared on plasters obtained with polymeric waste and conventional lightweight plasters, establishing the competitive advantages obtained from the use of polymeric wastes.

Lastly, the final conclusions of the Doctoral Thesis are presented together with some proposals for possible future lines of work.

Nomenclaturas

Química del yeso:

CaSO_4 = Sulfato cálcico = Anhidrita = An

$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{1/2}$ = Sulfato cálcico hemihidratado = Semihidrato o hemihidrato = SM

$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ = Sulfato cálcico dihidratado = Dihidrato = DH

Aditivos:

PC = Aditivos basados en policarboxilatos

PMS = Aditivos basados en melaminas

Técnicas y procedimientos experimentales:

DRX = Difracción de rayos X

FTIR = Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

TGA = Análisis termogravimétrico

SEM = Microscopía electrónica de barrido

EDX = Análisis por energías dispersas

TAC = Tomografía axial computarizada

CHNS = Analizador elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre

MIP = Porosimetría de intrusión de mercurio

Materias primas:

a = Agua

Y = Yeso de referencia

EPS = Poliestireno expandido

PET = Politereftalato de etilo

EVA = Copolímero polietilvinilacetato

PP = Polipropileno

PU = Poliuretano

PA = Poliamida

PUF = Espuma flexible de poliuretano

PUR = Espuma rígida de poliuretano

PUG = Residuo de espuma de poliuretano gris

PUW = Residuo de espuma de poliuretano blanca

PAW = Residuo de espuma de poliamida en polvo

M = Aditivo Sikamix 3300

V = Aditivo Viscocrete G2

L = Sika Latex

F1 = Fibras de polipropileno Sikacim

F2 = Fibras de polipropileno Fibermesh

PC = Fibras de celulosa reciclada

Dosificaciones en volumen:

Y0,5PW = 1 parte de yeso y 0,5 de poliuretano blanco

Y1PW = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano blanco

Y2PW = 1 parte de yeso y 2 de poliuretano blanco

Y3PW = 1 parte de yeso y 3 de poliuretano blanco

Y4PW = 1 parte de yeso y 4 de poliuretano blanco

Y0,5PG = 1 parte de yeso y 0,5 de poliuretano gris

Y1PG = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano gris

Y2PG = 1 parte de yeso y 2 de poliuretano gris

Y3PG = 1 parte de yeso y 3 de poliuretano gris

Y4PG = 1 parte de yeso y 4 de poliuretano gris

Y0,5PA = 1 parte de yeso y 0,5 de poliamida

Y1PA = 1 parte de yeso y 1 de poliamida

Y2PA = 1 parte de yeso y 2 de poliamida

Y3PA = 1 parte de yeso y 3 de poliamida

Y4PA = 1 parte de yeso y 4 de poliamida

Otras mezclas:

Y1PW_{M0,8%} = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano blanco, en volumen + 0,8% de aditivo Sikamix sobre el peso del yeso

Y1PG_{M0,8%} = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano gris, en volumen + 0,8% de aditivo Sikamix sobre el peso del yeso

$Y1PA_{V0,8\%}$ = 1 parte de yeso y 1 de poliamida, en volumen + 0,8% de aditivo Viscocrete sobre el peso del yeso

$Y1PW_{M0,8\%F1.1\%}$ = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano blanco, en volumen + 0,8% de aditivo Sikamix sobre el peso del yeso + 1% de fibra de polipropileno Sikacim sobre el peso del yeso

$Y1PG_{M0,8\%F1.1\%}$ = 1 parte de yeso y 1 de poliuretano gris, en volumen + 0,8% de aditivo Sikamix sobre el peso del yeso + 1% de fibra de polipropileno Sikacim sobre el peso del yeso

$Y1PA_{V0,8\%F1.1\%}$ = 1 parte de yeso y 1 de poliamida, en volumen + 0,8% de aditivo Viscocrete sobre el peso del yeso + 1% de fibra de polipropileno Sikacim sobre el peso del yeso

Índice

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Yeso.....	4
1.1.1 Aljez o piedra de yeso	4
1.1.2 Fases del sulfato de calcio.....	5
1.1.3 Yeso de construcción	6
1.1.4 Tipos de conglomerantes a base de yeso y yesos para la construcción.....	7
1.2 Materiales reciclados	8
1.3 Residuos de polímero.....	11
1.3.1 Producción de polímeros	12
1.3.2 Demanda de polímeros.....	13
1.3.3 Tipos de polímeros.....	15
1.3.4 Valorización de polímeros.....	16
1.3.5 Plan Nacional Integrado de Residuos	18
1.4 Residuos de poliuretano	20
1.5 Residuos de poliamida	21
CAPÍTULO II. OBJETIVOS.....	25
2.1 Objetivos.....	25

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE	31
3.1 Materiales de yeso/escayola aligerados.....	31
3.1.1 Oclusión de aire en la matriz del material	31
3.1.2 Adición de agregados ligeros.....	32
3.1.3 Yeso aligerado con agregados ligeros tradicionales	34
3.1.4 Yeso aligerado con residuos industriales	37
3.1.5 Yeso aligerado con polímeros	40
3.2 Residuos de Poliuretano (PU) y Poliamida (PA) como carga aligerante	44
CAPÍTULO IV. EXPERIMENTAL	53
4.1 Difracción de rayos X (DRX).....	53
4.2 Espectroscopía infrarroja (FT-IR).....	53
4.3 Análisis elemental (CHNS)	54
4.4 Granulometría por difracción de rayos láser.....	55
4.5 Análisis termogravimétrico (TGA).....	56
4.6 Medida de los parámetros reológicos	56
4.7 Medida de la consistencia de las pastas	57
4.7.1 Método de la mesa de sacudidas.....	58
4.7.2 Método de la fluidez de la pasta	58
4.8 Medida del principio de fraguado de las pastas.....	59
4.8.1 Método de la aguja de Vicat	59

4.9	Microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis por energías dispersas (EDX)	60
4.10	Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	61
4.11	Tomografía axial computarizada (TAC)	62
4.12	Medida de la resistencia mecánica a flexión y a compresión...	63
4.13	Medida de la dureza Shore C	63
4.14	Medida de la permeabilidad al vapor de agua.....	64
4.15	Medida de la adherencia.....	65
4.16	Medida de la absorción por capilaridad	66
4.17	Determinación de la densidad real.....	67
4.18	Determinación de la densidad aparente y de la capacidad de retención de agua.....	67
4.19	Medida del flujo de calor	68
4.20	Medida del aislamiento acústico	69
CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		73
5.1	Introducción.....	73
5.1.1	Yeso	73
5.1.2	Agua.....	74
5.1.3	Residuos poliméricos	76
5.1.4	Fibras de refuerzo	79
5.1.5	Aditivos.....	81

5.2	Caracterización de las materias primas	82
5.2.1	Caracterización del yeso.....	82
5.2.2	Caracterización de los residuos de poliuretano	87
5.2.3	Caracterización de los residuos de poliamida.....	90
5.2.4	Caracterización de las fibras.....	92
5.2.5	Caracterización de los aditivos	94
CAPÍTULO VI. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON RESIDUO DE POLIURETANO		97
6.1	Introducción	97
6.2	Justificación del porcentaje de sustitución de yeso por poliuretano	98
6.2.1	Estudios previos.....	98
6.2.2	Exigencias mecánicas según normativa UNE-EN 13279-1:2009	101
6.2.3	Criterio medioambiental	101
6.3	Experimental	101
6.3.1	Procedimiento de mezclado y fabricación de probetas....	102
6.4	Resultados y discusión	102
6.4.1	Caracterización en estado fresco	102
6.4.2	Caracterización en estado endurecido.....	107
6.5	Conclusiones	133

CAPÍTULO VII. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON RESIDUO DE POLIAMIDA EN POLVO	139
7.1 Introducción.....	139
7.2 Justificación del porcentaje de sustitución de yeso por poliamida	140
7.3 Experimental.....	140
7.4 Resultados y discusión	141
7.4.1 Caracterización en estado fresco	141
7.4.2 Caracterización en estado endurecido	145
7.5 Conclusiones	168
CAPÍTULO VIII. REOLOGÍA DE PASTAS YESO-POLÍMERO	173
8.1 Introducción.....	173
8.2 Objetivo	176
8.3 Experimental.....	177
8.3.1 Parámetros reológicos en el viscosímetro rotacional.....	180
8.3.2 Tixotropía	181
8.3.3 Determinación de la fluidez de la pasta.....	182
8.4 Resultados y discusión	182
8.4.1 Parámetros reológicos. Esfuerzo de cizalla umbral y viscosidad plástica.....	182
8.4.2 Determinación de la fluidez de la pasta con metodología tradicional	188

8.4.3	Relación entre la fluidez de la pasta y la viscosidad plástica ..	189
8.4.4	Tixotropía.....	192
8.5	Efecto de los aditivos superplastificantes en la reología de las mezclas	195
8.5.1	Determinación del esfuerzo de cizalla umbral en presencia de aditivos	195
8.5.2	Determinación de la viscosidad plástica en presencia de aditivos	198
8.5.3	Determinación de la fluidez de la pasta en presencia de aditivos	199
8.6	Conclusiones	201
CAPÍTULO IX. ADITIVOS Y FIBRAS EN YESOS ALIGERADOS CON POLÍMEROS		
9.1	Introducción	207
9.1.1	Aditivos.....	207
9.1.2	Fibras	211
9.2	Objetivo.....	214
9.3	Materias primas.....	215
9.4	Metodología.....	215
9.4.1	Primera fase de selección.....	216
9.4.2	Segunda fase de selección.....	216

9.4.3	Tercera fase de diseño de fórmulas mejoradas.....	217
9.5	Resultados y discusión	217
9.5.1	Resultados de la primera fase de selección	217
9.5.2	Resultados de la segunda fase de selección	225
9.5.3	Resultados de la tercera fase de selección	226
9.5.4	Mezclas utilizadas como material para elementos prefabricados	227
9.5.5	Mezclas utilizadas como material para revestimientos de paramentos	237
9.6	Conclusiones	239
CAPÍTULO X. ESTUDIO ECONÓMICO		245
10.1	Introducción.....	245
10.2	Estudio analítico de costes	246
10.2.1	Detalle de las mezclas objeto del estudio.....	247
10.2.2	Modelo de cálculo de costes de transformación.....	248
10.2.3	Modelo de cálculo de los costes de transporte	251
10.2.4	Estudio analítico comparativo.....	256
10.3	Valoración cualitativa.....	261
10.3.1	Gestión del residuo	261
10.3.2	Beneficio medioambiental de los nuevos materiales ...	263
10.4	Conclusiones	264

CAPÍTULO XI. CONCLUSIONES FINALES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE FUTURO	269
11.1 Conclusiones finales	269
11.2 Líneas de investigación de futuro	274
APÉNDICE. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	277
Directamente relacionada con esta Tesis Doctoral	277
Indirectamente relacionada con esta Tesis Doctoral	280

Capítulo I: Introducción

1 Introducción

El esfuerzo investigador en el campo de los nuevos materiales de construcción, conglomerados con residuos en su composición, persigue determinar en profundidad la relación compatibilidad-propiedades de los desechos con la matriz en la que se integran, con el fin de conseguir nuevos materiales sostenibles de prestaciones adecuadas para satisfacer las necesidades que el sector de la edificación demanda.

La evolución de los valores sociales ha sido una constante en la historia de la humanidad. Se ha pasado de un desarrollo orientado a la producción de bienes, a una preocupación por las condiciones de vida y el respeto al entorno, circunstancias que han motivado que la sociedad tome conciencia del desarrollo sostenible, estableciendo políticas de reciclado de los subproductos industriales y de recuperación de los entornos degradados.

El trabajo de investigación que recoge esta Tesis Doctoral trata de contribuir en el desarrollo sostenible, a través de la reutilización de residuos poliméricos. Mediante un desarrollo experimental y económico se estudia la posibilidad de utilizar desechos de poliuretano y de poliamida en la preparación de productos para la construcción, en concreto en el diseño de yesos aligerados con propiedades equivalentes a las de los tradicionales.

Este trabajo no pretende resolver el problema definitivamente, pero sí aportar argumentos para afianzar la idea de que el desarrollo sostenible es posible y que las reticencias sociales a los cambios deben ser superadas, favoreciendo políticas que permitan encontrar usos alternativos al depósito de los residuos poliméricos en vertederos.

1.1 Yeso

1.1.1 Aljez o piedra de yeso

El yeso como mineral, se denomina piedra de yeso o aljez y es una roca sedimentaria de precipitación química formada por evaporación de las sales disueltas en lagos salados o en agua de mar, que precipitan formando parte de las evaporitas, constituidas por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio, muy abundantes en la naturaleza.

Este mineral está constituido principalmente por sulfato cálcico dihidratado o dihidrato (DH): $(\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2)$ y se encuentra en la naturaleza en diferentes estados de cristalización: selenita o espejuelo (en monocristales hexagonales), punta de flecha (en maclas), alabastro (en formaciones policristalinas), yeso sedoso (de aspecto fibroso) y otras con más impurezas, como el berrugón (monocristales transparentes con formaciones masivas)¹.

Al someter al aljez a un proceso térmico, se obtiene el yeso como producto industrial denominado comúnmente yeso de construcción, formado principalmente por sulfato de calcio semihidratado (SH): $(\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{1/2})$.

¹ Villanueva Domínguez L, García Santos A. Manual del yeso. ATEDY 2001, Madrid.

1.1.2 Fases del sulfato de calcio

Por deshidratación parcial o total del sulfato cálcico dihidratado se obtiene sucesivamente el semihidrato en sus formas alfa y beta, con características físicas y microestructurales diferentes, pero iguales en su composición química y con el mismo sistema cristalino romboédrico.

El semihidrato α se obtiene en el proceso de cocción del aljez en atmósfera saturada, o próxima a saturación entre temperaturas de 80 hasta 120 °C. De él se obtienen los yesos que comercialmente se conocen como alfa (α), de consistencia dura y alta resistencia. Por el contrario, el semihidrato beta (β) se origina en procesos de cocción en atmósfera seca a temperaturas comprendidas entre los 120 y los 180 °C, obteniéndose un yeso de consistencia más porosa y frágil que el anterior. El principal constituyente de los yesos de construcción es la variedad β .

La anhidrita III o anhidrita soluble, se forma por deshidratación del sulfato cálcico semihidrato β a temperaturas comprendidas entre 180 y 300 °C, la anhidrita II o anhidrita insoluble se forma a temperaturas comprendidas entre 300 y 700 °C y la anhidrita I se consigue a muy alta temperatura (> 1000 °C).

El proceso de fraguado se produce cuando las fases anhidras o semihidratadas de sulfato cálcico contenidas en el yeso en polvo se mezclan con el agua, se disuelven y a continuación fraguan mediante una reacción de hidratación, que provoca la transformación de la pasta desde un estado líquido inicial a uno plástico, en el que puede trabajarse y finalmente a un estado sólido, caracterizado por una

cristalización y solidificación del dihidrato. Este proceso de cristalización va acompañado de una expansión de volumen. Las anhidritas solubles An III se transforman casi inmediatamente en semihidratos. Sin embargo, el paso de la anhidrita insoluble An II a semihidrato es muy lento.

1.1.3 Yeso de construcción

La aplicación del yeso en la construcción es muy antigua. Hay constancia de que en el año 7000 a.C.² el yeso se utilizaba como materia prima en la realización de revestimientos. Desde entonces y a lo largo de la historia de la humanidad, el yeso se ha empleado como material en la fabricación de elementos prefabricados, para la producción de placas laminadas para particiones y complementos para techos o en recubrimientos de paredes y techos de interiores. Existen otras aplicaciones potenciales del yeso, como es el caso del yeso aligerado a base de yeso espumado mediante la incorporación de aditivos^{3,4} o utilizando áridos ligeros^{5,6}.

² Gawlicki M. Gypsum – another approach. *Cem Wapno Beton* (2009), 13(75), 86–96.

³ Skujans J, Vulans A, Iljins U, Aboltins A. Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum. *Appl Therm Eng* (2007), 27, 1219–1224.

⁴ Çolak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. *Cem Concr Compos* (2000), 22, 193–200.

⁵ Sayil B, Gurdal E. The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks. In: Lacasse M.A, Vainer D.J. *Proceedings in 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components (8dbmc)*. Canada: Vancouver (1999), 496–504.

⁶ García Santos A. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Mater Constr* (2009), 59, 105–124.

1.1.4 Tipos de conglomerantes a base de yeso y yesos para la construcción

En la actualidad, los yesos de construcción y los conglomerados a base de yeso para la construcción se clasifican, designan e identifican con arreglo a lo especificado en la norma UNE EN 13279-1: 2009⁷, según el esquema de la Figura 1.1.

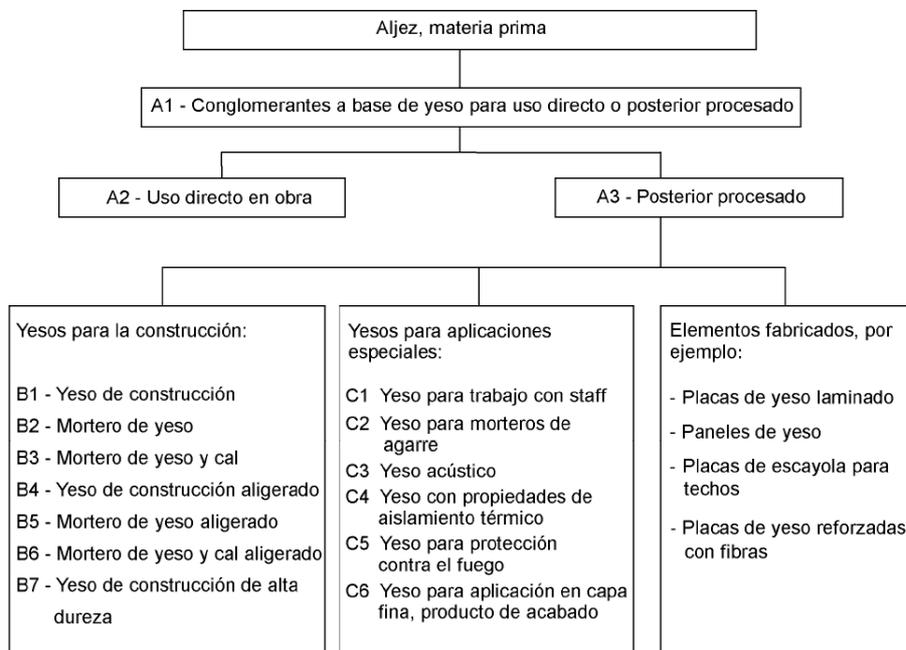


Figura 1. 1. Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción

Esta norma europea especifica las características y las prestaciones del yeso de construcción y los conglomerantes a base de yeso para construcción en polvo. Además, incluye los yesos premezclados para revestir paredes y techos en el interior de edificios en los que se aplica

⁷ UNE-EN 13279-1:2009. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1. Definiciones y especificaciones.

como material de acabado que puede ser decorado. Estos productos están especialmente formulados para cumplir sus especificaciones de uso mediante el empleo de aditivos, adiciones, agregados y otros conglomerantes, tanto mediante aplicación manual como mecánica.

Dentro de la norma europea se incluyen los conglomerantes a base de yeso que se emplean directamente en obra y los que se utilizan como materia prima para la fabricación de paneles de yeso, placas de yeso laminado, placas reforzadas con fibras y placas para techos.

1.2 Materiales reciclados

Nuestro estilo de vida, costumbres y procesos productivos hacen que cada vez generemos un mayor volumen de residuos. La mayor parte de los residuos industriales generados se depositan en vertederos, sin uso definido, por lo que se plantea establecer procedimientos de reciclado y reutilización que permitan minimizar su impacto en el ambiente, garantizando la sostenibilidad.

En un esfuerzo por promover el uso sostenible de los materiales naturales, muchos países, regiones y municipios se involucran cada vez más en la elaboración de políticas que promueven el reciclaje a gran escala de productos derivados de los distintos residuos, en múltiples aplicaciones. Para ello, se requiere el desarrollo de políticas de I+D que favorezcan infraestructuras físicas y económicas, para el empleo de materiales reciclados en grandes cantidades. Esto contribuye a reducir los costes de almacenamiento de residuos y el abandono de éstos cerca de las zonas urbanas.

La reutilización de los subproductos o residuos de procesos industriales en la construcción es una práctica cada vez más común, suponiendo en algunos casos incluso un potencial de crecimiento, aunque se precisan analizar las limitaciones a las posibilidades reales y la necesidad de realizar más estudios, que deberían ser incluidos en la fase de diseño del proyecto constructivo.

Dentro del concepto global de *reciclaje*, se pueden considerar varios procedimientos:

- Reutilización: el material se utiliza para la misma finalidad que inicialmente tiene. Puede implicar una mejora o renovación del mismo.
- Reciclado: el material se emplea como materia prima para otros productos u otras funciones diferentes a la inicial.
- Combustión: se considera este caso como una recuperación de energía a partir de la combustión del residuo.

El conocimiento sobre los efectos que provoca en el medio ambiente el reciclado y la reutilización de residuos de construcción sería provechoso desde varios puntos de vista como, por ejemplo, los criterios para establecer normativas comunes, la asignación de recursos económicos para llevar a cabo políticas de reutilización y reciclaje, el uso eficiente de la energía y de los recursos naturales, la creación de áreas de investigación orientadas a la gestión integral de residuos industriales y su identificación, orientando su posterior uso, o estudios de mercado que analicen y avalen el impacto económico del uso de los residuos industriales en un contexto económico de referencia más amplio, y los

costes de oportunidad por su acumulación en vertederos, sin un uso definido.

La industria de la construcción ofrece un amplio margen de aplicaciones potenciales de residuos, ya que necesita grandes volúmenes de materiales y una amplia gama de características en esos materiales (mecánicas, funcionales, Etc.), por lo que se pueden aprovechar para distintas aplicaciones. Un ejemplo es la utilización de árido reciclado producido a partir de residuos de la construcción y la demolición de estructuras de hormigón. También las cenizas volantes^{8,9}, obtenidas en el filtrado de los humos de las centrales térmicas utilizadas como adiciones activas en la fabricación del cemento. En los últimos años se han desarrollado varios estudios en este campo^{10,11}.

La investigación en el uso de productos de desecho de procesos industriales es de interés desde un punto de vista ambiental, porque se reduce el impacto en la fabricación de nuevos materiales. También desde un punto de vista económico, por el potencial ahorro de recursos en materias primas y en el tratamiento y eliminación de los residuos generados en su producción¹².

⁸ Gómez J.M.V, Vázquez E, Agulló L. Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material. Monografía CIMNE No. 60, (2001), 137.

⁹ Malhotra V.M, Mehta P.K. High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice and case histories. Ottawa, Canada: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc.; (2002), 101.

¹⁰ Demir I, Orhan M. Reuse of waste bricks in the production line. Build Environ (2003), 38, 1451–1455.

¹¹ John V.M, Zordan S.E. Research and development methodology for recycling residues as building materials—a proposal. Waste Management (2001), 21, 213–219.

¹² Thomark C. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. Resources, Conservation and Recycling (2001), 33, 113–130.

Por todo ello, muchos países han desarrollado políticas de gestión orientadas al desarrollo sostenible, apostando por la reutilización y reciclado de residuos en grandes cantidades. Los factores que impulsan este tipo de actitudes se traducen en datos económicos favorables como son las tasas de generación de materiales, el ahorro de espacio y coste por el almacén/eliminación de residuos, la demanda de menos materiales de construcción procedentes de recursos naturales, y disponibilidad de sistemas de apoyo técnicos para hacer frente a cuestiones medioambientales.

1.3 Residuos de polímero

Como ya se ha comentado, la gestión de los residuos sólidos es uno de los principales problemas ambientales, pues la eliminación de los mismos influye favorablemente tanto en los factores medioambientales como en los económicos.

Los costes asociados a la adquisición de terrenos para el depósito de los residuos y a la gestión de los vertederos, obligan a la búsqueda de soluciones para su tratamiento, cumpliendo con la premisa de preservación del entorno a un coste razonable para las empresas. Por eso, la reutilización de los residuos frente al depósito o eliminación de los mismos es una alternativa cada vez más atractiva.

Los trabajos de investigación que se han realizado hasta la fecha para la reutilización de residuos incorporados a yesos, morteros y hormigones, incluyen vidrios, polímeros, neumáticos, escorias, Etc., concluyendo casi siempre con una viabilidad técnica y/o económica del reciclado de este

tipo de agregados en la fabricación de los conglomerados de yeso y cemento para su uso en la construcción, y especialmente, la reutilización de los residuos voluminosos, pues la producción de conglomerados para la construcción puede llegar a demandar una importante cantidad de los mismos.

Este es el caso de los residuos poliméricos procedentes de subproductos industriales. Su volumen ha aumentado exponencialmente en el tiempo y son escasas las referencias para su reciclado y reutilización en la fabricación de otros productos útiles.

1.3.1 Producción de polímeros

La Figura 1.2 representa los datos de producción de plásticos y polímeros a nivel mundial, europeo y nacional para el año 2010.

Desde 2009 hasta 2010 la producción mundial de plásticos y polímeros aumentó un 6 %, lo que significa 15 millones de toneladas más que el año anterior, alcanzando un total de 265 millones de toneladas, confirmándose de este modo la tendencia de crecimiento del sector de cerca del 5% anual durante los últimos 20 años¹³.

En Europa, el crecimiento de la producción anual de plásticos y polímeros ha sido del 4,5% respecto a la del año 2009, lo que supone 2 millones de toneladas más que el año anterior, con una producción total de 57 millones de toneladas producidas de este tipo de materiales en el 2010.

¹³ Plastics: the Facts 2011. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010. <http://www.plasticseurope.org>

En España, la producción total se situó en 4 millones de toneladas en el año 2010.

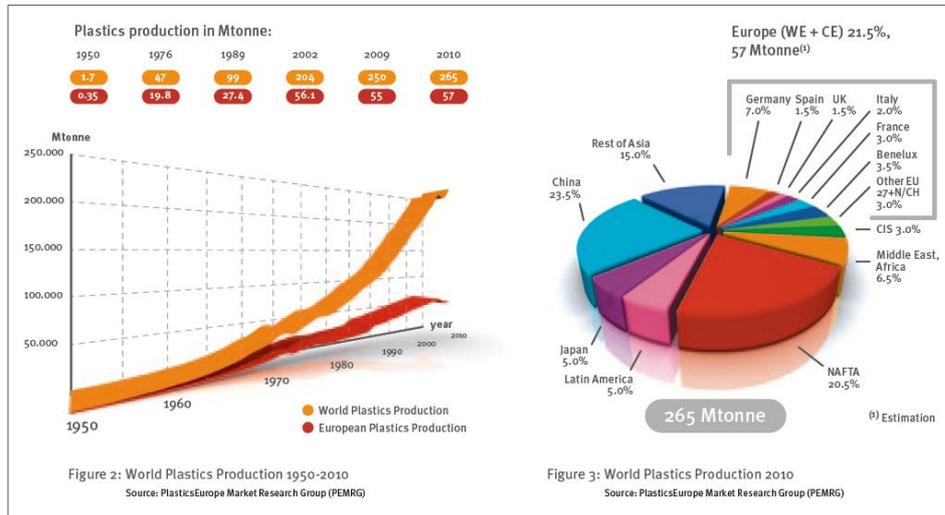


Figura 1. 2. Producción mundial y de Europa de plásticos y polímeros (1950-2010)

1.3.2 Demanda de polímeros

En 2010, la demanda de plásticos y de polímeros en Europa ha sido de 46,4 millones de toneladas. El sector de los embalaje es el que más ha contribuido en el incremento con un 39,0%, seguido por la construcción y la edificación (20,6%), la automoción (7,5%) y finalmente por el sector de producción de aparatos eléctricos y electrónicos (5,6%) (Figura 1.3).

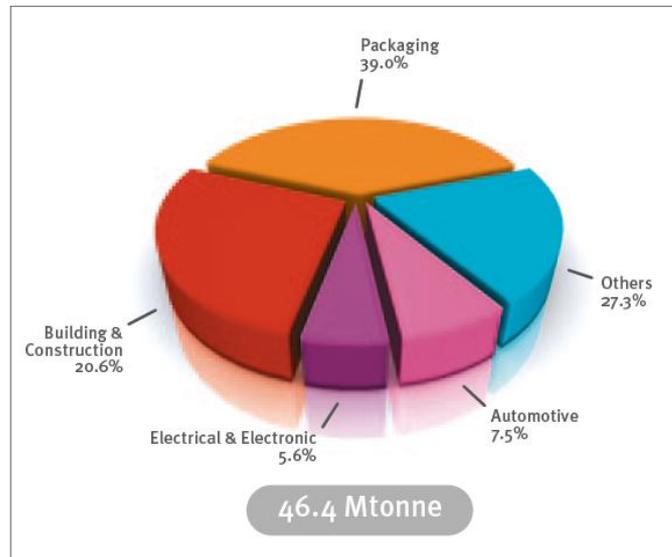


Figura 1. 3. Demanda de plásticos y de polímeros por sector (2010)

Si la demanda se reparte en función del sector de aplicación y del tipo de polímero (Figura 1.4), se observa que para el caso de la edificación y construcción, los materiales más utilizados son, en primer lugar el policloruro de vinilo (PVC), seguido por el polietileno de alta densidad (PE-HD) y el poliestireno expandido (EPS), en tercera posición aparecen el poliuretano (PUR) y el polipropileno (PP) y finalmente, se sitúan otros como el poliestireno (PS) y la poliamida (PA).

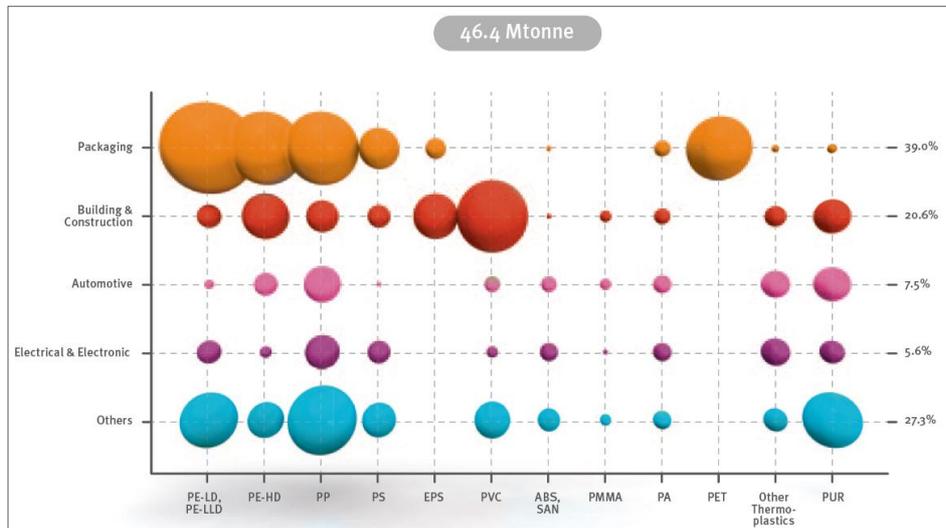


Figura 1. 4. Demanda de plásticos y de polímeros según su tipología y el sector donde se producen (2010)

1.3.3 Tipos de polímeros

Existen diferentes tipos de polímeros y plásticos con propiedades específicas para cada aplicación, dependiendo de su estructura química.

Los cinco grandes materiales de este tipo que destacan en términos de su participación en el mercado son:

- Polietileno: incluyendo el de baja densidad (PE-LD), de baja densidad (PE-LLD) y el de alta densidad (PE-HD).
- Polipropileno (PP).
- Policloruro de vinilo (PVC).
- Poliestireno: sólido (PS) y expandido (EPS).
- Politereftalato de etilo (PET).

En conjunto, estos materiales representan alrededor del 74% de la demanda total de polímeros en Europa. La Figura 1.5 representa la

demanda de los diferentes tipos de polímeros. Se observa que los tres productos con mayor cuota de mercado son, el polietileno (29%), el polipropileno (19%) y policloruro de vinilo (12%).

Si nos centramos en el porcentaje de poliuretano (PUR), se observa una necesidad de un 7 % que, respecto a la demanda total de 46,4 millones de toneladas de polímeros que se manejan, suponen al año unas 3,25 millones de toneladas de poliuretano.

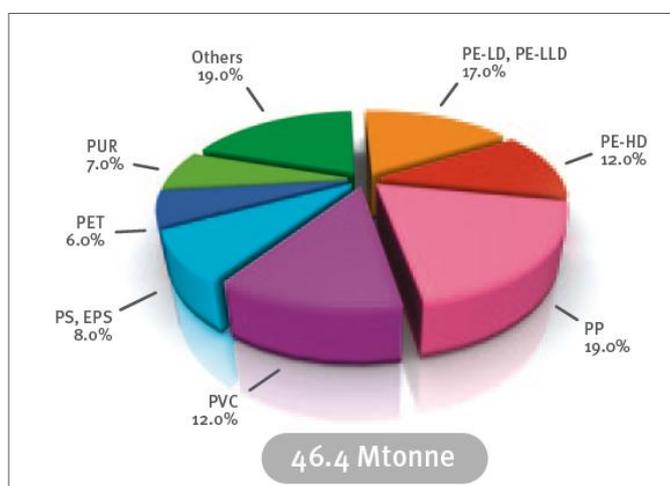


Figura 1. 5. Demanda de plásticos y polímeros en Europa según su tipología (2010)

1.3.4 Valorización de polímeros

Si se cuantifican los pasos principales del ciclo de vida de los plásticos, desde su fabricación para convertirlos en productos concretos, hasta su eliminación-recuperación, se generan 24,7 millones de toneladas de residuos poliméricos, de los cuales, el 57,9% son valorizados (14,7 millones de toneladas), mediante reciclado o utilizados en combustión para la recuperación de energía a partir del residuo. Por tanto, la cantidad de residuo polimérico no valorizable que se deposita en

vertederos es de 10,4 millones de toneladas, un 42,5 % de los residuos polímeros generados (Figura 1.6).

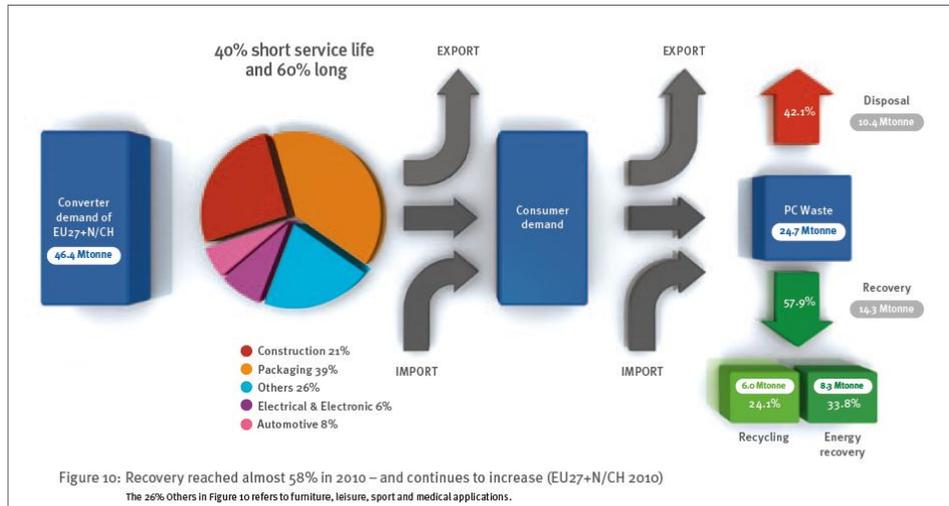


Figura 1. 6. Valoración de los plásticos

En general, los datos disponibles para el año 2010 indican que, en comparación con el año 2009, se ha reaprovechado en torno a un 9,3% más de polímero. En la gráfica de la Figura 1.7 se explica el cambio en los hábitos de reciclaje y las tasas de recuperación entre 2009 y 2010 en comparación con la variación media anual en los años 2006 a 2010. Los porcentajes aumentaron en mayor medida en los últimos años (2009 y 2010), mientras que se observa que la cantidad total depositada en vertedero disminuye en 2010, incluso considerando el hecho de que el conjunto total de residuos generados es mayor.

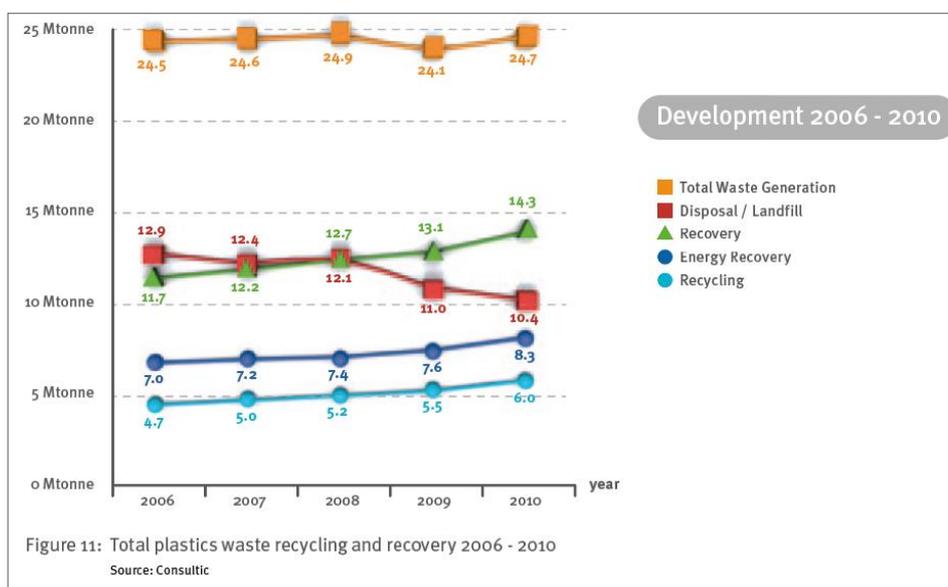


Figura 1. 7. Tasa de recuperación y de reciclaje de los residuos poliméricos (2006-2010)

1.3.5 Plan Nacional Integrado de Residuos

El mercado europeo de los residuos poliméricos está en constante crecimiento, llegando a ser, para el año 2010, de 24,7 millones de toneladas en 2010. Aunque el 58% de estos residuos se ha recuperado, se necesitan más esfuerzos para captar plenamente el potencial de valorización de estos desechos. Para ello, se requieren acciones tanto a nivel europeo como estatal, de manera que se pueda estructurar el ciclo de vida de postconsumo, por lo que se necesitaría una normativa adecuada que oriente la forma de actuar y evaluar la calidad de los polímeros como materiales reciclados, para su posterior reexplotación.

En nuestro país, se aplica el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR 2008-2015), que identifica los objetivos e impulsa a las distintas Administraciones y agentes económicos involucrados a la consolidación de una gestión que integre de forma efectiva los principios que rigen la

política europea de residuos (incluyendo algunos tipos de polímeros) para cambiar de forma significativa la gestión de los residuos en España. Los objetivos y medidas incluidas en el Plan tienen, en muchos casos, carácter estratégico y pretenden servir de guía para el desarrollo de políticas específicas de gestión para distintos flujos y orientadas a cambiar la gestión de los residuos en España.

Si se analiza este Plan Nacional de manera detallada, no refleja suficientes estadísticas y datos sobre la generación y gestión de residuos poliméricos. A esto, se le unen varios problemas como son:

- Limitado uso de sistemas y tecnologías tendentes a la reducción del volumen de residuos generados.
- Pocas infraestructuras específicas existentes para su gestión, que además requieren una puesta al día tecnológica.

Sin duda la aplicación de las medidas del Plan va a suponer una mayor eficacia en la gestión, el crecimiento del sector empresarial especializado en la gestión de los residuos y creación de empleo en el sector.

Como resumen, puede decirse que la generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas, de lo que ha surgido la necesidad de la existencia de una política europea en materia de residuos. El abandono o la gestión inadecuada de materiales producen impactos notables en el medio ambiente, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. Sin embargo, cuando los residuos se gestionan de forma

adecuada se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales, del clima y al desarrollo sostenible.

1.4 Residuos de poliuretano

Las espumas de poliuretano son uno de los principales materiales plásticos que se utilizan en la construcción por su excelente comportamiento como materiales aislantes térmicos. Además presentan magníficas características específicas de plasticidad-elasticidad y de relación resistencia/densidad

Los procesos industriales de fabricación y conformación de las espumas de poliuretano y la puesta en obra de estos materiales en la construcción modular, generan una importante cantidad de residuos.

Las estimaciones de consumo de poliuretano en Europa para el siglo XXI son de aproximadamente 3 millones de toneladas por año. Alrededor de 1,8 millones de toneladas de espuma de poliuretano flexible, 0,7 millones de toneladas de espuma rígida y 0,4 millones de toneladas de elastómeros de poliuretano y otros productos.

Por eso, esta Tesis Doctoral resulta interesante en la medida en que trata de reaprovechar un residuo como la espuma de poliuretano para la fabricación de yeso aligerados, con propiedades aceptables para ser empleados como materiales de construcción.

1.5 Residuos de poliamida

Se han realizado numerosos análisis del comportamiento de los residuos de poliamida reciclados, basados en estudios en los que se trabaja básicamente con fibras de poliamida a las que se les añade refuerzos tipo fibra de vidrio o resinas para ser reutilizadas de nuevo como fibras de refuerzo.

Por otra parte, no se dispone de datos concretos referentes a la generación de desechos de poliamida en polvo, ya que es un polímero de precio elevado que no se fabrica en las mismas cantidades que los materiales dedicados a la industria de la construcción, sino en porcentajes mucho menores, por lo que el análisis de residuos no ha sido estimado hasta el momento.

Tampoco se ha encontrado bibliografía sobre el empleo de poliamida en polvo como agregado ligero de materiales conglomerantes de cemento o de yeso/escayola enmarcados en el sector de la edificación, por lo que se considera un nuevo campo de aplicación como compuestos aligerantes.

Capítulo II: Objetivos

2 Objetivos

2.1 Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral consiste en acometer un estudio pormenorizado de la posibilidad de incorporación al yeso de poliuretano y poliamida, provenientes de residuos industriales, para la obtención de materiales ligeros (yesos aligerados) para la construcción, con propiedades térmicas de estos materiales tradicionales, sin mermar sus propiedades físicas y mecánicas, consiguiendo al mismo tiempo su correcta puesta en obra.

Para ello, se ha estudiado la viabilidad técnica y económica de la incorporación de desechos de poliuretano y de poliamida a un material de construcción tradicional como es el yeso, estableciéndose los siguientes objetivos:

1. Establecer métodos de elaboración fiables que permitan la obtención sencilla de yesos aligerados a partir del uso de residuos poliméricos de poliuretano y poliamida, estableciendo la dosificación más adecuada.
2. Determinar las diferentes propiedades en estado fresco y en estado endurecido para conocer su adaptación a las prescripciones de habitabilidad determinadas en el nuevo Código Técnico de la Edificación.

3. Conseguir yesos ligeros con propiedades térmicas equivalentes a las de las mezclas convencionales y con un buen comportamiento en régimen de prestación.
4. Caracterizar los parámetros reológicos de las pastas de yeso con polímero con el objetivo de conocer su comportamiento en el momento de su puesta en obra.
5. Mejorar las propiedades de las mezclas diseñadas, mediante el empleo de aditivos y fibras de refuerzo, determinando el tipo de aditivo y fibra más idóneo, así como la dosificación óptima.
6. Estudiar la viabilidad económica de utilizar los residuos de poliuretano y de poliamida en la fabricación de yesos aligerados.

De los resultados de la investigación de esta Tesis Doctoral se pretende conseguir los siguientes objetivos generales:

- Que los residuos poliméricos de poliuretano y poliamida procedentes de la industria, se puedan emplear en la preparación de yesos aligerados con buenas prestaciones térmicas en comparación con los conglomerados tradicionales.
- Que el comportamiento medioambiental de estos conglomerados no plantee problemas de intolerancia con el medio natural en el que se ubiquen, de ahí la importancia del comportamiento conjunto de los componentes que forman estos materiales.
- Aportar una salida técnicamente posible a los residuos poliméricos generados en la industria, para elaborar un producto

con ventajas competitivas desde el punto de vista de la calidad y su implicación en el desarrollo sostenible.

Capítulo III: Estado del Arte

3 Estado del Arte

En este capítulo se refunden algunos de los métodos para aligerar materiales conglomerados a base de yeso/escayola, que se han desarrollado hasta nuestros días.

Así mismo, se analizan los residuos poliméricos utilizados en este Trabajo como material aligerante, desde el punto de vista de su empleo en materiales conglomerantes de uso en construcción.

3.1 Materiales de yeso/escayola aligerados

En términos generales, los materiales aligerados presentan una serie de ventajas que los hacen idóneos en cuanto a la facilidad de transporte y puesta en obra. Asimismo, tienen un mejor comportamiento térmico al incluir un volumen controlado de aire ocluido en la matriz conglomerante.

Existen varios procedimientos para aligerar un material, que se explican con detalle en los siguientes apartados.

3.1.1 Oclusión de aire en la matriz del material

En concreto se conocen los métodos que incorporan aire ocluido en la matriz del material durante su fabricación incrementando la relación agua/conglomerante o añadiendo agua carbonatada en el proceso de amasado y los métodos que incorporan aditivos modificadores del contenido de aire de la pasta, como son los aditivos aireantes y

espumantes¹⁴. Los aditivos inclusores de aire o aireantes están formados por moléculas orgánicas que en disolución acuosa generan un número elevado de finas burbujas de aire que, una vez fraguada la pasta, interrumpen la red capilar. Los aditivos espumantes generan la oclusión de pequeñas burbujas de aire a partir del batido manual o mecánico, dotando al material de una estructura alveolar.

3.1.2 Adición de agregados ligeros

Los agregados ligeros son áridos inertes que, añadidos al material en mayor proporción que los aditivos, modifican sus características físicas en estado endurecido. Los más frecuentes son los áridos ligeros de densidad real de grano inferior a 2 gr/cm³, que induce a una reducción del peso del material que, generalmente, le confiere propiedades térmicas mejoradas.

El conocimiento de los áridos ligeros se remonta al siglo II a.C., época en la que se construyó la Bóveda del Panteón en Roma, cuya parte superior está realizada con argamasa aligerada con toba volcánica y piedra pómez¹⁵. No obstante, la generalización del uso de los áridos ligeros en la construcción se produjo en el momento en el que se industrializa su fabricación en 1917 en la ciudad de Kansas, Missouri, por Stephen

¹⁴ Del Río M, Hernández Olivares F. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solid addition. *Mater Constr* (2004), 54, 65-76.

¹⁵ Cowan H.J.A. History of masonry and concrete domes in building construction. *Build Environ* (1977); 12, 1-24.

Hayde, que desarrolló un procedimiento industrial para expandir arcillas¹⁶.

El empleo de los áridos expandidos en Europa y América es muy antiguo. Hasta aproximadamente la década de los sesenta se utilizaba, casi exclusivamente, para mejorar el aislamiento térmico. A partir de esta fecha, su uso se generaliza y se permite utilizarlo para fines estructurales. Como dato para entender su importancia, sólo en Europa, incluyendo Rusia y los países del Este, existen más de 140 fábricas de árido expandido, encontrándose en España una de ellas (Arciresa), en Oviedo¹⁷.

Los áridos ligeros pueden ser naturales, como la diatomita, la piedra pómez, la escoria volcánica, cenizas volantes y toba volcánica, o artificiales, como la arcilla expandida¹⁸, perlita^{19,20} y vermiculita²¹. La mayoría de ellos han sido extensamente utilizados en morteros, hormigones y yesos²².

Existen otros tipos de agregados ligeros de naturaleza orgánica no elaborados como son el granulado de corcho, la cáscara de cereal o las

¹⁶ Buildex Inc. Haydite Expanded-Shale Lightweight Aggregate. <http://www.buildex.com/haydite.html> (Accessed: September 10, 2009).

¹⁷ Bolsa Nacional de Residuos y Subproductos Industriales. 2001, 2, 11-12.

¹⁸ Hall R.D, Blakey F.A. Expanded clay aggregate for concrete. *Constructional Review*. (1953).

¹⁹ Eckardt P. Fireproof super lightweight concrete. *Ger. Offen D.E.* 3, 110, 658 (Cl. Co. 4B 15/02), 1982, 11.

²⁰ Kisari J, Varkonyi G, Szalonki M. Lightweight concrete. *Chem Abstr* (1986), 105, 28851.

²¹ Rosen A. Some use of vermiculite. *S.A. Mining and Engineering*. 1994.

²² Mnjit S., Mridul G. Perlite based building materials a review of current applications. *Constr Build Mater* (1991), 5, (2), 75-81.

virutas de madera²³, y otros de naturaleza orgánica polimérica como es el poliestireno expandido²⁴.

3.1.3 Yeso aligerado con agregados ligeros tradicionales

Se ha llevado a cabo un estudio sobre el estado del conocimiento referente a trabajos científicos que estudian la incorporación de elementos aligerantes en yesos y escayolas, para modificar o mejorar algunas de sus propiedades físicas.

En relación a los trabajos encaminados a disminuir el peso de los materiales de yeso o escayola se ha encontrado abundante documentación referente al uso de los agregados ligeros que a continuación se detalla.

3.1.3.1 Arcilla expandida

La arcilla expandida se obtiene sometiendo a las arcillas a un proceso de cocción a altas temperaturas (1200° C) en grandes hornos rotatorios, para su transformación en gránulos esféricos, porosos y de baja densidad con interior celular, debido a la formación de microburbujas de aire ocluido. Estas características le otorgan un gran poder aislante, por lo que es un material idóneo para su aplicación en aislamientos,

²³ Del Río M. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos. Tesis Doctoral (1999). Madrid.

²⁴ Zach J, Hela R, Hroudova J, Sedlmajer M. Utilization of lightweight aggregate from expanded obsidian for advanced thermal insulating plasters production. International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (2011), 335-336, 1199-1203.

conglomerados ligeros y prefabricados de uso en edificación²⁵. La arcilla expandida ha sido ampliamente utilizada en la fabricación de hormigones y morteros de cemento aligerados, resolviendo grandes problemas de peso del material y reduciendo considerablemente su conductividad térmica^{26,27}. En cuanto al yeso aligerado con arcilla expandida, entre las primeras referencias encontradas al respecto, se encuentran la patente que describe un revestimiento ignífugo aplicable en edificación, que incorpora yeso y arcilla expandida para mejorar su resistencia al fuego²⁸, y la invención que describe la elaboración de un ladrillo prefabricado para la construcción que incluye en su interior un conglomerado a base de yeso o escayola con arcilla expandida para mejorar el aislamiento térmico²⁹.

3.1.3.2 Perlita expandida

La perlita es un silicato de origen volcánico que contiene agua de cristalización en la molécula. Este mineral, triturado a una granulometría preestablecida, se calienta a temperaturas comprendidas entre 900-1200°C en hornos especiales. A esta temperatura el agua ocluida se transforma en vapor y se expande. Mediante este proceso, el silicato

²⁵ Ozguven A, Gunduz L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. *Cem Concr Compos* (2012), 34, 781-787.

²⁶ Al-Sibahy A, Edwards R,. Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures: Experimental, modelling and parametric studies. *Constr Build Mater* (2012), 31, 174-187.

²⁷ Kew H, Donchev T, Petkune N. Behaviour of concrete containing lightweight expanded clay aggregates under high temperatures. *Proceedings in Concrete Solutions, 4th International Conference on Concrete Repair* (2012), 491-496.

²⁸ Rojas Gomáriz L. Revestimiento ignífugo aplicable en la edificación. Patente de invención (2000). ES 2 141 002 A1.

²⁹ Méndez Y. Ladrillo prefabricado para la construcción. Patente de invención (2005). ES 2 211 312 B1.

aumenta hasta 20 veces su volumen inicial. Esta transformación proporciona unas características muy adecuadas para su uso como agregado ligero en hormigones, morteros y yesos, con propiedades mejoradas de aislamiento térmico y acústico³⁰.

Watanaba y Nishihara³¹ desarrollaron en 1976 una patente de placa de yeso aligerada con propiedades ignífugas, mezclando 65 partes de hemihidrato β , 20 partes de agregado de perlita expandida, 4 partes de fibra de vidrio y aditivos para lograr una resistencia a flexotracción de 7,2 N/mm². En 1979, Peresztegi et al³², publicaron un trabajo científico sobre composiciones de yeso de baja densidad (570-830 Kg/m³) mezcladas con perlita expandida y reforzadas con fibra de vidrio, compactadas a presiones de 345-1380 KN/m², de aplicación en interiores para techos o paredes debido a su capacidad aislante y a su resistencia al fuego. Desde entonces, fueron varias las investigaciones que abordaron el uso de la perlita como agregado ligero en la fabricación de paneles prefabricados³³. En 1988, Susumu³⁴ formuló una composición a base de sulfato cálcico hemihidratado y perlita para elaborar un panel con propiedades mejoradas de resistencia al fuego y con reducción de las humedades por condensación.

³⁰ Molnar J. Perlite mining in Hungary. Mining magazine (1989), 161 (6), 498-499.

³¹ Yutaka W, Masaharu N. Gypsum based non flammable lightweight plate. Japan Kokai Tokyo Koho 760 4, 213 (Cl. Co 4B, B 28B). (1976).

³² Peresztegi D. High strength lightweight building blocks. Chem. Abstr (1979), 91, 95776.

³³ Yashushi M, Yoshinobu O, Yoshinobu F. Lightweight gypsum panels. Chem. Abstr (1980), 92. 134173.

³⁴ Mushashi Susumu. Fire resistant building boards with improved humidification and dehumidification property. Japan.

Hoy en día, existen gran variedad de productos en el mercado español a base de yeso o escayola que incorporan perlita en su composición para reducir el peso del conjunto del material y para otorgar al mismo resistencia frente al fuego y propiedades de aislamiento acústico, tanto en prefabricados laminados³⁵ como en yeso/escayola para proyección³⁶.

3.1.3.3 Vermiculita expandida

La vermiculita es un mineral de la familia de la mica, compuesto principalmente por silicatos hidratados de aluminio y magnesio. Mediante un tratamiento térmico a temperaturas de aproximadamente 700°C, el mineral se expande, exfoliándose y aumentando su volumen inicial entre 20 y 30 veces. La vermiculita ha sido ampliamente utilizada en la construcción debido a que cuando se expande, proporciona al material una mejora de su capacidad aislante térmica, aumentando su absorción acústica. En la actualidad, existen productos de yeso/escayola que incorporan vermiculita para reducir su densidad^{37,38}.

3.1.4 Yeso aligerado con residuos industriales

3.1.4.1 Residuos de corcho

El corcho es un material ligero de estructura celular que constituye la corteza del alcornoque que se cultiva principalmente en España,

³⁵ Placo Saint-Gobain. (Placo Phonique, Placoflam.

³⁶ Placo Saint-Gobain. YPM/A (Proyal XXI, Prolite, Perlinor).

³⁷ Román Alema, B. Mortero de yeso con vermiculita expandida y aditivado, y procedimiento para su obtención. Patente de invención (2010), C04B28/14.

³⁸ Yongguang X, Tongjiang P, Haifeng L, Jiming C. Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards. *Adv Mater Res* (2011), 178, 220–225.

Portugal y Argelia. Los componentes químicos principales de corcho son suberina (40%), lignina (22%), hemicelulosa (11%), celulosa (9%) y extracto orgánico (15% -20%)³⁹. La densidad del corcho es de aproximadamente 300 kg/m³, que le hace ser idóneo para utilizarlo como agregado en la confección de materiales ligeros de una matriz conglomerante. Existen otras ventajas asociadas a su estructura celular y composición química como son la baja conductividad térmica, buena absorción acústica y alta impermeabilidad⁴⁰.

Se ha encontrado bibliografía referente al uso del granulado de corcho en compuestos a base de cemento^{41,42} y de yeso⁴³.

3.1.4.2 Residuos de vidrio celular

Se obtiene por medio de un proceso térmico-químico mediante la fusión del polvo vítreo, donde se crean celdas parcialmente vacías y cerradas que confieren al material una estructura de elevada resistencia a compresión, hermeticidad, indeformabilidad y gran resistencia a los agentes químicos.

Se ha encontrado escasa documentación bibliográfica sobre composites de vidrio celular con matriz aglomerante a base de yeso/escayola⁴⁴.

³⁹ Pereira H. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Sci Technol* (1988), 22, 211–218.

⁴⁰ Gibson L.J, Ashby M.F. *Cellular solids: structure and properties*, 2nd ed. (Paperback). Cambridge University Press, Cambridge (1999), 453–467.

⁴¹ Aziz M.A, Murphy C.K, Ramaswamy S.D. Lightweight concrete using cork granules. *Int J Cem Compos Lightweight Concr* (1979), 1, 29–33.

⁴² Karade S.R, Irle M, Maher K, Caldiera F. Cork granules as lightweight aggregate. In: Dhir RK, Dyer TD, Halliday JE (eds) *Sustainable concrete construction*. Thomas Telford, London (2002), 253–262.

⁴³ Del Río M. Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción. *Patente de invención* (2003), ES 2170612B2.

3.1.4.3 *Papel reciclado*

El proceso de fabricación del papel genera grandes cantidades de residuo en forma de pasta de celulosa, que deben ser recogidos y almacenados en plantas de compostaje. Esta pasta de papel tiene alto contenido de agua, con una humedad de alrededor del 100%. Entre otras aplicaciones, se ha estudiado la utilización de los residuos de lodos de la industria del papel como sustituto parcial del cemento en hormigones y morteros⁴⁵.

En 2005, Agulló et al.⁴⁶ estudiaron la posibilidad de incorporar residuos de papel en las mezclas de yeso. El estudio reveló un incremento de las propiedades mecánicas de resistencia a la flexión y a compresión y una pérdida de peso en relación al volumen de las mezclas, observando que el comportamiento mecánico y las propiedades reológicas del compuesto mejoraban con el secado y el picado previo de los residuos, garantizando una buena homogeneidad de la mezcla.

⁴⁴ Ashour T, Wieland H, Georg H, Bockisch F.J, Wu W. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Mater Design* (2010), 31 (10), 4676-4685.

⁴⁵ Perea J, Ambroise J, Biermann J, Voogt N. Use of thermally converted paper residue as a building material. *Proceedings in the third CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete*, San Francisco, California (2001).

⁴⁶ Agulló L, Aguado A, Garcia T. Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures. *Build Environ* (2006), 41, 821–827.

3.1.5 Yeso aligerado con polímeros

3.1.5.1 *Residuos de corcho artificial. Poliestireno expandido (EPS)*

El poliestireno expandido es un polímero termoplástico celular rígido que presenta una estructura celular cerrada rellena normalmente de aire y cuya densidad aparente ha decrecido de manera sustancial por la presencia de numerosas celdillas dispuestas dentro de su masa. Aunque existen numerosos polímeros expandidos en el mercado, el más habitual es el poliestireno expandido, conocido internacionalmente por las siglas EPS.

Para obtener poliestireno expandible se realiza una polimerización radicalaria en suspensión de agua. Al monómero de estireno se le agrega antes o durante la polimerización una fracción de benzina de bajo punto de ebullición, que se compone principalmente de pentano y de isopentano como agentes expansores. La reacción de polimerización se produce en reactores de acero inoxidable agitados mecánicamente y con temperaturas controladas mediante camisas de refrigeración-calefacción. De este proceso surge la materia prima del EPS, que son pequeñas perlas de poliestireno de geometría esférica, con diámetros comprendidos entre 0,2 y 3,0 milímetros.

El uso del poliestireno expandido se ha hecho común en aplicaciones como la construcción y el embalaje. La gran diversidad de aplicaciones del EPS se debe a sus propiedades de baja densidad, que permiten ofrecer productos compactos y muy ligeros con un intervalo de

densidades que van de 10 hasta 50 kg/m³. El poliestireno expandido muestra una notable capacidad de aislar del calor o del frío y del ruido, característica que se debe al aire o gas ocluido dentro de una estructura celular del polímero, donde aproximadamente un 98% del cuerpo esférico es aire y el resto es polímero. La conductividad térmica del EPS varía entre 0,046 W/m·K para los de baja densidad (10 kg/m³), y 0,033 W/m·K para los de alta densidad (35 kg/m³). Debido a su naturaleza orgánica, el EPS es además un material estable ante el ataque de muchos productos químicos comunes como las soluciones salinas y los ácidos diluidos, y también es resistente al ataque biológico.

Existen además en el mercado molidos de EPS que provienen de la recuperación de residuos de envases y embalajes de ese material. Esos residuos se utilizan como aligerantes de materiales de construcción como son los conglomerantes basados en el cemento, en el yeso, o la escayola⁴⁷.

Las perlas de EPS se han estudiado como cargas aligerantes de hormigón. Por ejemplo, en 2005, Laukaitis et al.⁴⁸ investigaron varias dosificaciones para la fabricación de cementos espumados y aligerados con gránulos de EPS.

⁴⁷ Lloveras Macià J, González Madariaga F.J. Mezclas de yeso o escayola aligeradas con gránulos de plástico expandido. Patente de invención (2007), ES 2 277 776 A1.

⁴⁸ Laukaitis A, Žurauskas R, Keriene J. The effect of polystyrene granules on cement composite properties. *Cem Concr Compos* (2005), 27, 41–47.

En 2008, González Madariaga⁴⁹ ensayó un nuevo material mezclando residuos de EPS, resultantes de la molienda de envases y embalajes procedentes del flujo de residuos municipales, con yeso o escayola para obtener placas y paneles de uso en la construcción.

En un trabajo posterior, García Santos⁵⁰ agregó gránulos de poliestireno expandido a una matriz de escayola con el objetivo de cuantificar la reducción de su densidad, en relación con el resto de propiedades, que se ven disminuidas por el incremento de porosidad de la matriz compuesta. Para evitar esta problemática recurrió a reforzar los materiales mediante el uso de fibras de polipropileno.

3.1.5.2 Residuo de politereftalato de etilo (PET)

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Es un polímero termoplástico lineal con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos, puede ser procesado mediante extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas

⁴⁹ González Madariaga F.J, Macia J.L. EPS (expanded poliestyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. Informes de la Construcción (2008), 60 (509), 35–43.

⁵⁰ García Santos A. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. Materiales de Construcción (2009),59 (293), 105-124.

y lamelas de cristales, el material se enfría rápidamente después de su fabricación, con lo que se logra una mayor transparencia.

Fue producido por primera vez en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras, ya que existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra, y su uso textil prosigue en la actualidad. En 1952 se comenzó a emplear en forma de filme para envasar y conservar alimentos. Pero la aplicación que supuso su mercado principal fue su utilización en forma de envases rígidos, a partir de 1976. Pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para la fabricación de botellas para bebidas poco sensibles al oxígeno, como por ejemplo el agua mineral y los refrescos carbonatados. Desde el año 2000 se utiliza también para el envasado de cerveza.

Existen algunos trabajos de investigación donde los residuos triturados de botellas de PET se han empleado en una matriz de yeso⁵¹. Los resultados obtenidos indican que al incrementar la proporción de PET añadido se disminuye la densidad, aumenta el aislamiento térmico y se reduce la resistencia mecánica a flexión.

3.1.5.3 Residuo de polietilvinilacetato (copolímero EVA)

Es un polímero termoplástico cuyo proceso de fabricación se realiza por copolimerización de los monómeros de etileno y acetato de vinilo a

⁵¹ Karaman S, Şahin S, Günal H, Örüng I. Stabilization of waste pet bottles with gypsum. J Appl Sci (2006), 6 (5), 1119–1122.

través de una reacción de activación mediante la formación de radicales libres, a presión y temperaturas elevadas, que pueden variar de 103 a 345 MPa y de 150 a 300 °C, respectivamente.

Una de las aplicaciones del copolímero EVA como residuo procedente de la industria del calzado, es la de agregado ligero en morteros y hormigones de propiedades térmicas mejoradas. La presencia de este residuo mejora la impermeabilidad y reduce la fisuración por retracción. En la bibliografía existente se encuentran varias referencias sobre investigadores que han incorporado residuos de EVA al yeso para elaborar placas con capacidad aislante térmica⁵².

3.2 Residuos de Poliuretano (PU) y Poliamida (PA) como carga aligerante

3.2.1.1 Residuos de espumas de poliuretano

El poliuretano es un polímero termoestable obtenido a partir de una reacción condensación de un monómero tipo poliisocianato (-NCO) y otro monómero con grupos polihidroxílicos (-OH) (Figura 3.1).

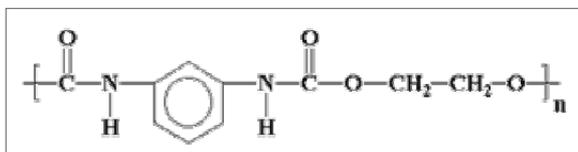


Figura 3. 1. Estructura química de un poliuretano típico⁵³

⁵² Melo M.O.B.C, Da Silva L.B, Coutinho A.S, Sousa V, Perazzo N. Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil. *Energy Buildings* (2012) 47, 35–43.

⁵³ The macrogalleria – a cyberworld of polymer fun. <http://www.psrc.usm.edu/macrog/index.htm>

Los químicos alemanes Wurtz y Hentschel, obtuvieron en 1848 y 1884 los primeros isocianatos, hecho que condujo finalmente al desarrollo de los poliuretanos. Pero fueron realmente Otto Bayer y sus colaboradores quienes hicieron posible el desarrollo comercial de los poliuretanos en 1937⁵⁴. Desde entonces, estos materiales se han desarrollado en muchas formas comercializadas entre las que se incluyen recubrimientos, elastómeros, adhesivos, compuestos de moldeo, espumas y fibras.

Las espumas de poliuretano tienen múltiples aplicaciones. Se presentan en forma flexible, semirrígida y rígida en diferente rango de densidades, dependiendo del proceso de fabricación y de los monómeros utilizados.

Las espumas flexibles (PUF) son estructuras de célula abierta y se emplean como soporte y material aislante en la industria del tejido.

Las espumas semirrígidas se utilizan como materiales absorbentes de energía en amortiguadores, reposabrazos o techos de automóvil.

Las espumas rígidas se utilizan en el sector de la construcción y de la refrigeración como aislante térmico. Asimismo, se pueden expandir para su aplicación en edificación y son de estructura celular cerrada⁵⁵.

Algunas de las propiedades del poliuretano, que le convierten en un material tan versátil, son su elevada resistencia a la abrasión, poca conductividad térmica y baja densidad aparente (20-40 kg/m³)⁵⁶.

⁵⁴ Szycher M. Szycher's Handbook of Polyurethanes. CRC Press, Boca Raton (FL). 1999.

⁵⁵ Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard. Madrid (2003), 558-561.

⁵⁶ Wu JW, Sung WF, Chu HS. Thermal conductivity of polyurethane foams. Int. J. Heat Mass Transf (1999), 42, 2211-2217.

El estudio de las mejoras de las propiedades de las espumas de poliuretano ha sido objeto de varios trabajos de investigación. De esta manera, se ha analizado el empleo de fibras de algodón natural, de lana o de bambú con el objetivo de mejorar las prestaciones de estos polímeros. Este tipo de fibras mejoran significativamente las propiedades de conductividad térmica y de absorción del sonido del poliuretano, observándose que la adición de un 4% de fibra de algodón supone el mejor comportamiento en la conductividad térmica de la espuma de poliuretano⁵⁷.

Se ha encontrado bibliografía referente al uso del poliuretano en composiciones basadas en conglomerados de cemento, como son hormigones o morteros aligerados.

En 2006, Verdolotti et al.⁵⁸ investigaron sobre la posibilidad de producir un nuevo material aligerado mezclando espuma de poliuretano fabricada *in situ* con diferentes proporciones de cemento Portland y agua. El material compuesto se preparó añadiendo en primer lugar el cemento con el agua y añadiendo después poliéter y diisocianato de tolueno en una proporción 1: 1,2, para generar una espuma flexible en la matriz cementicia. La caracterización de este compuesto proporcionó datos de densidad aparente de 90 Kg/m³ y resistencias mecánicas a compresión de 2,0 MPa.

⁵⁷ Büyükakinci Y, Sökmen N, Küçük H. Thermal conductivity and acoustic properties of natural fiber mixed polyurethane composites. *Tekstil ve Konfeksiyon* (2011), 21(2), 124–132.

⁵⁸ Verdolotti L, Di Maio E, Lavorgna M, Iannace S, Nicolais L. Polyurethane–cement-based foams: Characterization and potential uses. *J Appl Polym Sci* (2008), 107(1), 1–8.

En 2008, Mounanga et al.⁵⁹ presentaron los resultados de un estudio experimental sobre la incorporación de residuos de espuma rígida poliuretano (PUR), procedentes de la destrucción de paneles aislantes utilizados en edificación, en mezclas de cemento con el fin de producir un hormigón aligerado. Se cuantificó la influencia del poliuretano en las propiedades térmicas, obteniendo una conductividad térmica del orden de 2 a 7 veces más baja, aunque con propiedades mecánicas del orden de 2 a 17 inferiores, respecto de las mezclas sin poliuretano. Con objeto de mejorar las prestaciones mecánicas de este tipo de mezclas, en 2010 introdujeron el uso de aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos, logrando alcanzar los niveles exigidos para hormigones estructurales⁶⁰.

Existen referencias sobre el empleo de residuos de espuma de poliuretano en otros materiales, como son los hormigones bituminosos⁶¹ o los pavimentos asfálticos fundidos⁶².

En 2010, el Grupo de Investigación dentro del que se enmarca esta Tesis Doctoral, comenzó la investigación de nuevas fórmulas de mortero aligerado, incorporando al cemento residuos de espuma semirrígida de poliuretano procedente de la industria del automóvil, sustituyendo en

⁵⁹ Mounanga P, Gbongbon W, Poullain P, Turcry P. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cem Concr Compos* (2008), 30, 806-814.

⁶⁰ Ben Fraj A, Kismi M, Mounanga P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Constr Build Mater* (2010), 24 (6), 1069–1077.

⁶¹ Gutiérrez-González S, Gadea J, Calderón V, Junco C. Procedimiento de obtención de hormigón bituminoso en caliente con residuo de poliuretano espumado. Patente de invención (2011). Número de solicitud: P201100023.

⁶² Salas M.A. Hormigones bituminosos y pavimentos asfálticos con residuos de poliuretano. Trabajo de investigación (2011). Universidad de Burgos.

volumen diferentes proporciones de arena por agregado de este polímero, con buenos resultados.^{63,64}

No se han encontrado más referencias bibliográficas sobre la utilización de residuos de espumas de poliuretano como adiciones o cargas de una matriz de yeso aligerada, para la obtención de materiales ligeros aplicados a la construcción de edificios.

Sin embargo, se considera que los productos de residuos de poliuretano-yeso podrían ser potencialmente competitivos con los productos convencionales aceptados actualmente para revestimientos de paredes y techos, debido a las propiedades que previsiblemente tendrán estos materiales compuestos.

3.2.1.2 Residuo de polvo de poliamida

Las poliamidas se encuentran en la naturaleza en los seres vivos en forma de polipéptidos (proteínas), así como en fibras naturales como la seda o la lana. La búsqueda de alternativas artificiales a estas fibras condujo, en la década de 1930, a Carothers^{65,66} a las primeras poliamidas alifáticas conocidas como nylons. A pesar de que inicialmente se desarrollaron como fibra, las poliamidas encuentran aplicación como compuestos de moldeo, extrusión, recubrimientos, adhesivos y materiales de colada, utilizadas en forma de polvo. En 1941,

⁶³ Gadea J, Rodríguez A, Campos PL, Garabito J, Calderón V. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cem Concr Compos* (2010), 32, 672-677.

⁶⁴ Gadea J, Calderón V, Rodríguez A, Junco C, Martín A, Campos P.L. Procedimiento de obtención de mortero aligerado con residuos de poliuretano espumado. Patente de invención (2009). Número de solicitud: P200902028.

⁶⁵ Carothers, W. H.; Berchet, G. J. *J Am Chem Soc* (1930) 52, 5289.

⁶⁶ Carothers, W. H.; Hill, J. W. *J Am Chem Soc* (1932) 54, 1566.

se ofrecieron los primeros compuestos de moldeo que actualmente se encuentran entre los materiales poliméricos más tenaces.

Las poliamidas son polímeros termoestables de estructura cristalina, lo que contribuye a su rigidez, firmeza y resistencia térmica. Su tratamiento resulta más difícil que el de los materiales termoplásticos, ya que su temperatura de transición vítrea (T_g) es elevada. Las propiedades de las poliamidas, en general, son su baja viscosidad antes del curado, estabilidad térmica, resistencia química, poca fluencia y relajación por tensión⁶⁷. Por este motivo, son ampliamente utilizadas en diferentes aplicaciones del sector de la construcción y del sector industrial. En este último campo, y más concretamente en el sinterizado láser (LS), la poliamida PA2200 entre otras, es comúnmente utilizada como materia prima para la fabricación de piezas funcionales⁶⁸.

En el sector de la construcción y de la ingeniería civil, y más específicamente, en el estudio de materiales de construcción, se conocen referencias en su utilización en forma de fibra, con el fin de mejorar las resistencias a flexotracción de yesos⁶⁹, morteros y hormigones⁷⁰.

⁶⁷ Calderón V, García F.C, Peña J.L, Maya E.M, García J.M. Synthesis and characterization of new aromatic polyamides bearing crown ethers or their dipodal counterparts in the pendant structure. I. Benzo-12-crown-4 and ortho-bis(2-ethoxyethoxy) benzene. *J Polym Sci Part A: Polym Chem* (2006), 44, 70-81.

⁶⁸ Beal V.E, Paggi R.A, Salmoria G.V, Lago A. Statistical evaluation of laser energy. Density effect on mechanical properties of polyamide parts manufactured by selective laser sintering. *J Appli Polym Sci* (2009), 113, 10-19.

⁶⁹ Eve S, Gomina M, Jernot J.P, Ozouf J.C, Orange G. Microstructure characterization of polyamide fibre/latex-filled plaster composites. *J Eur Ceram Soc* (2007), 27, 17-25.

⁷⁰ Haghi, A.K., Arabani M, Ahmadi H. Applications of expanded polystyrene (EPS) beads and polyamide-66 in a civil engineering, Part One: Lightweight polymeric concrete. *Compos Interfaces* (2006), 13 (4-6), 41-50.

No se han encontrado más referencias bibliográficas sobre la utilización de poliamida en polvo como agregado ligero de materiales conglomerantes de cemento o de yeso/escayola enmarcados en el sector de la edificación. Por ello, se puede considerar que el residuo de poliamida en polvo, como componente aligerante de los productos de residuos de poliamida-yeso, podría ser potencialmente competitivo con los productos convencionales aceptados actualmente para revestimientos de paredes y techos, debido a las propiedades que previsiblemente tendrán estos materiales compuestos.

Capítulo IV: Experimental

4 Experimental

A continuación se exponen las diferentes técnicas instrumentales y equipos utilizados en la presente Tesis Doctoral.

4.1 Difracción de rayos X (DRX)

Con el objetivo de determinar cualitativamente la composición mineralógica del yeso empleado, se ha llevado a cabo el análisis mediante la técnica de difracción de rayos X, utilizando para ello un difractómetro PHILIPS PW1830 (Figura 4.1), que proporciona la cantidad de componentes mineralógicos del yeso en forma de óxidos.



Figura 4. 1. Difractómetro de rayos X

4.2 Espectroscopía infrarroja (FT-IR)

Se ha realizado el análisis del yeso, mediante espectroscopía infrarroja y transformada de Fourier, para complementar el estudio cualitativo de la difracción de rayos X. Los espectrofotómetros utilizados fueron un ATTI MATTSON Génesis y un Nicolet 6700 de Thermo Scientific (Figura 4.2).

En todas las determinaciones se utilizó el método del comprimido de bromuro potásico. Para ello se mezcló 1 mg de muestra sólida con 300 mg de bromuro potásico en mortero de ágata y posteriormente se compactó a vacío en un troquel especial hasta obtener un disco transparente que se coloca en la trayectoria del haz. Los espectros se obtuvieron a partir de 64 barridos en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} .

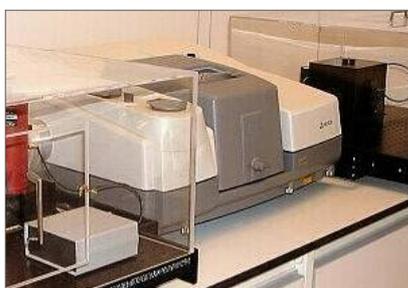


Figura 4. 2. Espectrofotómetro infrarrojo

4.3 Análisis elemental (CHNS)

Se ha realizado el análisis elemental para la determinación cuantitativa de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, en los diferentes tipos de polímeros utilizados como adición, con un analizador LECO CHNS-932 (Figura 4.3). La técnica de análisis está totalmente automatizada, y se basa en la combustión de las muestras en condiciones óptimas ($T=950-1100^{\circ}\text{C}$, atmósfera de oxígeno puro) para convertir los elementos en gases simples (CO_2 , NO_2 , H_2O y SO_2) consiguiendo una determinación cuantitativa.



Figura 4. 3. Analizador elemental

4.4 Granulometría por difracción de rayos láser

Con el objetivo de determinar la distribución del tamaño de grano de los residuos poliméricos utilizados y la curva granulométrica del yeso empleado, se ha llevado a cabo la técnica de granulometría láser. Se utilizó un analizador HELOS 12K de la marca SYMPATEC (Figura 4.4). Las muestras se analizaron suspendidas en alcohol isopropílico, con un tiempo de medida de 15 segundos.



Figura 4. 4. Analizador láser para determinación de la granulometría

4.5 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico se ha empleado tanto para comprobar la degradación de los polímeros utilizados, como para determinar la cantidad de polímero presente en los materiales de yeso-polímero. El ensayo se realizó con un TGA-DSC-DTA modelo TA Instruments con doble brazo (Figura 4.5), uno para la muestra y otro para la referencia, con programa de evolución de la temperatura en atmósfera de nitrógeno, con una rampa de temperatura de 10°C/min desde temperatura ambiente hasta los 800°C. Se pesaron aproximadamente 15 mg de cada muestra.



Figura 4. 5. TGA

4.6 Medida de los parámetros reológicos

Esta técnica ha sido utilizada con el objetivo de caracterizar, desde un punto de vista reológico, la influencia de los polímeros en las pastas de yeso en ausencia y presencia de aditivos. El equipo empleado ha sido un viscosímetro HAAKE RHEOWIN PRO RV1 con un rotor cilíndrico (Z38/S) con acanaladuras para evitar fenómenos de deslizamiento de las pastas (Figura 4.6). El viscosímetro dispone de un sistema de recirculación de

agua acoplado al sistema, que permite mantener la temperatura deseada en el equipo.



Figura 4. 6. Viscosímetro Haake Rheowin PRO RV1

4.7 Medida de la consistencia de las pastas

Para medir la consistencia de las pastas se han seguido dos procedimientos diferentes en función del ensayo a realizar. En el caso de la caracterización de la consistencia, para encontrar mezclas trabajables, se utilizó el método de la mesa de sacudidas. Sin embargo, para obtener la fluidez de las pastas se empleó el método de la medida de la fluidez de la pasta. Ambos métodos se describen en la norma UNE-EN 13279-2:2006⁷¹.

⁷¹ UNE-EN 13279-2:2006. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2. Métodos de ensayos.

4.7.1 Método de la mesa de sacudidas

Con el objetivo de encontrar una consistencia correspondiente a una adecuada trabajabilidad de todas las mezclas, la relación agua/conglomerante fue determinada mediante el método de ensayo y error con la mesa de sacudidas (Figura 4.7). El procedimiento operatorio consistió en amasar las diferentes pastas de yeso de forma manual durante un minuto y, a continuación, durante otro minuto en mezcladora amasadora mecánica de la marca PROETI a baja velocidad (140 ± 5) min^{-1} en rotación y (62 ± 5) min^{-1} en movimiento planetario. Seguidamente, se rellenó un molde troncocónico previamente colocado en el centro de la mesa de sacudidas. Después de la retirada del molde se aplicaron 15 sacudidas a una velocidad constante de 1 golpe por segundo. El diámetro final de la galleta se midió en dos direcciones perpendiculares entre sí, consiguiendo en todos los casos un diámetro de (165 ± 5) mm.

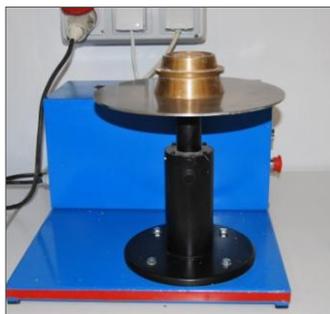


Figura 4. 7. Mesa de sacudidas

4.7.2 Método de la fluidez de la pasta

Se ha utilizado este método para comparar el parámetro de viscosidad obtenido mediante el viscosímetro rotacional en pastas de yeso con

polímero en presencia y ausencia de aditivos. Se prepararon las pastas mezclándolas durante 3 minutos manualmente. La cantidad de agua es la determinada para obtener una relación agua/conglomerante fijada previamente. Transcurrido el tiempo de mezclado, los componentes se introdujeron en un molde troncocónico de dimensiones 40 mm de altura, 65 mm de diámetro interno superior y 75 mm de diámetro interno inferior apoyado en una placa de vidrio. Posteriormente se levantó el molde y se midió el diámetro de escurrimiento de la galleta en dos direcciones perpendiculares entre sí (Figura 4.8).

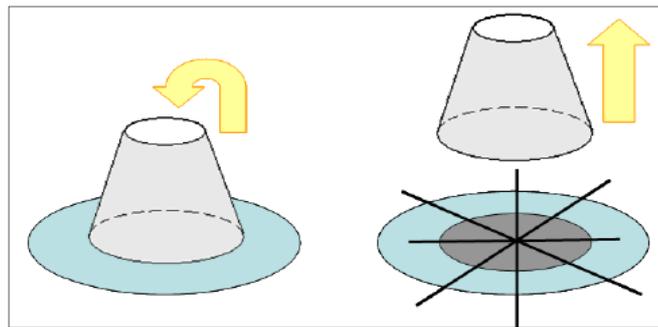


Figura 4. 8. Ensayo de la fluidez de la pasta

4.8 Medida del principio de fraguado de las pastas

4.8.1 Método de la aguja de Vicat

Se ha empleado la aguja de Vicat para determinar el principio de fraguado de todas las dosificaciones, según el método descrito en la norma UNE-EN-13279-2:2006. Una vez amasada cada pasta, se procedió a rellenar con la misma un molde troncocónico de caucho dejando caer el dispositivo de Vicat de la marca IBERTEST (Figura 4.9). En todos los

casos, el principio de fraguado se alcanzó cuando el dispositivo penetró en la pasta una profundidad de (22 ± 2) mm.



Figura 4. 9. Aguja de Vicat

4.9 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis por energías dispersas (EDX)

Esta técnica se utilizó para examinar la estructura microscópica de las muestras de yeso en presencia y ausencia de residuo polimérico y aditivos y fibras. El equipo de medida utilizado fue un FSEM HITACHI S-4800 (Figura 4.10) siendo la tensión de aceleración de 20KV y la intensidad de corriente $20\mu\text{A}$, la distancia de trabajo fue variable y el detector EDX Bruker XFlash-5030 con ventana de silicio. El recubrimiento de las muestras se realizó con carbono.



Figura 4. 10. Microscopio electrónico de barrido

4.10 Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)

La medida del porcentaje de tamaño y volumen de los poros de las mezclas se determinó mediante porosimetría de intrusión de mercurio (MIP). El procedimiento operatorio se basa en la introducción de mercurio a altas presiones en los poros del material. El equipo utilizado fue un MICROMETRICS AUTOPORE IV 9500, que alcanza presiones de hasta 32.000 Psi, lo que equivale a la determinación de tamaños de poro de hasta 0,0067 μm (Figura 4.11).

Esta técnica se ha empleado en las pastas de yeso, en presencia y ausencia de residuo de poliamida, con el objetivo de identificar los poros de tamaño comprendido entre aproximadamente 170 y 0,0067 μm



Figura 4. 11. Equipo de intrusión de mercurio

4.11 Tomografía axial computarizada (TAC)

Se ha empleado la técnica de tomografía axial computarizada (TAC) para determinar cuantitativamente la macroporosidad de las muestras, es decir, los poros de tamaño mayor a $170\ \mu\text{m}$. El equipo consta de un sistema de rayos X con un tubo Yxlon de 225 Kv/30mA con cabina metálica de acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina, la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de su superficie externa no excede de $2,5\ \mu\text{Sv/h}$ (Figura 4.12).

Esta técnica se ha empleado en las pastas de yeso, en presencia y ausencia de residuo de poliamida, para completar el estudio de porosidad mediante MIP, y en las pastas de yeso en presencia y ausencia de residuo de poliuretano, para determinar su macroporosidad.



Figura 4. 12. Equipo para Tomografía Axial Computarizada (TAC)

4.12 Medida de la resistencia mecánica a flexión y a compresión

La determinación de las resistencias mecánicas a flexión y compresión fue realizada con una prensa multifuncional de rotura electromecánica, marca SUZPECAR-Sistemas de ensayos, modelo MEM-101/SDC, con equipo de medida y control digital de fuerza conforme a la norma UNE-EN 13279-2:2006 (Figura 4.13). Para obtener la resistencia a flexión se ensayaron tres probetas de dimensiones $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ aplicando una carga vertical en cada probeta apoyada sobre rodillos separados una distancia de 100 mm a una velocidad de $(20 \pm 1) \text{ N/s}$ hasta rotura. La resistencia a compresión se realizó sobre las mitades obtenidas tras el ensayo a flexión, sobre una superficie de $(40 \times 40) \text{ mm}^2$, a una velocidad de $(100 \pm 10) \text{ N/s}$ hasta rotura.



Figura 4. 13. Prensa multifuncional de rotura a flexión y a compresión

4.13 Medida de la dureza Shore C

La dureza Shore C determina la dureza superficial de los yesos y establece la huella dejada por una fuerza ejercida sobre cada probeta de

ensayo, medida directamente en unidades Shore C, de 0 (más blando) a 100 (el más duro). La Figura 4.14 muestra el equipo de medición de la dureza superficial Shore C.

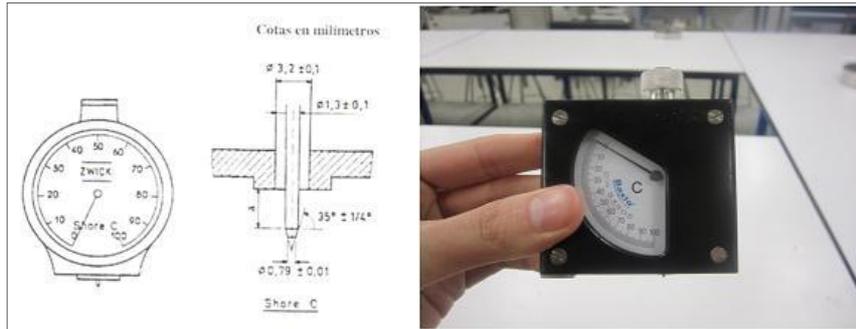


Figura 4. 14. Durómetro Shore C

4.14 Medida de la permeabilidad al vapor de agua

La metodología utilizada para calcular la permeabilidad al vapor de agua en estado estacionario se ha determinado mediante la norma UNE-EN 1015-19:1999⁷², en la que se especifica que, para encontrar la permeabilidad, hay que hallar el flujo de vapor de agua que pasa a través del área de una probeta en condiciones de equilibrio por diferencia de presión entre ambas caras de la probeta. Para determinar la permeabilidad de todas las muestras, se prepararon para cada serie, cinco probetas cilíndricas de 15 mm de espesor. A continuación, cada probeta se colocó sobre un recipiente que contenía disolución saturada de nitrato potásico, que proporciona una humedad relativa del 93,2% a 20°C, y se selló con parafina, dejando una cámara de aire entre la

⁷² UNE-EN 1015-19:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido.

disolución y la superficie inferior de la probeta de 10 mm (Figura 4.15). Cada recipiente fue pesado durante un mínimo de diez días anotando su pérdida de masa y representándola en función del tiempo. De esta manera se determinó el flujo de vapor de agua a partir del cual, se calculó la permeanza en $\text{Kg/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$. Finalmente, la permeabilidad se halló como resultado de multiplicar el valor de la permeanza por el espesor de la probeta. Para dar el valor final de cada serie se utilizó el valor medio de todas ellas.

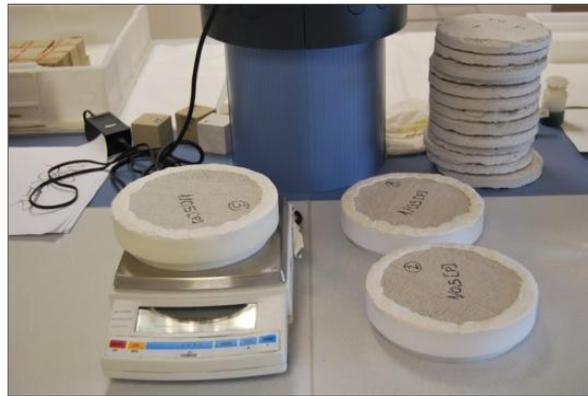


Figura 4. 15. Ensayo de permeabilidad

4.15 Medida de la adherencia

La adherencia se determina mediante la máxima carga de tracción que soporta un disco de aluminio pegado al yeso que a su vez ha sido aplicado sobre otro material, cuando se arranca de forma perpendicular a su superficie. En este Trabajo, se ha medido la adhesión sobre un soporte cerámico. El equipo de medida consiste en un aparato de tracción con un manómetro de lectura que registra la máxima carga de

tracción aplicada a una velocidad constante comprendida entre 0,003 N/mm² y 0,1 N/mm² por segundo (Figura 4.16).



Figura 4. 16. Equipo de determinación de la adherencia

4.16 Medida de la absorción por capilaridad

Este ensayo determina el nivel de ascensión de agua que experimentan las probetas de dimensiones (160x40x40) mm³ colocadas verticalmente sobre un recipiente lleno con agua hasta una profundidad de 10 mm durante un tiempo de 10 minutos (Figura 4.17). La metodología se ha llevado a cabo conforme a la norma RILEM TC 25-PEM, 1980⁷³

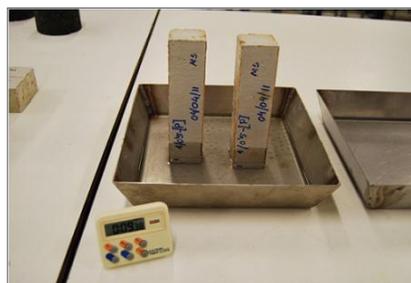


Figura 4. 17. Ensayo de absorción por capilaridad

⁷³ RILEM: Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Commission 25-PEM: 1980. Protection and Erosion des Monuments.

4.17 Determinación de la densidad real

Se ha determinado la densidad real de los materiales poliméricos utilizados en este Trabajo mediante el método del picnómetro, conforme a la norma UNE-EN 1936:2006⁷⁴. Para ello, cada muestra, previamente seca, se tamizó por el tamiz de 0,063 mm de luz de malla, introduciéndose 10 gramos de la muestra tamizada en un picnómetro que posteriormente se llenó con alcohol isopropílico (Figura 4.18).



Figura 4. 18. Picnómetro para determinar la densidad real

4.18 Determinación de la densidad aparente y de la capacidad de retención de agua

Se ha medido la densidad aparente de las probetas mediante el método tradicional de Peso/Volumen, conforme a la norma UNE-EN 1936:2006, tanto en estado húmedo (nada más desmoldar), como en estado seco (secadas en estufa hasta peso constante a 35-40°C a los 7 días). Para determinar la capacidad de retención de agua, se halla la relación:

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

⁷⁴ UNE-1936:2006. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

Donde d_{ah} es la densidad aparente húmeda en el momento de desmoldar la probeta y d_{as} es la densidad aparente seca a los 7 días, después de ser curada a 35-40°C en estufa.

4.19 Medida del flujo de calor

Se ha establecido la conductividad térmica de todas las dosificaciones según la norma UNE-EN 12667:2002⁷⁵, determinando la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor, donde se establece una relación constante y una uniformidad en la relación de la densidad del flujo de calor en el interior de muestras homogéneas de (300x300x30) mm³ y caras planas paralelas. Las probetas fueron secadas a temperatura de 35-40°C hasta masa constante y medidas en el equipo Láser Comp FOX 304 de medición del flujo de calor (Figura 4.19).



Figura 4. 19. Equipo Láser Comp FOX 304 de medición del flujo de calor

⁷⁵ UNE-EN 12667:2002. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método de medidor del flujo de calor.

4.20 Medida del aislamiento acústico

El procedimiento para hallar el aislamiento acústico en probetas de yeso en presencia y ausencia de residuo de poliuretano gris, se ha llevado a cabo según la norma UNE-EN 20140-10: 1992⁷⁶, que consiste en determinar los decibelios de cada muestra calculados para bandas de frecuencia entre 500 y 10 Hz y 500 y 4 Hz. Las probetas de dimensiones (400x400x30) mm³ y caras planas paralelas fueron secadas a temperatura de 35°C hasta masa constante y medidas en el equipo Petite Cabine con analizador PULSE v 14 de Brüel & Kjaer de 5 canales (Figura 4.20.). Las condiciones de temperatura y humedad durante el ensayo son de 21±1°C y Humedad relativa de 50±5%.

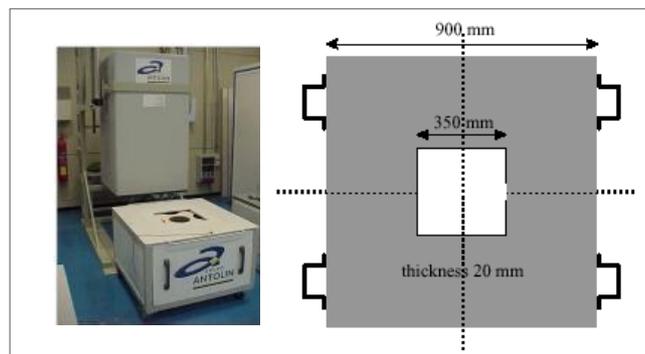


Figura 4. 20. Equipo Petite Cabine de medición de la absorción acústica

⁷⁶ UNE-EN 20140-10:1992. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción.

Capítulo V: Caracterización de materiales

5 Caracterización de materiales

5.1 Introducción

En la investigación realizada en esta Tesis Doctoral se acomete el análisis de los materiales compuestos formados por una matriz de yeso aligerada con diferentes tipos de residuos poliméricos, así como su posterior refuerzo mediante la adición de fibras y aditivos.

A continuación se describen las materias primas y se presenta la caracterización de las mismas, detallando la metodología utilizada en todos los casos.

5.1.1 Yeso

El conglomerante utilizado ha sido un yeso de construcción normalizado B1/20/2, de acuerdo a la norma UNE-EN 13279-1:2009, anteriormente conocido como yeso grueso (YG), según el Pliego de Recepción de Yesos RY-85, que procede de la empresa Yesos Albi, S.A., en su factoría de Villalómez (Burgos) (Figura 5.1).



Figura 5. 1. Yeso de construcción B1/20/2

El yeso se ha caracterizado mineralógicamente mediante difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja (FT-IR) y físicamente determinando su densidad real y su distribución del tamaño de partícula.

5.1.2 Agua

El agua utilizada en los ensayos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Burgos, es el agua potable suministrada por la empresa Aguas de Burgos, S.A. El agua proviene de las estribaciones de la Sierra de la Demanda, perteneciente al Sistema Ibérico, en la vertiente que desagua en la provincia de Burgos. Previamente a su utilización, se acondiciona en la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) de Arlanzón, desde donde se canaliza hasta la ciudad de Burgos.

El agua empleada en los ensayos realizados en el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento de Madrid (CSIC), es agua potable suministrada por el Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid. El agua captada en los embalses de la Sierra de Guadarrama es conducida hasta las estaciones de tratamiento para su potabilización.

Estas aguas son destinadas al consumo y están perfectamente tratadas, libres de cualquier impureza. No incorporan productos alcalinos o sales que pudieran interferir en los procesos de fraguado y endurecimiento del yeso. Los parámetros que caracterizan el agua utilizada, tanto en los ensayos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Burgos como en los realizados en el Instituto Eduardo Torroja de Madrid, se referencian en las Tablas 5.1 y 5.2, respectivamente.

Parámetro	Valor (mg/L)
pH	8,86
Turbidez	0,17
Conductividad	47,70
Amonio	0,01
Hierro	0,06
Manganeso	0,00
Aluminio	0,06
Cloro libre	0,39
Cloro Total	0,45
Calcio	4,68
Carbonatos	14,02
Cloruros	1,77
Sulfatos	6,50

Tabla 5. 1. Características del agua utilizada en los ensayos realizados en Burgos. (*Análisis facilitado por el Servicio de Aguas Municipal del Excmo. Ayuntamiento de Burgos, 2010*)

Parámetro	Valor (ppm)
pH	8,12
Estroncio	0,24
Hierro	0,02
Manganeso	0,01
Aluminio	0,03
Silicio	1,48
Cobre	0,35
Calcio	19,84
Magnesio	4,56
Zinc	0,43
Potasio	1,94
Azufre	9,12

Tabla 5. 2. Características del agua utilizada en los ensayos realizados en Madrid (*Análisis realizado en las instalaciones del IETcc, 2011*)

5.1.3 Residuos poliméricos

Los residuos poliméricos empleados como cargas aligerantes de la matriz del yeso son de dos tipos: espumas de poliuretano (rígida y semirrígida) y poliamida en polvo.

5.1.3.1 Espumas de poliuretano

Se han empleado dos residuos de poliuretanos diferentes, uno de ellos que identificaremos por su color gris, procedente de la industria del automóvil y el otro de color blanco, que proviene de la fabricación de poliuretano para aislamiento térmico en la industria de la construcción y del frío.

Poliuretano Gris: espuma semirrígida que procede del material sobrante del proceso de fabricación de paneles aislantes para techos de automóviles en la factoría que Grupo Antolín posee en Burgos. Los paneles tienen unas dimensiones aproximadas de 1,60 x 1,00 metros y un espesor de 1 cm. El material se encuentra almacenado en un local interior de modo que no ha estado sometido a la acción de agentes atmosféricos.

Los paneles de espuma gris son triturados y tamizados mediante Molino RETSCH SM100, empleando un tamiz de 4,00 mm de luz de malla (Figuras 5.2 y 5.3).

Poliuretano Blanco: espuma rígida que procede del material sobrante del proceso de fabricación de paneles aislantes para el sector de la construcción y de la refrigeración, en la factoría que Praxsa tiene en Burgos. Este residuo se puede adquirir de la fábrica directamente

triturado o en forma de panel. En este trabajo se ha elegido el polímero triturado en forma de partículas de granulometría fina (Figura 5.4).



Figura 5. 2. Molino con tamizadora RESTCH SM100



Figura 5. 3. Secuencia de obtención de la espuma gris triturada



Figura 5. 4. Espuma de poliuretano blanco

Las espumas, antes de ser trituradas y empleadas como sustituto del yeso, han sido estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido. La composición química se obtuvo mediante análisis elemental CHNS

Se ha determinado el tamaño de partícula de las espumas mediante granulometría de difracción de rayos láser. Las muestras se analizaron suspendidas en alcohol isopropílico, con un tiempo de medida de 15 segundos.

5.1.3.2 Poliamida en polvo

La poliamida procede de los residuos de la materia prima utilizada en el sinterizado láser de fabricación de piezas funcionales para el sector industrial (Figura 5.5).



Figura 5. 5. Sinterizador Láser y piezas de poliamida obtenidas por sinterizado

La poliamida empleada es del tipo PA 2200, y ha sido empleada como materia prima un número limitado de veces para producir piezas funcionales. Después de alcanzar su vida útil, se reutiliza en su forma original pulverulenta como carga aligerante en yesos (Figura 5.6).

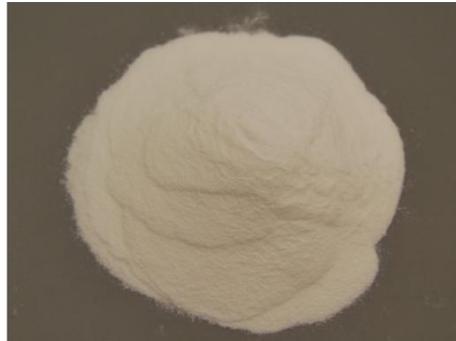


Figura 5. 6. Poliamida en polvo

El residuo de poliamida fue caracterizado microscópicamente, mediante microscopía electrónica de barrido rápido (FSEM), químicamente mediante el análisis elemental CHNS y físicamente determinando su densidad aparente y real y su distribución del tamaño de partícula.

5.1.4 Fibras de refuerzo

Incorporar fibras en una matriz de yeso o escayola produce, en general, un aumento de la resistencia a flexión, un incremento de la energía de rotura al impacto y un mejor comportamiento ante el fuego. Estas mejoras dependen del tipo de fibra, del porcentaje de fibra añadido, de su geometría, de su orientación y de su grado de dispersabilidad⁷⁷. Por tanto, y debido a que la introducción de espumas poliméricas aligeradas disminuyen las resistencias mecánicas de manera progresiva, se ha llevado a cabo el análisis de los efectos que produce la adición de diversas fibras de refuerzo en estos materiales.

⁷⁷ Del Río M, Comino P. Analysis of the strengthenings of mixed glass fibers E and fibers AR in plaster, as an alternative to monofiber (homogeneous) strengthening. Mater Constr (2002), 52, 268, 33-42.

Las fibras utilizadas en los ensayos son algunas de los que se incluyen habitualmente en los yesos preparados, y se muestran a continuación:

1. Fibras de polipropileno (Fibermesh®). El aspecto de este tipo de fibras puede observarse en la Figura 5.7.



Figura 5. 7. Fibras de polipropileno Fibermesh

2. Fibras de polipropileno (SikaCim®). La apariencia de este tipo de fibras puede verse en la Figura 5.8.



Figura 5. 8. Fibras de polipropileno SikaCim

3. Fibras de celulosa (recicladas). Este tipo de fibras proceden de los residuos obtenidos a partir de la fabricación de papel de la industria Piravam Paper Mill, Kerala (India). Previa utilización como fibras de refuerzo en la matriz de yeso, se someten a un proceso de triturado para obtener un mayor grado de dispersabilidad (Figura 5.9).



Figura 5. 9. Proceso de triturado de las fibras de celulosa

5.1.5 Aditivos

Los aditivos utilizados en la fabricación de las mezclas, son algunos de los que se incluyen habitualmente en los yesos preparados. Hoy en día, los aditivos constituyen, junto con el yeso, el agua, y las fibras, el cuarto elemento en la composición de yesos de construcción y en elementos prefabricados a base de yeso.

El empleo de estos compuestos responde a las necesidades del usuario en función de las prestaciones que requiera el material. Es habitual la utilización de retardadores, aceleradores, aireantes, espumantes, plastificantes y superfluidificantes⁷⁸. Todos ellos deben ser prescritos de acuerdo con las indicaciones que expresamente haga el fabricante y en las dosis señaladas.

Los aditivos utilizados en este estudio son de la firma comercial SIKA y corresponden a la gama de superfluidificantes y reductores de agua y de emulsiones adhesivas. La elección de estos aditivos se justifica por un lado, para la mejora de algunas de las propiedades de productos de yeso y, por otro lado, por ser muy habitual para su fabricación, según las

⁷⁸ Del Río M, Hernández Olivares F. Reinforced plaster by means of the synergic action between concrete additives (superfluidifiers, fluidifiers and airing-plasticizers) and E glass fibres. *Mater Constr* (2000), 50, 260, 27-38.

recomendaciones del fabricante. A continuación se describen los aditivos empleados (Figura 5.10):

1. Superplastificante a base de policarboxilatos (Sika® Viscocrete® G2).
2. Superplastificante a base de melaminas (Sikamix 3300®).
3. Emulsión adhesiva sintética de estireno-butadieno (Sika® Latex).



Figura 5. 10. Aditivos Sikamix 3300, SikaLatex y Viscocrete

5.2 Caracterización de las materias primas

5.2.1 Caracterización del yeso

Según los datos del fabricante, el yeso empleado presenta un índice de pureza del 87,66%.

5.2.1.1 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica del yeso se determinó a través de dos técnicas:

1. Difracción de rayos X. Los datos de difracción de rayos X de polvo del yeso normalizado se obtuvieron con la técnica descrita en el Apartado 4.1.

La Figura 5.11 muestra el difractograma del yeso, y en la Tabla 5.3 se muestra su composición mineralógica cualitativa determinada por DRX.

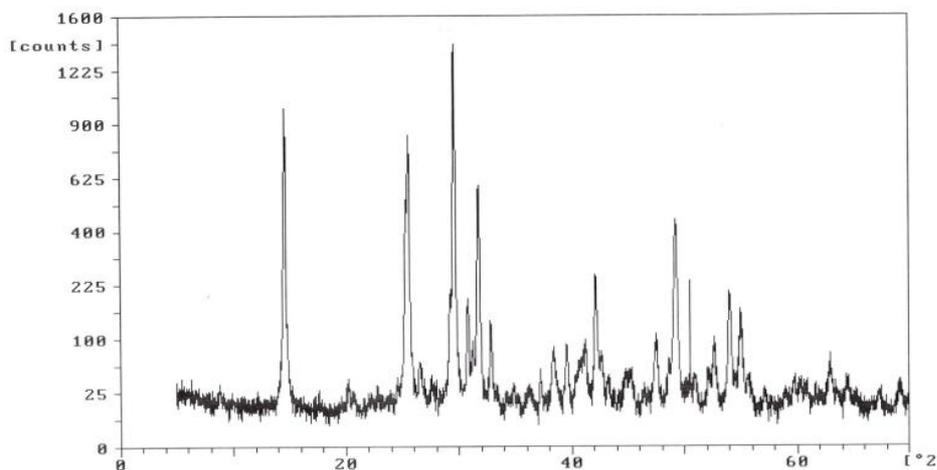


Figura 5. 11. Difractograma del yeso de construcción B1

Hemihidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	A
Anhidrita	CaSO_4	B-M
Cuarzo	SiO_2	B
Dolomita	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	B
Moscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	B
<i>Concentración estimada: A = alto, M = medio, B = bajo</i>		

Tabla 5. 3. Composición mineralógica del yeso obtenida por difracción de rayos X

A la vista de estos resultados, se puede observar que la difracción identificó sulfato cálcico hemihidratado como componente mayoritario, anhidrita en concentración media, y cuarzo, dolomita y moscovita como componentes minoritarios del yeso.

2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. Previamente se tamizó el yeso en 4 fracciones diferentes, de 0-0,5 mm (M1), de 0,5-1 mm (M2), de 1-2 mm (M3) y de 2-4 mm (M4) (Figura 5.12). El espectro de cada fracción se obtuvo según lo descrito en el Apartado 4.2.



Figura 5. 12. Fracciones del yeso ensayado por espectroscopía infrarroja

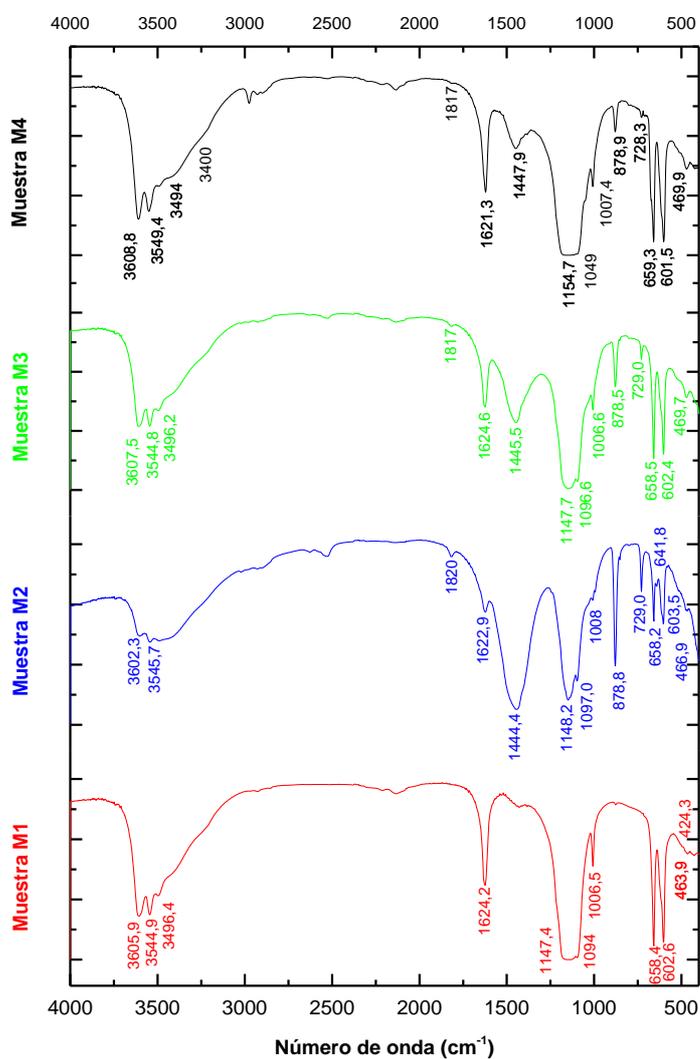


Figura 5. 13. Espectros FTIR del yeso sintetizado

En la Figura 5.13 se presentan los espectros FTIR de las diferentes fracciones del yeso. En todas ellas se observan señales entre 3610 cm^{-1} y 3550 cm^{-1} , correspondientes a las bandas de tensión de los grupos O-H del agua (aproximadamente 3494 cm^{-1}) y del hemihidrato (aproximadamente 3610 cm^{-1} y a 3545 cm^{-1}). Se distingue, además, a 1624 cm^{-1} la banda de vibración H-O-H del agua del hemihidrato.

Sobre los 1148 , 1097 y 1007 cm^{-1} se localizan las bandas de tensión de los grupos sulfato del hemihidrato y aproximadamente a 602 y a 659 cm^{-1} las de deformación.

Las muestras M2, M3 y M4 presentan impurezas en forma de carbonatos (dolomita) tal y como revela la señal de vibración de tensión de los grupos carbonato (CO_3^-) a 1445 cm^{-1} , y las señales de deformación a 879 y a 729 cm^{-1} ⁷⁹.

Se observan bandas entre aproximadamente 1006 cm^{-1} y 1150 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones de tensión de los grupos sulfato (SO_4^-) del hemihidrato.

5.2.1.2 Caracterización física

1. Determinación de la densidad real. Se utilizó el método del picnómetro según lo descrito en el Apartado 4.17.

La densidad real del yeso fue de $2,32\text{ gr/cm}^3$.

2. Granulometría de difracción por rayos láser. Según lo descrito en el Apartado 4.4. Para los tamaños superiores a $1750\text{ }\mu\text{m}$, se añadió un

⁷⁹ Huang C.K, Kerr P.F. The American mineralogist. Infrared study of the carbonate minerals (1960), 45, 311-324.

tamizado mecánico con tamices normalizados para completar la curva granulométrica.

La Figura 5.14 muestra el porcentaje acumulado del yeso. En la Tabla 5.4 se muestran los valores del tamaño de partícula del 10, 50 y 90 % en volumen del yeso.

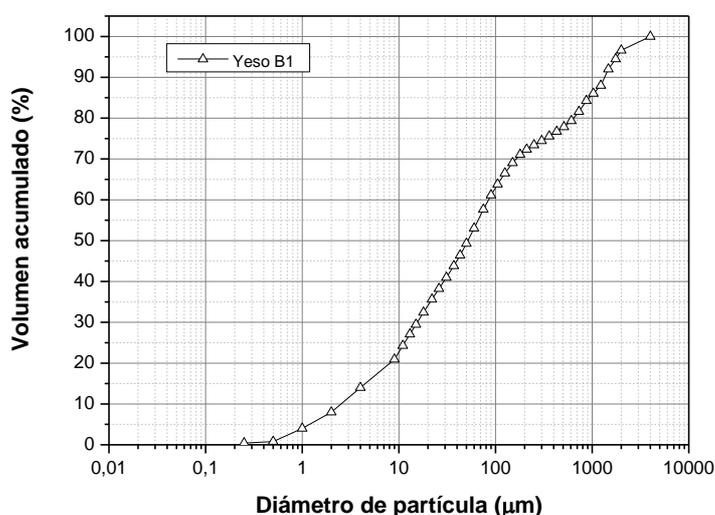


Figura 5. 14. Porcentaje acumulado del yeso B1

10% de la muestra con tamaño inferior (μm)	50% de la muestra con tamaño inferior (μm)	90% de la muestra con tamaño inferior (μm)
2,62	50,10	1321,00

Tabla 5. 4. Tamaño de partícula del 10, 50 y 90 % del yeso B1

A la vista de los resultados se puede observar que el 10% de la muestra presenta tamaños inferiores a 2,62 μm , el 50% del material tiene tamaños inferiores a 50,10 μm y el 90% posee tamaños inferiores a 1321 μm .

5.2.2 Caracterización de los residuos de poliuretano

5.2.2.1 Caracterización química y microscópica

1. Análisis Elemental CHNS. Se ha determinado cuantitativamente el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno en los diferentes tipos de poliuretano, con la técnica descrita en el Apartado 4.3.
2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Se ha observado la estructura microscópica de los dos poliuretanos, según lo descrito en el Apartado 4.9.

Tal y como se observa en las Figuras 5.15, y 5.16, ambas espumas presentan una estructura celular. Las celdas de la espuma gris aparecen abiertas en algunas zonas, debido probablemente al proceso de manipulación o corte de la espuma. En cuanto al poliuretano blanco, se observa que presenta una estructura celular de celda cerrada, con celdas homogéneamente distribuidas en cuanto a tamaño y forma.



Figura 5. 15. Análisis elemental y microscopía electrónica de barrido de la espuma de poliuretano gris

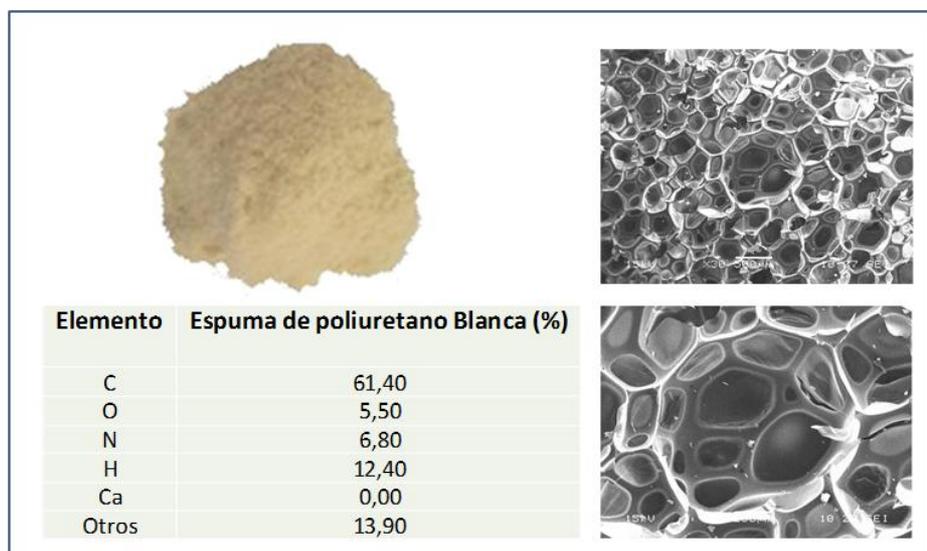


Figura 5. 16. Análisis elemental y microscopía electrónica de barrido de la espuma de poliuretano blanca

5.2.2.2 Caracterización física

1. Determinación de la densidad real y aparente de la espuma de poliuretano triturada. La densidad real se obtuvo con el método del picnómetro según lo descrito en el Apartado 4.17. y la densidad aparente, según la metodología descrita en el Apartado 4.18.

La densidad real de ambos poliuretanos triturados ha sido de 1,22 gr/cm³ para la espuma gris y de 1,08 gr/cm³ para la espuma blanca, mientras que la densidad aparente ha sido de 68 kg/m³ para la espuma gris y de 72 kg/m³ para la espuma blanca.

2. Granulometría de difracción por rayos láser. Se ha determinado el porcentaje del volumen acumulado de cada espuma de poliuretano.

De los datos de las gráficas de la Figura 5.17 y de la Tabla 5.5, se observa que el poliuretano blanco (PUW) presenta un mayor volumen de

partículas con tamaño inferior a 1000 μm , por lo que podría considerarse más fino que el poliuretano gris (PUG).

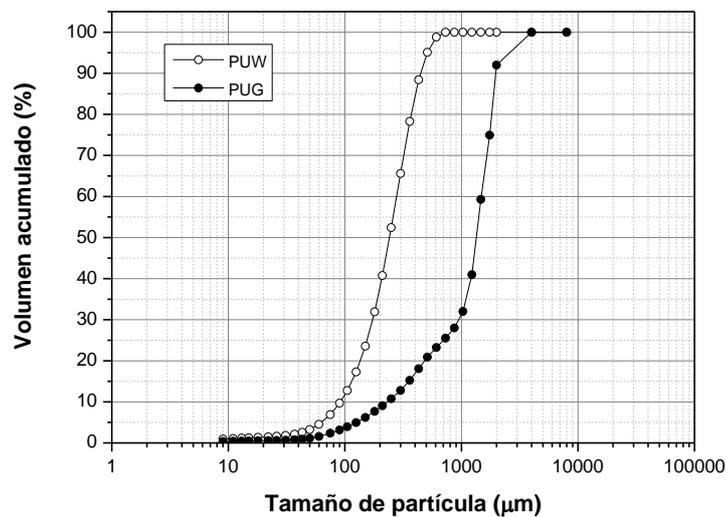


Figura 5. 17. Porcentaje acumulado del poliuretano blanco (PUW) y gris (PUG)

Tipo de polímero	10% de la muestra con tamaño inferior (μm)	50% de la muestra con tamaño inferior (μm)	90% de la muestra con tamaño inferior (μm)
Poliuretano Blanco (PUW)	90,21	261,10	470,14
Poliuretano Gris (PUG)	212,10	1493,22	2000,00

Tabla 5. 5. Tamaño de partícula del 10, 50 y 90 % del poliuretano blanco (PUW) y gris (PUG)

5.2.3 Caracterización de los residuos de poliamida

5.2.3.1 Caracterización química y microscópica

1. Análisis Elemental CHNS. Se ha determinado cuantitativamente el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno del polvo de poliamida, con la técnica descrita en el Apartado 4.3.
2. Microscopía Electrónica de Barrido Rápido (FSEM). Se ha observado la estructura microscópica de la poliamida en polvo, con la técnica descrita en el Apartado 4.9.

Los resultados obtenidos en ambas técnicas se representan en la Figura 5.18, donde se muestran la microestructura superficial y la porosidad de las partículas. Se observan partículas aisladas, en general redondeadas y de tamaño más o menos homogéneo comprendido entre 40 y 80 μm .

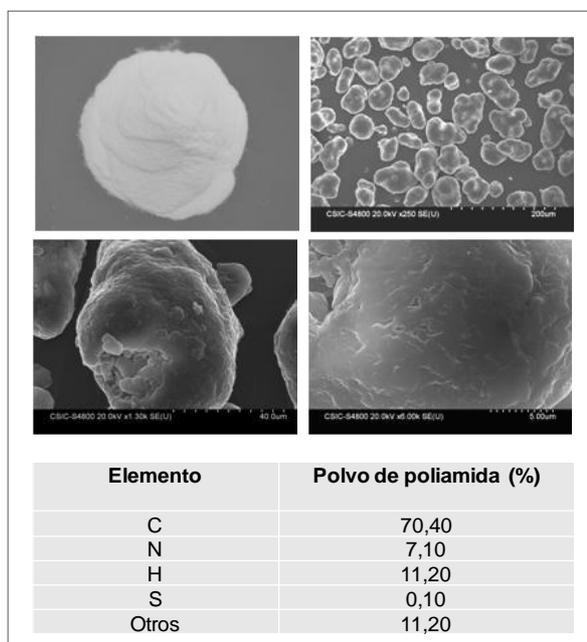


Figura 5. 18. Análisis elemental y microscopía electrónica de barrido de la poliamida

5.2.3.2 Caracterización física

1. Determinación de la densidad real y aparente de la poliamida en polvo, según lo descrito en los Apartados 4.17. y 4.18.

La densidad real de la poliamida fue de 1,07 gr/cm³ y la densidad aparente de 0,54 gr/cm³.

2. Granulometría de difracción por rayos láser. Se ha determinado el porcentaje del volumen acumulado de la poliamida según lo descrito en el Apartado 4.4., obteniendo como resultado la gráfica de la Figura 5.19.

A la vista de los resultados obtenidos de la Tabla 5.6 se puede observar que el 10% de la muestra de poliamida (PAW) presenta tamaños inferiores a 37,19 μm , el 50% tiene tamaños inferiores a 59,86 μm y el 90% son partículas inferiores a 85,69 μm , con un tamaño medio de 60 μm .

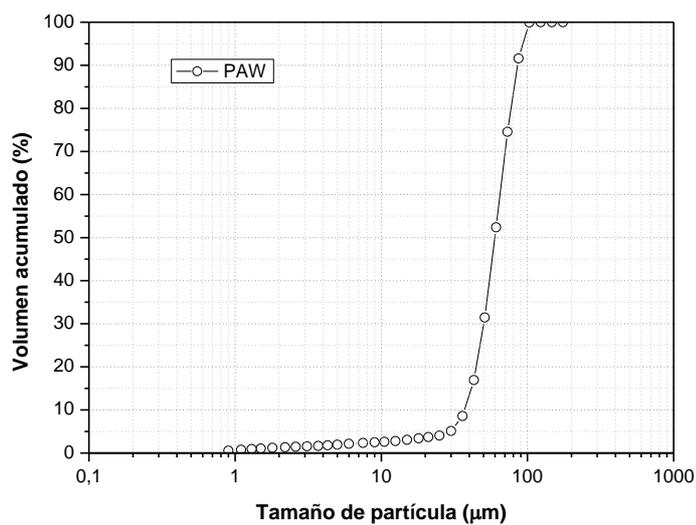


Figura 5. 19. Porcentaje acumulado de la poliamida (PAW)

Tipo de polímero	10% de la muestra con tamaño inferior (μm)	50% de la muestra con tamaño inferior (μm)	90% de la muestra con tamaño inferior (μm)
Poliamida (PAW)	37,19	59,86	85,69

Tabla 5. 6. Tamaño de partícula del 10, 50 y 90 % de la poliamida (PAW)

5.2.4 Caracterización de las fibras

5.2.4.1 Caracterización química y microscópica

1. Análisis Elemental CHNS. Se ha determinado cuantitativamente el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno en los diferentes tipos de fibra, con la técnica descrita en el Apartado 4.3.
2. Microscopía Electrónica de Barrido Rápido (FSEM). Se ha observado la estructura microscópica de los tres tipos de fibra, según lo descrito en el Apartado 4.9.

Los resultados obtenidos para ambas técnicas se muestran en la Figura 5.20, donde se pueden observar las diferentes texturas y dimensiones de las fibras.

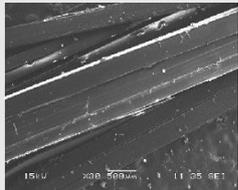
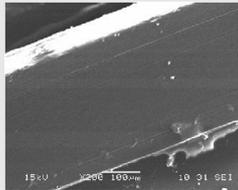
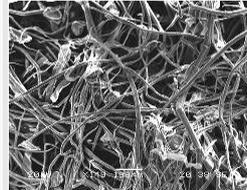
Fibra			
Elemento	Sika Cim (F1) (%)	Fibermesh (F2) (%)	Celulosa (C) (%)
C	83,08	81,18	41,27
N	0,11	0,18	0,05
H	13,12	15,12	6,08
S	-	-	0,02
Otros	3,69	3,52	52,58
SEM			

Figura 5. 20. Análisis elemental CHNS y microscopía electrónica de barrido de las fibras

En la Tabla 5.7 se recoge tanto la caracterización física de las fibras, como los porcentajes de dosificación empleados en las diferentes mezclas, calculados respecto del peso del yeso.

Fibra	Fibermesh	SikaCim	Celulosa reciclada
Naturaleza	Polipropileno	Polipropileno	Celulosa
Densidad (g/cm ³)	0,05*	0,11*	0,08*
Longitud (mm)	19	6	0,50
Diámetro (μm)	10	31	0,05
Dosificación (%)	1 y 2	1 y 2	1 y 3

Tabla 5. 7. Caracterización física de las fibras (*Densidad aparente)

5.2.5 Caracterización de los aditivos

Tanto la caracterización de los aditivos, como los porcentajes de dosificación empleados en las diferentes mezclas, se indican en la Tabla 5.8. La dosificación de los aditivos se hace con referencia a un % sobre la dosificación de yeso en peso, según las indicaciones del fabricante.

Aditivo	Sika Viscocrete G-2	Sikamix 3300	Sika Latex
Base química	Policarboxilatos	Melaminas	Butadieno-Estireno
Densidad (g/cm ³)	1,10	1,20	1,02
pH (23°C)	4,50	11,00	8,00
Dosificación (%)	0,4 y 0,8	0,4 y 0,8	2, 4 y 6

Tabla 5. 8. Características de los aditivos empleados

Capítulo VI: Caracterización de mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano

6 Caracterización de mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano

6.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo analizar la compatibilidad entre los dos tipos de residuos de espuma de poliuretano (PUG, PUW) y el yeso, incorporando al mismo tiempo, diferentes proporciones de volumen de polímero, para obtener un nuevo material de yeso aligerado. Las diferentes muestras se han caracterizado siguiendo los siguientes pasos:

1. Determinar las dosificaciones adecuadas con las diferentes proporciones de yeso/poliuretano.
2. Encontrar el procedimiento óptimo de mezclado de los componentes.
3. Caracterizar las pastas en estado fresco mediante:
 - a. La relación agua/yeso.
 - b. El tiempo de fraguado.
4. Determinar las propiedades de las mezclas en estado endurecido. Para ello se han definido los siguientes ensayos:
 - a. Densidad aparente húmeda y seca de las probetas.
 - b. Capacidad de retención de agua.

- c. Propiedades mecánicas a 7 y 28 días.
- d. Dureza superficial Shore C a 7 y 28 días.
- e. Adherencia sobre soporte cerámico.
- f. Absorción por capilaridad.
- g. Permeabilidad al vapor de agua.
- h. Porosidad. Estudio de los macroporos.
- i. Microscopía electrónica de barrido.
- j. Propiedades térmicas.
- k. Propiedades acústicas.

6.2 Justificación del porcentaje de sustitución de yeso por poliuretano

Para determinar el criterio de sustitución de yeso por poliuretano se han consultado trabajos previos de otros autores, donde se contempla la adición de cargas para aligerar la matriz de yeso, escayola o cemento. Posteriormente, se ha fijado el criterio de exigencias mecánicas de la norma UNE-EN 13279-1:2009 para los yesos de construcción y por último, se ha establecido un criterio medioambiental.

6.2.1 Estudios previos

Existen varios trabajos previos en el empleo de cargas aligerantes de materiales compuestos por yeso, escayola o cemento. Entre otros, se pueden citar los siguientes:

- Mezclas de yeso aligerado con corcho granulado que incluyen en su composición porcentajes de corcho en peso, comprendidos entre 10 y 20% respecto al peso seco del yeso⁸⁰.
- Mezclas de yeso aligerado con poliestireno expandido (EPS) en porcentajes comprendidos entre 1,6 y 3,0% respecto al peso seco del yeso y mezclas de escayola para aplicaciones de panel con porcentajes de poliestireno expandidos comprendidos entre 6,4 y 35,1%⁸¹.
- Mezclas de yeso con gel de sílice macroporoso en porcentajes en volumen comprendidos entre 25, 50 y 75% respecto al peso seco del yeso⁸².
- En el campo de los morteros, se han estudiado mezclas con residuos de poliuretano, con sustituciones en volumen de arena por poliuretano de 25, 50, 75 y 100%⁸³.
- Hormigón aligerado con residuos de espuma rígida de poliuretano con porcentajes de sustitución de arena por poliuretano, en volumen, comprendidos entre 13,1 y 33,7%.

Por tanto, y teniendo en cuenta la bibliografía y la experiencia previa del Grupo de Investigación, se han considerado las dosificaciones de las

⁸⁰ Hernández Olivares F, Bollati MR, Del Río M, Parga-Landa B. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Constr Build Mater* (1999), 13, 179-186.

⁸¹ González Madariaga F.J, Lloveras Macia J. EPS (expanded polystyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción* (2008), 60, 35-43.

⁸² Serhat Başpınar M, Kahraman E. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Constr Build Mater* (2011), 25, 3327-3333.

⁸³ Rocco J.A.F.F, Lima J.E.S, Lourenço V.L, Batista N.L, Botelho E.C, Iha, K. Dynamic mechanical properties for polyurethane elastomers applied in elastomeric mortar. *J Appl Polym Sci* (2012), in press.

Tablas 6.1 y 6.2, clasificadas en función de la proporción de sustitución, en volumen, de yeso por espuma de poliuretano.

La nomenclatura empleada para la designación de las diferentes pastas se presenta utilizando el yeso de construcción B1 como yeso de referencia y se agrupa según el tipo de residuo empleado:

- Y: mezclas de referencia.
- YPG: mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano gris (Serie I).
- YPW: mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano blanco (Serie II).

Mezcla	Relación en volumen (Y/PUG)
Y	1/0
Y0,5PG	1/0,5
Y1PG	1/1
Y2PG	1/2
Y3PG	1/3
Y4PG	1/4

Tabla 6. 1. Relación en volumen entre la cantidad de yeso y de residuo de poliuretano gris

Mezcla	Relación en volumen (Y/PUW)
Y	1/0
Y0,5PW	1/0,5
Y1PW	1/1
Y2PW	1/2
Y3PW	1/3
Y4PW	1/4

Tabla 6. 2. Relación en volumen entre la cantidad de yeso y de residuo de poliuretano blanco

6.2.2 Exigencias mecánicas según normativa UNE-EN 13279-1:2009

Se han tomado como referencia las exigencias mecánicas a flexión y a compresión de la norma UNE-EN 13279-1:2009 para los yesos de construcción, que establece que las resistencias mínimas deben encontrarse entre 1,0 MPa y 2,0 MPa, respectivamente.

6.2.3 Criterio medioambiental

Se ha tratado de introducir la mayor cantidad de poliuretano posible, dentro de las dosificaciones que cumplen los requisitos establecidos, para contribuir en mayor medida a la eliminación de este tipo de residuo.

6.3 Experimental

El procedimiento operatorio para la obtención de las mezclas ha consistido en la fabricación de yeso aligerado mediante la adición progresiva de espuma de poliuretano triturada. El parámetro que se fija en todos los casos es la obtención de una consistencia adecuada de las mezclas, según la norma UNE-EN 13279-2:2006. Dicha consistencia viene dada por la relación agua/conglomerante total, considerando el conglomerante total como la suma de la cantidad de yeso y la de espuma de poliuretano:

Conglomerante Total = Agua / (Yeso + Residuo de Poliuretano (a/(Y+PU))),

Siendo PU: el tipo de residuo de poliuretano empleado (PUG ó PUW).

Para este experimento se ha utilizado agua común limpia, manteniendo su temperatura constante en $24 \pm 1^\circ\text{C}$ en el momento del experimento.

6.3.1 Procedimiento de mezclado y fabricación de probetas

El primer paso consistió en dosificar en volumen las proporciones de yeso y polímero, de acuerdo con las referencias recogidas en las Tablas 6.1 y 6.2. A continuación, se mezclaron ambos componentes en seco con la ayuda de una espátula hasta conseguir una mezcla homogénea. Posteriormente, se incorporó el agua a la mezcla y se amasó de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13279-2:2006, un minuto de forma manual y un minuto mecánicamente. Finalmente la mezcla se vierte a moldes de diferentes dimensiones en función del tipo de ensayo a realizar.

En todos los casos se consiguieron mezclas fáciles de trabajar, observándose una mayor textura en forma de *mousse* en aquellas muestras con mayor contenido de poliuretano en su composición.

6.4 Resultados y discusión

6.4.1 Caracterización en estado fresco

6.4.1.1 Relación agua/yeso+poliuretano ($a/(Y+PU)$)

La determinación de la consistencia se realizó por el método de la mesa de sacudidas (según lo descrito en el Apartado 4.7.1), que determina la cantidad de agua necesaria para obtener una buena trabajabilidad y plasticidad en las muestras.

En la Figura 6.1 se puede observar que la adición progresiva de polímero requiere cantidades de agua elevadas para asegurar una buena trabajabilidad debido, probablemente, a la elevada porosidad del material. Para ambas espumas de poliuretano, se aprecia un aumento progresivo de la relación $a/(Y+PU)$, que se ve multiplicado por más de cuatro en el caso de la mezcla Y4PG (con mayor proporción de poliuretano gris), y en más del triple para la dosificación Y4PW (con mayor proporción de poliuretano blanco), respecto de la mezcla de referencia (Y).

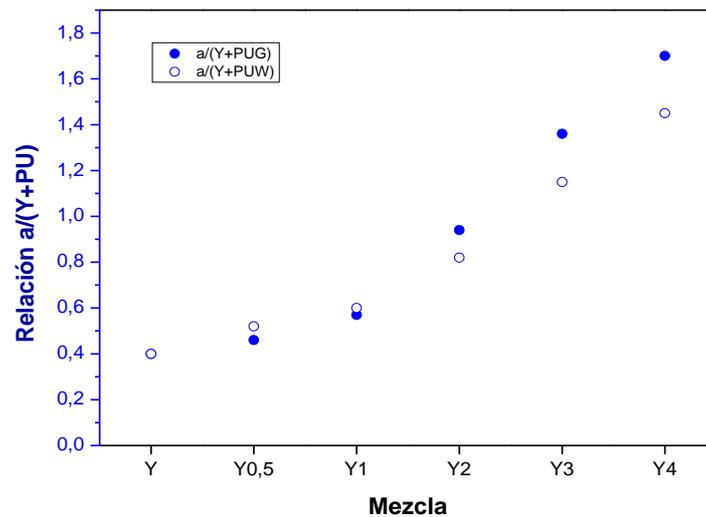


Figura 6. 1. Comparativa entre la relación $a/(Y+PU)$ de la Serie I y de la Serie II

6.4.1.2 Principio de fraguado

La determinación del principio de fraguado se ha realizado por el método de la Aguja de Vicat según lo descrito en el Apartado 4.8.1.

En la Figura 6.2 se puede observar que al aumentar la cantidad de polímero, se alcanzan tiempos de fraguado más elevados, ya que la

mayor capacidad de retención de agua de las espumas de poliuretano dificulta la evaporación del agua de amasado. Para ambas espumas, los tiempos de fraguado se ven incrementados, respecto de la mezcla de referencia (Y) en más de cuatro veces para la mezcla Y4PG y en más de tres veces para la dosificación Y4PW. Si se realiza una comparativa entre ambas series, se aprecia un ligero incremento en los tiempos de fraguado de las mezclas de la Serie I respecto de la Serie II. Esto puede deberse a que las dosificaciones de la Serie I tienen superiores relaciones a $/(Y+PU)$ y por lo tanto, mayores retenciones de agua que inducen a tiempos de fraguado más elevados, lo que significa que la inclusión de poliuretano mejora la trabajabilidad de las mezclas.

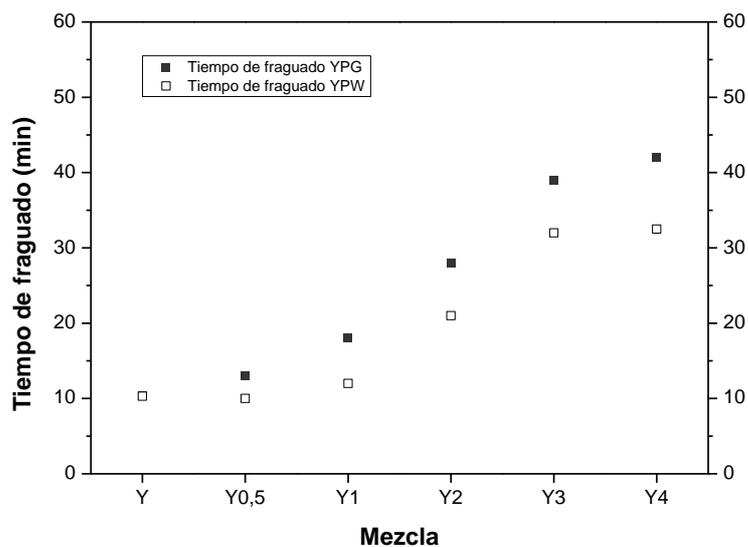


Figura 6. 2. Comparativa entre los tiempos de fraguado de la Serie I y de la Serie II

6.4.1.3 Comparativa entre la relación agua/ yeso y el tiempo de fraguado

En la Tabla 6.3 se muestran los resultados de las propiedades en estado fresco de las mezclas.

Serie	Mezcla	a/(Y+PU)	Tiempo de fraguado (min)
Referencia	Y	0,40	10,3
Serie I	Y0,5PG	0,46	13,0
	Y1PG	0,57	18,0
	Y2PG	0,94	28,0
	Y3PG	1,36	39,0
	Y4PG	1,70	42,0
Serie II	Y0.5PW	0,52	10,0
	Y1PW	0,60	12,0
	Y2PW	0,82	21,0
	Y3PW	1,15	32,0
	Y4PW	1,45	32,5

Tabla 6. 3. Relación a/(Y+PU) y tiempos de fraguado de la referencia y de las Series I y II

Por otro lado, las gráficas de las Figuras 6.3 y 6.4 muestran para ambas espumas, una buena correlación entre el tiempo de fraguado y la relación a/(Y+PU), variando de forma directamente proporcional.

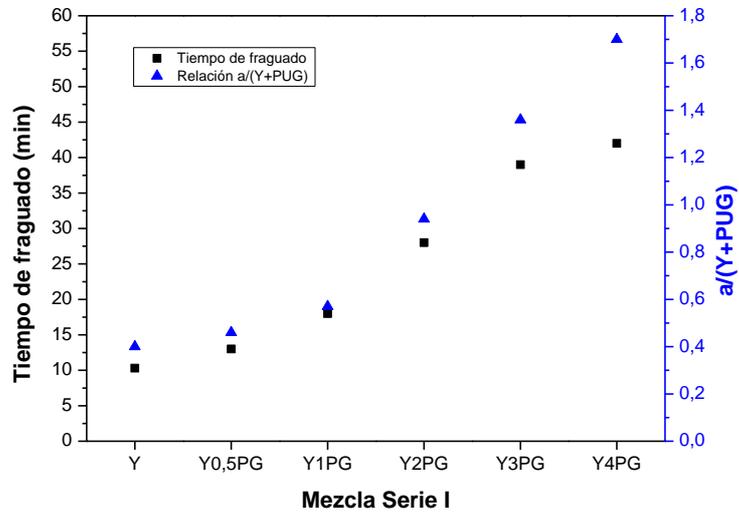


Figura 6. 3. Relación $a/(Y+PUG)$ y tiempos de fraguado de la referencia y de la Serie I

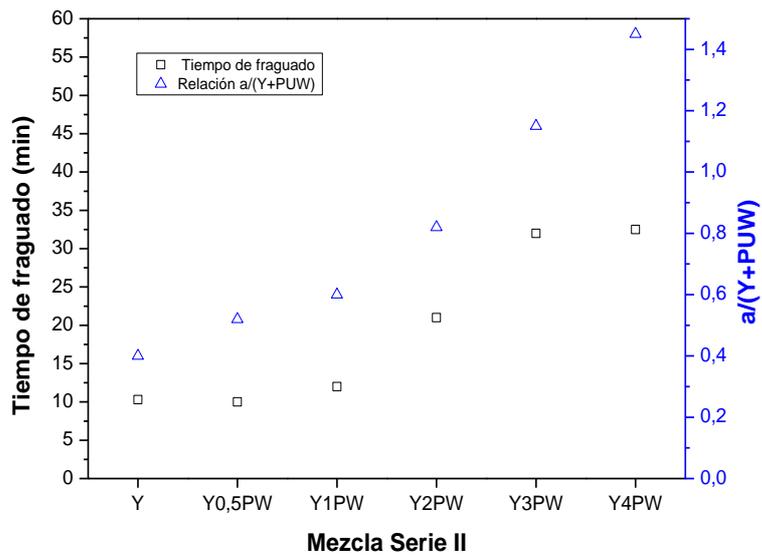


Figura 6. 4. Relación $a/(Y+PUW)$ y tiempos de fraguado de la referencia y de la Serie II

6.4.2 Caracterización en estado endurecido

6.4.2.1 Densidad aparente y capacidad de retención de agua

Tanto la densidad aparente como la determinación de la capacidad de retención de agua, se han estudiado de acuerdo con lo descrito en el Apartado 4.18.

A partir de los resultados obtenidos (Tabla 6.4), se verifica que el empleo de residuo, en proporciones cada vez mayores, reduce la densidad del material. La explicación a este comportamiento puede deberse al aumento de la relación $a/(Y+PU)$, al incremento en la porosidad del material, debido a la inclusión de un polímero de estructura celular, y a la menor densidad del poliuretano respecto del conglomerante. En comparativa con la serie de referencia, se observa una reducción de la densidad aparente seca entre el 10 y un 65% en el caso de la espuma gris, y el 15 y un 64% en el caso de la espuma blanca.

En cuanto a la capacidad de retención de agua del material, se observa que es mayor en probetas con mayor proporción de espuma, llegando a alcanzarse un 100% en las dosificaciones Y4PG y Y4PW.

Serie	Mezcla	Densidad aparente húmeda (Kg/m ³)	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)	Retención de agua (%)
Referencia	Y	1713	1477	16,0
Serie I	Y0,5PG	1620	1323	22,5
	Y1PG	1493	1140	31,0
	Y2PG	1272	795	60,0
	Y3PG	1135	590	92,4
	Y4PG	1030	516	100,0
Serie II	Y0.5PW	1583	1258	25,8
	Y1PW	1483	1114	33,1
	Y2PW	1335	879	51,9
	Y3PW	1181	674	75,2
	Y4PW	1073	535	100,0

Tabla 6. 4. Densidad aparente y capacidad de retención de agua de la referencia y de las Series I y II

6.4.2.2 Comportamiento mecánico: resistencia a flexión y a compresión

En la resistencia a flexión se determina la carga necesaria para romper probetas prismáticas de (160x40x40) mm³ apoyadas sobre rodillos separados 100 mm entre sí, según la norma UNE-EN 13279-2:2006. El ensayo se realiza sobre un mínimo de tres probetas.

La resistencia a compresión debe realizarse sobre las mitades procedentes de las probetas ensayadas a flexión (al menos 6 muestras). La sección de contacto sobre la que se ejerce la carga es de (40x40) mm².

En la Tabla 6.5 y en la Figura 6.5 se representan los resultados obtenidos de resistencia a flexión y a compresión a 7 y 28 días para los dos tipos de residuos de espuma de poliuretano. Las resistencias mecánicas

dependen en gran medida de la densidad del material y del tipo de gránulo utilizado, donde granulometrías más finas permiten obtener resistencias mecánicas mayores⁸⁴. Por ese motivo, y aunque en principio podría pensarse en que el empleo de la espuma blanca sería más favorable para obtener propiedades mecánicas mejores debido a su granulometría más fina, las gráficas muestran que no se aprecian cambios significativos, al comparar los resultados obtenidos para ambos polímeros. En los dos casos se observa la disminución lógica de las resistencias al ir incorporando porcentajes mayores de espuma de poliuretano. No obstante, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009, los requerimientos mínimos que se deben alcanzar son de 1,0 MPa de resistencia a flexión y de 2,0 MPa de resistencia a compresión. Los resultados obtenidos determinan que, en el caso de la espuma blanca, las dosificaciones que cumplen ambos requisitos son la Y2PW, Y1PW y Y0,5PW. Para la espuma gris, esta exigencia queda cubierta con las mezclas Y1PG y Y0,5PG, a pesar de que el volumen de espuma de poliuretano añadida resulta muy elevado.

⁸⁴ Eskander S.B, Tawfik M.E. Polymer-cement composite based on recycled expanded polystyrene foam waste. Polym compos (2011), 32(9), 1430-1438.

Capítulo VI. Caracterización de mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano

Serie	Mezcla	Resistencia a flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	
		7 días	28 días	7 días	28 días
Referencia	Y	5,92	6,1	15,49	15,64
Serie I	Y0,5PG	3,71	3,91	9,45	9,78
	Y1PG	2,31	2,39	5,84	6,23
	Y2PG	0,69	0,87	1,45	1,45
	Y3PG	0,26	0,32	0,46	0,47
	Y4PG	0,12	0,18	0,21	0,27
Serie II	Y0,5PW	3,40	3,79	8,87	9,59
	Y1PW	2,41	2,65	5,92	6,78
	Y2PW	0,90	1,05	2,14	2,51
	Y3PW	0,21	0,42	0,45	0,88
	Y4PW	0,10	0,12	0,20	0,41

Tabla 6. 5. Valores de las resistencias mecánicas a 7 y 28 días de la referencia y de las Series I y II

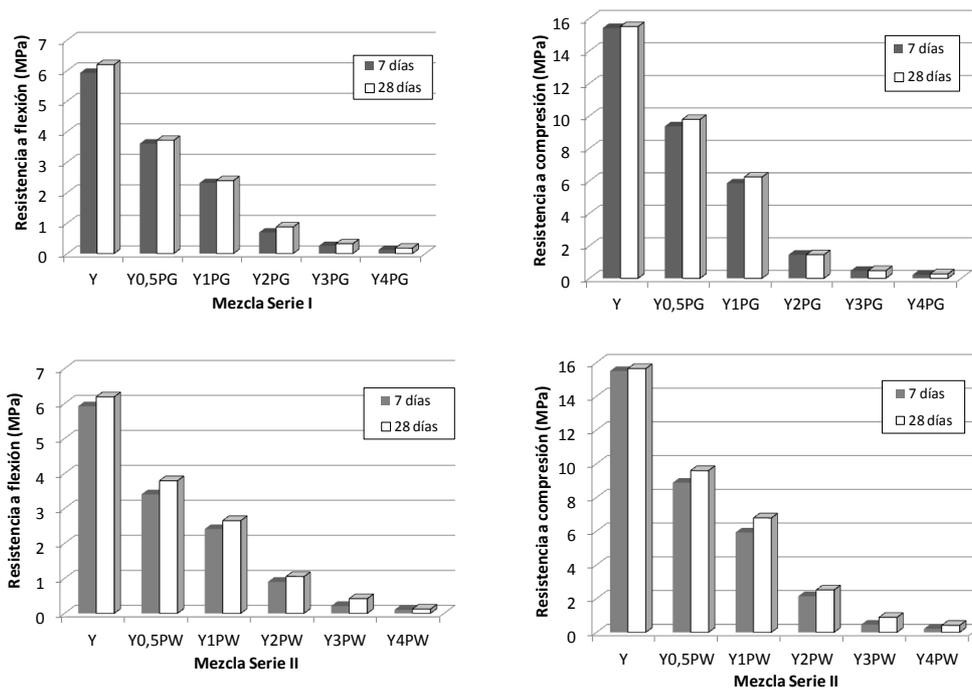


Figura 6. 5. Resistencias a flexión y a compresión a 7 y 28 días de la referencia y de las Series I y II

6.4.2.3 Dureza superficial Shore C

Los valores de dureza superficial Shore C se han obtenido a partir del procedimiento operatorio del Apartado 4.13.

Comparando los resultados obtenidos para ambas series (Figura 6.6), se observa que las mezclas de la Serie II (YPW), son más duras que las pertenecientes a la Serie I (YPG). Así, a partir de dosificaciones 1/1 en adelante, las dosificaciones con poliuretano blanco tienen una dureza superficial superior a las mezclas con poliuretano gris. Esto es debido probablemente al menor tamaño de partícula de la espuma blanca que permite una mejor distribución de la misma en la matriz del yeso.

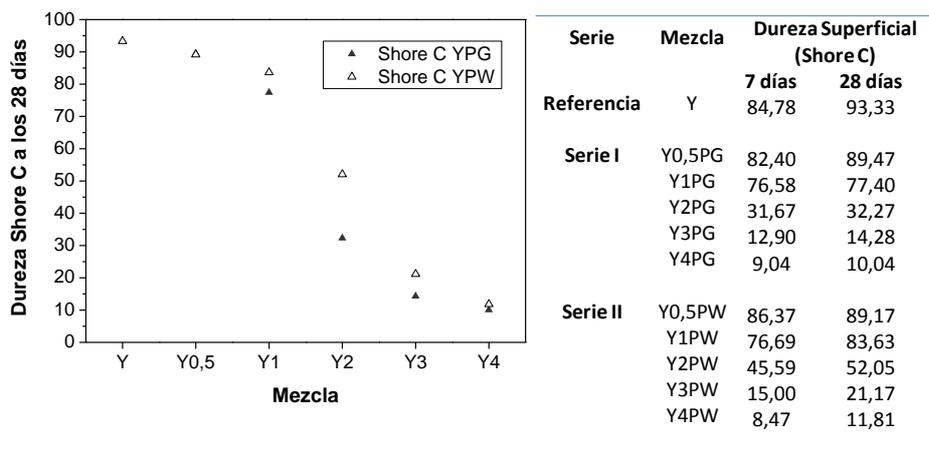


Figura 6. 6. Comparativa entre la dureza superficial Shore C a los 28 días de la Serie I (YPG) y la Serie II (YPW)

Como era de esperar, los resultados muestran que la dureza superficial Shore C disminuye con el incremento de espuma, es decir, con la reducción de la densidad, debido por una parte a la existencia de un mayor porcentaje de poros, que favorece la posibilidad de que estos compuestos sean penetrados o rayados por otros, y por otra, a la

naturaleza de los polímeros, que son materiales flexibles con poca resistencia superficial.

6.4.2.4 Adherencia

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el estudio de la viabilidad de estos materiales reciclados es la determinación de la adherencia ya que, generalmente, el destino de estos compuestos es su empleo como revestimiento de otros materiales en diferentes unidades de obra. La adherencia se determina según lo descrito en el Apartado 4.15. En este caso, la adhesión se ha medido sobre un soporte cerámico.

Se observa que los resultados de la fuerza de adherencia son cada vez menores a medida que se aumenta el porcentaje de espuma de poliuretano (Tabla 6.6, Figuras 6.7 y 6.8) mostrando, respecto de las probetas de referencia Y, una disminución del 18,1% para la dosificación Y1PG y del 24,6% para la mezcla Y1PW, llegando a alcanzarse las máximas reducciones en dosificaciones con los mayores contenidos en poliuretano, siendo la pérdida de la adherencia del 87% en la muestra Y4PG y del 85% en mezclas del tipo Y4PW. Aunque aparentemente los datos de adherencia no son muy favorables para dosificaciones con alto contenido en poliuretano, éstos deben analizarse de forma conjunta con el tipo de rotura producida. Desde este punto de vista, las roturas que se producen en los casos que incluyen dosificaciones 1/3 (una parte de yeso y tres de poliuretano), son por cohesión, tal y como puede observarse en las Figuras 6.9 y 6.10, lo que significa que la adherencia con el soporte es buena, y que la rotura se produce en la interfase del propio material de yeso + poliuretano. Esto puede explicarse debido a

que el aumento en la demanda de agua, a medida que el porcentaje de polímero es mayor, provoca una porosidad cada vez más elevada y, al mismo tiempo, una homogeneidad menor en la masa, lo que haría disminuir la cohesión entre el yeso y el poliuretano.

La norma UNE-EN 13279-1:2009 especifica que cuando la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor de la adherencia debe ser mayor o igual a 0,1 N/mm². De acuerdo con los resultados referidos en la Tabla 6.6 se puede observar que las dosificaciones de referencia (Y), y las que incluyen poliuretano en dosificaciones menores de 1/3 (Y0,5, Y1 y Y2), alcanzan, en todos los casos, valores superiores a 0,1 N/mm².

Serie	Mezcla	Adherencia (N/mm ²)	Pérdida de adherencia (%)
Referencia	Y	0,46	0
Serie I	Y0,5PG	0,41	11,64
	Y1PG	0,38	18,10
	Y2PG	0,16	65,52
	Y3PG	0,13	71,98
	Y4PG	0,06	87,07
Serie II	Y0,5PW	0,64	0
	Y1PW	0,35	24,57
	Y2PW	0,18	61,21
	Y3PW	0,08	82,76
	Y4PW	0,07	84,91

Tabla 6. 6. Adherencia y pérdida de adherencia de la referencia y de las Series I y II

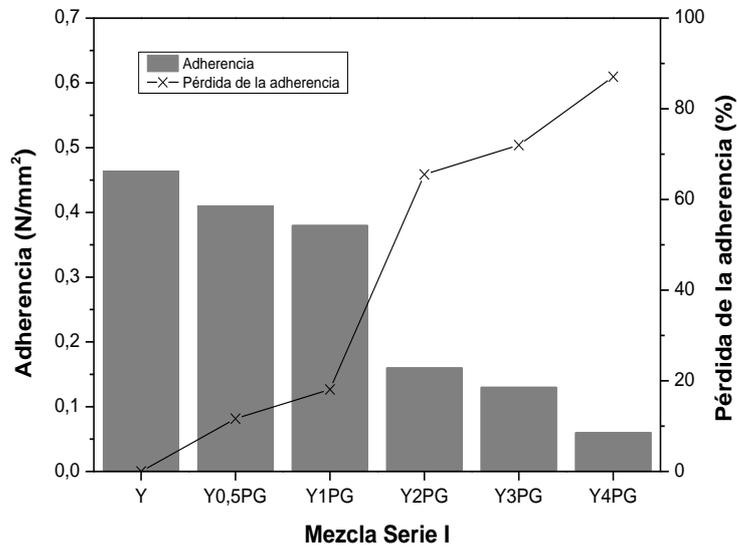


Figura 6. 7. Relación entre la adherencia y la pérdida de adherencia de la referencia y de la Serie I

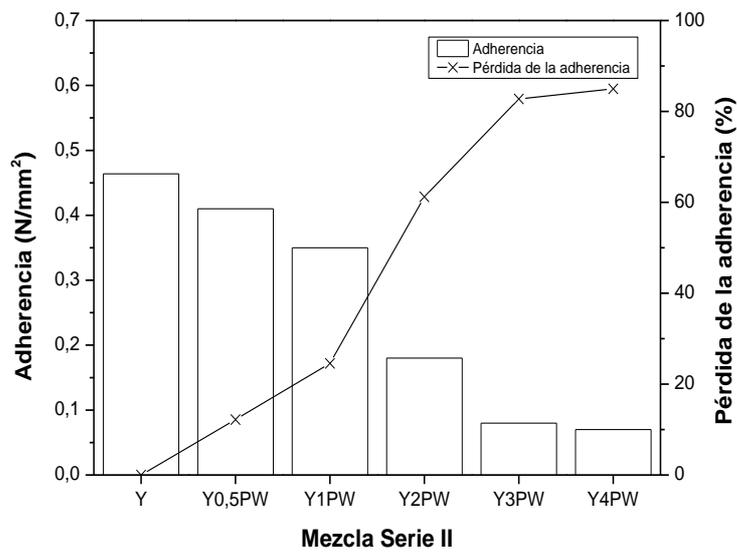


Figura 6. 8. Relación entre la adherencia y la pérdida de adherencia de la referencia y de la Serie II



Figura 6. 9. Rotura por cohesión en las dosificaciones Y3PG y Y4PG

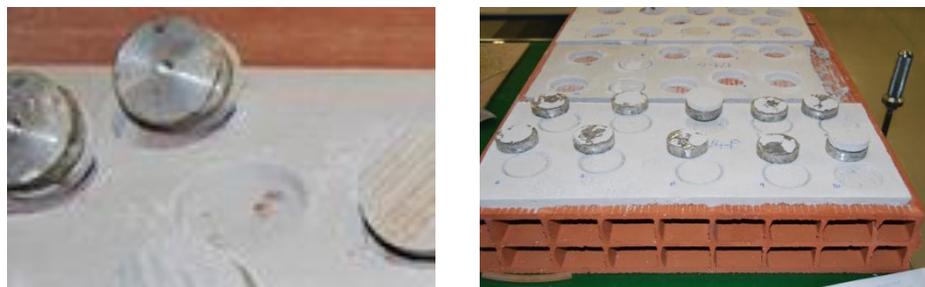


Figura 6. 10. Rotura por cohesión en las dosificaciones Y3PW y Y4PW

6.4.2.5 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua se ha determinado acorde a lo descrito en el Apartado 4.14.

La Tabla 6.7 recoge los resultados de la permeabilidad de las muestras. En el gráfico de la Figura 6.11, correspondiente a la serie de poliuretano gris, se observa que la permeabilidad alcanza su mayor valor cuando la cantidad de sustitución yeso por poliuretano gris es máxima (Y4PG) y representa un valor de hasta aproximadamente cuatro veces mayor que el yeso de referencia (Y). En el caso de la serie de poliuretano blanco (Figura 6.12), los valores máximos de permeabilidad se alcanzan en dosificaciones (Y2PW), incrementando aproximadamente su valor tres veces, manteniéndose prácticamente constante con ligeros incrementos hasta la dosificación (Y4PW), con un aumento de permeabilidad de

factor 3,3. Este aumento progresivo de la permeabilidad puede ser debido a diversos factores. El poliuretano es un material poroso, lo que significa que tiene diámetros medios relativamente altos en la red capilar, que a su vez facilita el paso de vapor de agua^{85,86}. Además, la espuma es altamente reticulada, lo que produce una importante presencia de conductos y capilares distribuidos en la matriz del yeso, conectando unos con otros para formar una fina red a través de la cual el vapor de agua fluye fácilmente.

Serie	Mezcla	Permeabilidad (Kg/m²sPa,x10⁻¹¹)
Referencia	γ	1,058
Serie I	Y0,5PG	1,543
	Y1PG	1,794
	Y2PG	3,555
	Y3PG	4,340
	Y4PG	4,371
Serie II	Y0,5PW	1,630
	Y1PW	2,342
	Y2PW	3,398
	Y3PW	3,429
	Y4PW	3,490

Tabla 6. 7. Permeabilidad al vapor de agua de la referencia y de las Series I y II

⁸⁵ Kearsley E.P, Wainwright P.J. Porosity and permeability of foamed concrete. Cem Concr Res (2001), 31(5), 805-812.

⁸⁶ Temiz H, Kose M.M, Koksal S. Effects of Portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete. Constr Build Mater (2007), 21, 1170-1176.

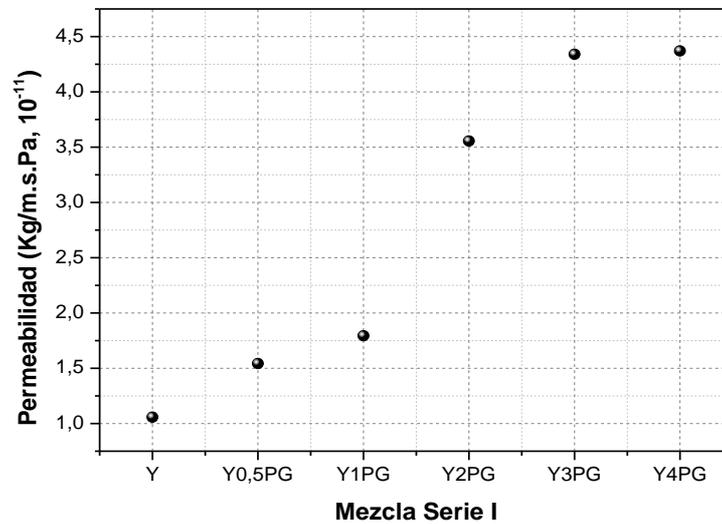


Figura 6. 11. Permeabilidad al vapor de agua de la referencia y de la Serie I

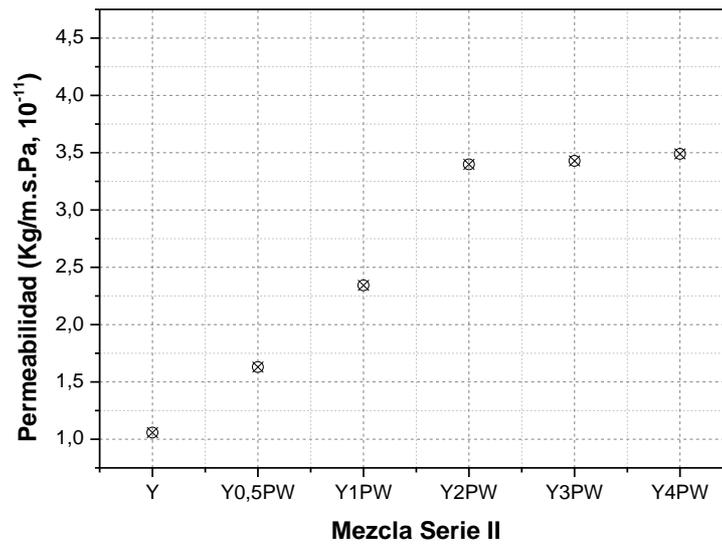


Figura 6. 12. Permeabilidad al vapor de agua de la referencia y de la Serie II

6.4.2.6 Absorción por capilaridad

La absorción por capilaridad se ha determinado según lo descrito en el Apartado 4.16.

Los resultados de la Tabla 6.8 y las gráficas de la Figura 6.13 muestran un incremento continuo de la absorción por capilaridad de las muestras, a medida que aumenta la sustitución de yeso por poliuretano, siendo aproximadamente 5 veces superior para la dosificación (Y4PG) y de alrededor de 4 veces mayor para la mezcla (Y4PW), ambas respecto de la referencia (Y). En las dosificaciones Y1, Y2 y Y3 se observa que las mezclas que incorporan espuma blanca experimentan una menor absorción por capilaridad que las que incorporan espuma gris, debido probablemente a que la espuma gris posee un mayor tamaño de celdas cerradas que, al incluirse en el interior de la matriz de yeso, favorecen en mayor medida la interconexión entre capilares.

Serie	Mezcla	Absorción por capilaridad (mm/min)
Referencia	Y	21,75
Serie I	Y0,5PG	28,75
	Y1PG	44,50
	Y2PG	83,50
	Y3PG	118,75
	Y4PG	131,50
Serie II	Y0,5PW	35,00
	Y1PW	44,00
	Y2PW	62,75
	Y3PW	86,50
	Y4PW	102,25

Tabla 6. 8. Absorción por capilaridad de la referencia y de las Series I y II

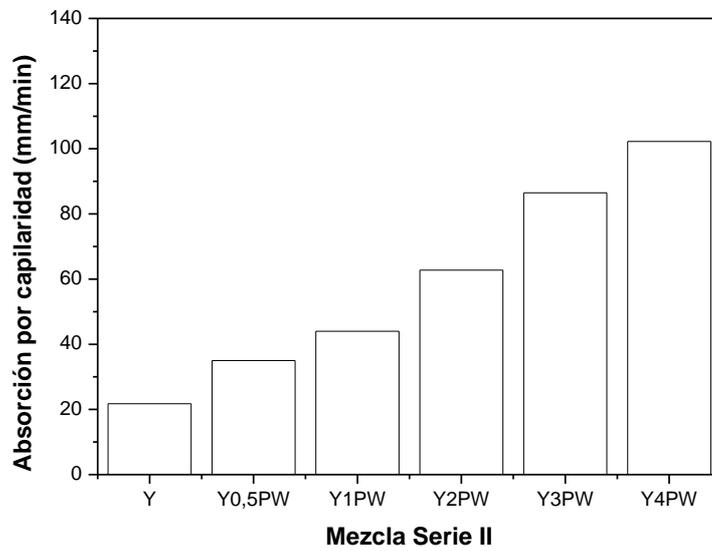
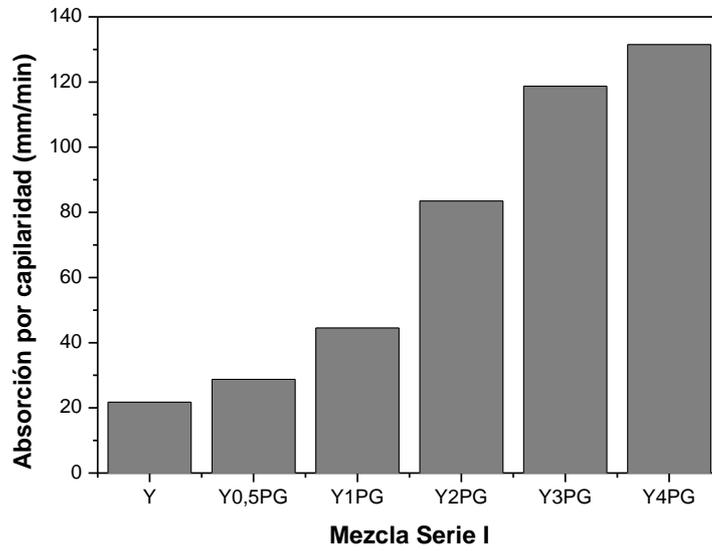


Figura 6. 13. Absorción por capilaridad de la referencia y de las Series I y II

6.4.2.7 Porosidad por tomografía axial computarizada

Para dar una idea aproximada de la distribución de los macroporos en la matriz conglomerante, así como para determinar cuantitativamente los mismos, se ha medido la macroporosidad de las mezclas con poliuretano mediante tomografía axial computarizada (TAC) según lo descrito en el Apartado 4.11.

El TAC es una técnica basada en el análisis computacional de una secuencia de imágenes obtenidas por rayos X, de donde se obtiene una imagen tridimensional de la estructura interna de matrices pétreas a escala real, identificando los poros con tamaño de diámetro superior a 170 μm (macroporos)⁸⁷. El procesado de datos se ha llevado a cabo con el software Mimics 10.0. El programa identifica las densidades de los diferentes materiales por colores. De esta manera, en la Figura 6.14 se observa la distribución de materiales, en la que el blanco y el verde claro corresponden a los productos del yeso, el verde oscuro al polímero y el verde más intenso a los poros. Se aprecia una distribución homogénea de los macroporos en la matriz del conglomerante.

⁸⁷ Manso J.M, Rodríguez A, Aragón A, González J.J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. Constr Build Mater (2011), 25, 3508-3519.

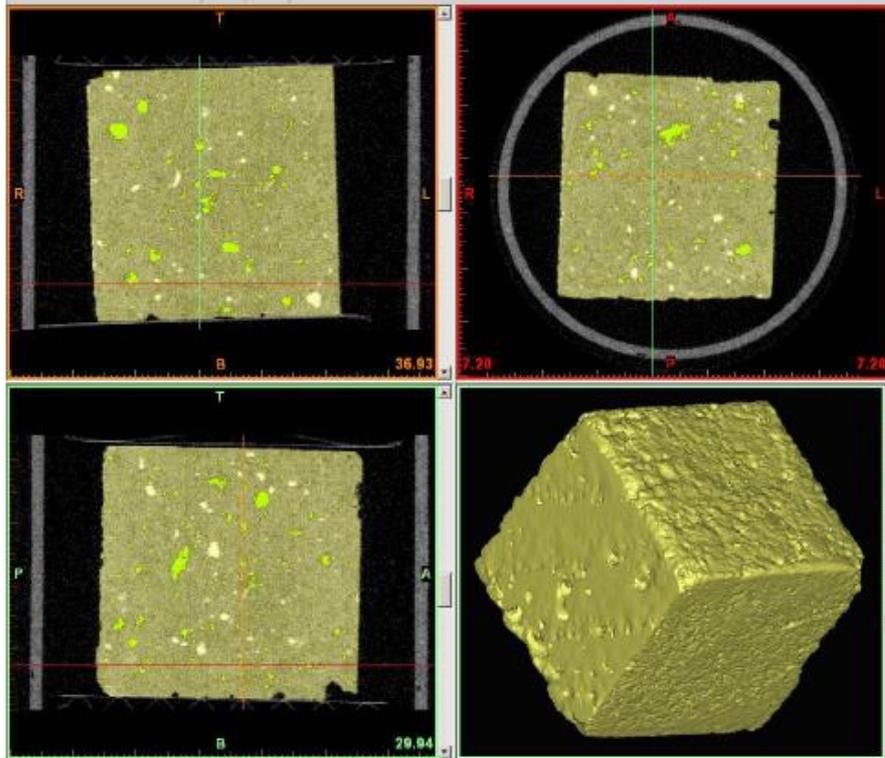


Figura 6. 14. Secciones de la probeta Y3PG obtenidas mediante TAC

La Tabla 6.9 muestra los valores de macroporosidad obtenidos mediante TAC. A la vista de los resultados obtenidos, se comprueba que a medida que aumenta el contenido de poliuretano en la composición, el porcentaje de poros es también mayor, lo que supone que el polímero introduce cantidades de aire cada vez mayores en el material, debido a su estructura celular.

	Mezcla	Porosidad TAC (%)
Referencia	Y	0,60
Serie I (PG)	Y0,5PG	1,20
	Y1PG	1,60
	Y2PG	2,00
	Y3PG	2,60

Tabla 6. 9 Porosidad (>170 μ m) obtenida mediante TAC de la referencia y de la Serie I

Aunque la realización de un estudio en profundidad de la porosidad del material debería incluir el estudio de la microporosidad mediante la técnica de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), el empleo de esta técnica para la obtención de resultados viables no ha sido posible. La dificultad encontrada a la hora de abordar este ensayo se basa en que las altas presiones de mercurio en contacto con las partículas de poliuretano alteran la geometría inicial del polímero, poco rígida y deformable, dando lugar a resultados poco fiables que no pueden ser tenidos en cuenta, ya que son imprecisos y poco reproducibles. No obstante, existirían otras posibles alternativas de determinación de la porosidad inferior a 170 μ m, como por ejemplo la adsorción de gases.

6.4.2.8 Caracterización microestructural de los yesos por FSEM

La Figura 6.15 representa la imagen general de la mezcla de yeso con poliuretano gris, acompañada de su respectivo mapping superpuesto, donde largas películas de poliuretano aparecen rodeadas de cristales de yeso coloreados, por la coincidencia espacial de las señales de azufre (S) y calcio (Ca).

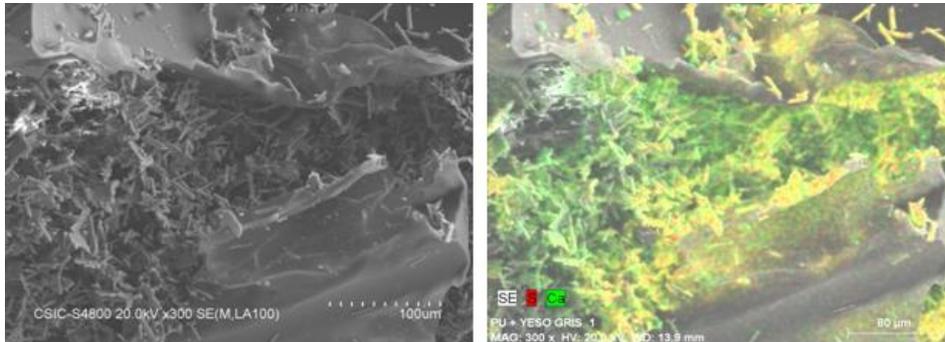


Figura 6. 15. FSEM y análisis “mapping” de la muestra Y2PG

Aunque la porosidad de estos materiales va aumentando con la adición de polímero, se ha podido comprobar mediante microscopia electrónica de barrido que la cohesión entre la interfase yeso-poliuretano es adecuada (Figura 6.16).

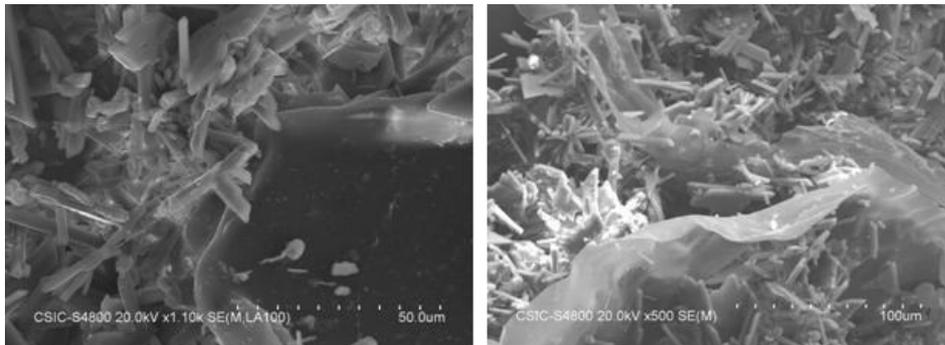


Figura 6. 16. FSEM de la interfase yeso-poliuretano en la muestra Y2PG

Esto podría explicarse teniendo en cuenta que la hidratación del yeso da lugar a la formación de una estructura en red de agujas de forma cúbica, de comportamiento macroscópico expansivo. Las celdas del poliuretano absorben esta expansividad y acomodan los productos de hidratación, proporcionando un producto final cohesionado, en el que también se observa cómo los cristales aciculares del yeso dihidratado consiguen penetrar en los poros y en las aberturas del poliuretano (Figura 6.17),

proporcionando una unión mecánica, sin reacción química en la interfase, pero de gran estabilidad⁸⁸.

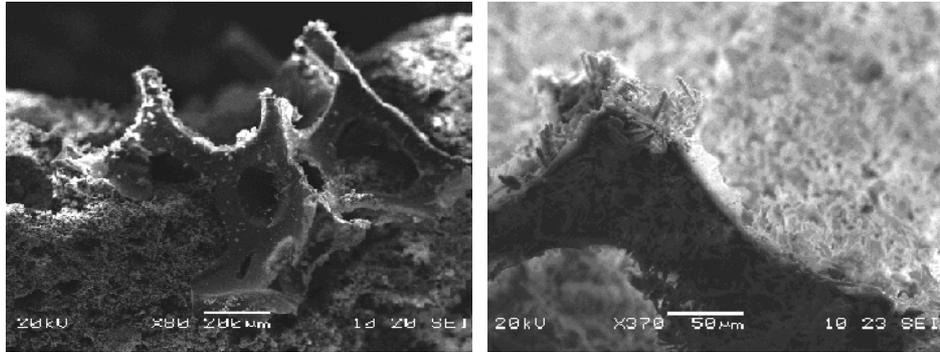


Figura 6. 17. FSEM de la muestra Y2PG

La imagen de la mezcla Y2PW (Figura 6.18) revela la presencia de películas de poliuretano blanco dentro de la matriz, cuya continuidad parece verse interrumpida por la mayoritaria presencia de cristales de yeso, tal y como se puede observar en el “mapping” de la muestra.

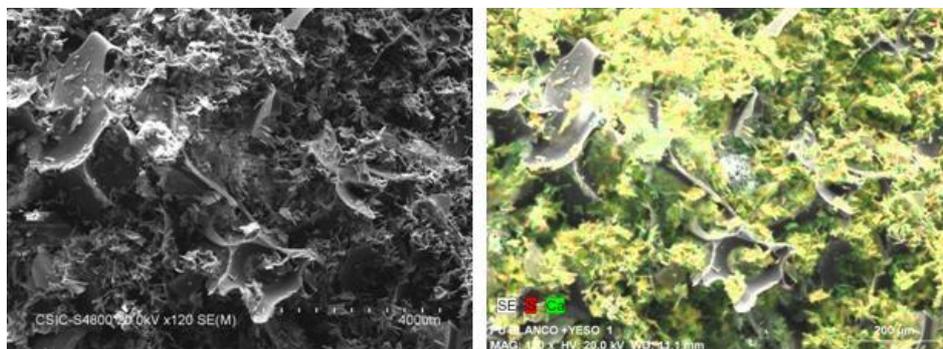


Figura 6. 18. FSEM y análisis “mapping” de la muestra Y2PW

Las imágenes de electrones secundarios obtenidas con más aumentos y acompañadas de sus respectivos “mapping” muestran con más detalle la morfología clásica de cristales de yeso bien desarrollados, de formas

⁸⁸ Courard L, Lenaers J.F, Michel F, Garbacz A. Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems. Constr Build Mater (2011), 25, 2488-2494.

aciculares (mayoritarios) y tabulares, de un tamaño aproximado de entre 20 y 30 micras, rodeados del poliuretano blanco (Figura 6.19).

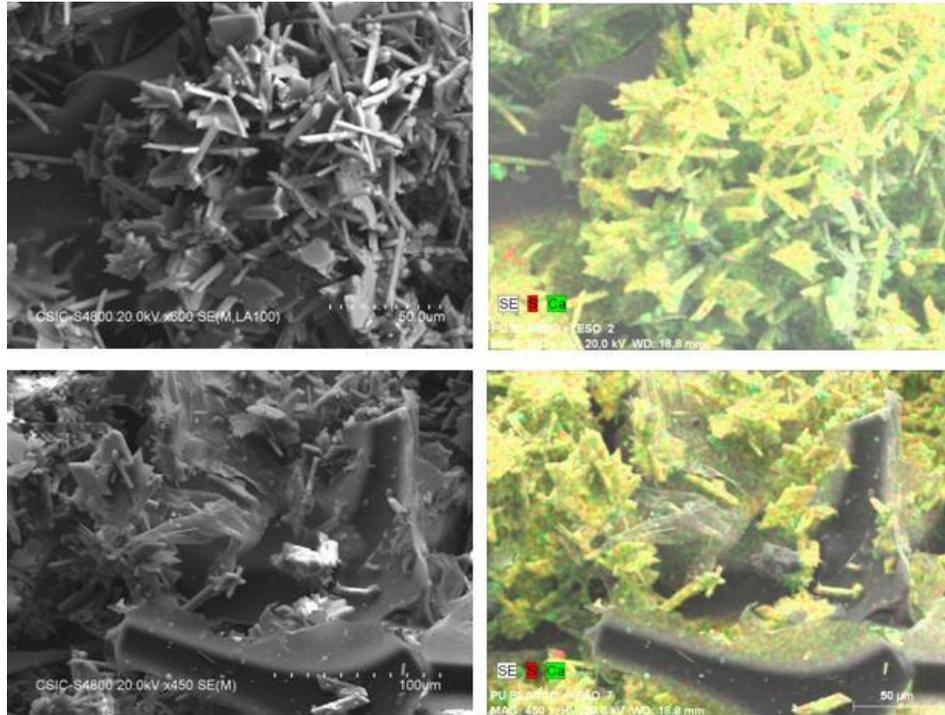


Figura 6. 19. FSEM y análisis “mapping” de la muestra Y1PW

6.4.2.9 Determinación del comportamiento térmico

6.4.2.9.1 TGA

Los materiales compuestos yeso-polímero obtenidos han sido caracterizados mediante termogravimetría (TGA) para determinar la cantidad de poliuretano de cada muestra, según lo descrito en el Apartado 4.5. El estudio analiza el proceso de deshidratación de los yesos, además de determinar la degradación que sufre el poliuretano con la temperatura, lo que en conjunto proporciona una idea del comportamiento frente al fuego de estos materiales.

En las Figuras 6.20 y 6.21 puede observarse que, para la probeta de referencia, la primera pérdida de masa se produce entre 90-180°C, y es debido a la descomposición del agua estructural del dihidrato. En este tramo, y aunque se aprecia un único salto debido a las condiciones del ensayo, se produce una doble pérdida de agua: en primer lugar se evaporan 1,5 moléculas de agua, pasando de $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ a $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{1/2}$, y en segundo lugar 0,5 moléculas de agua, hasta CaSO_4 . El segundo salto, comprendido entre 580 y 700°C, se debe a la descomposición de la dolomita, presente en el yeso comercial.

Para las dosificaciones con poliuretano, se produce un primer tramo entre 90-180°C similar al de las probetas de referencia. La segunda pérdida de masa ocurre entre 200-500°C, y es debida probablemente a la descomposición de parte de la cadena polimérica. La tercera degradación corresponde a las impurezas del carbonato cálcico y magnésico^{89,90,91}.

Con los datos alcanzados, se puede considerar que el comportamiento térmico del material será en un principio aceptable, no existiendo ninguna característica contraria al empleo de estos yesos reciclados.

Por tanto, esta técnica de análisis térmico resulta una herramienta muy útil en el estudio de la reutilización de estos polímeros, donde no se han

⁸⁹ Dweck J, Andrade BF, Monteiro EEC, Fischer R. Thermal characterization of polymeric plaster composites. *J Therm Anal Calorim* (2002), 67, 321-326.

⁹⁰ Carvalho M.T.M, Leles M.I.G, Tubino R.M.C. Tg and DSC studies on plaster residues as recycled material. *J Therm Anal Calorim* (2008), 91(2), 621-625.

⁹¹ Kumagai S, Ohama Y. Development of highly water-resistant gypsum-based composites. *J Soc Mater Sci*, (2002), 51(10), 1129-1134.

detectado cambios químicos y físicos al comparar las muestras de yeso aligerado con residuos de poliuretano con el yeso tradicional.

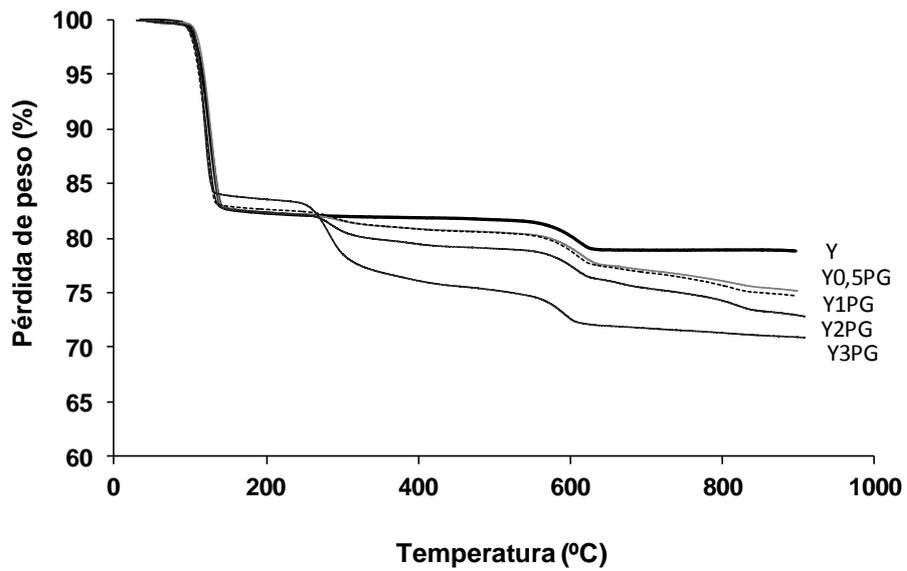


Figura 6. 20. TGA en Nitrógeno de las mezclas de yeso con poliuretano gris

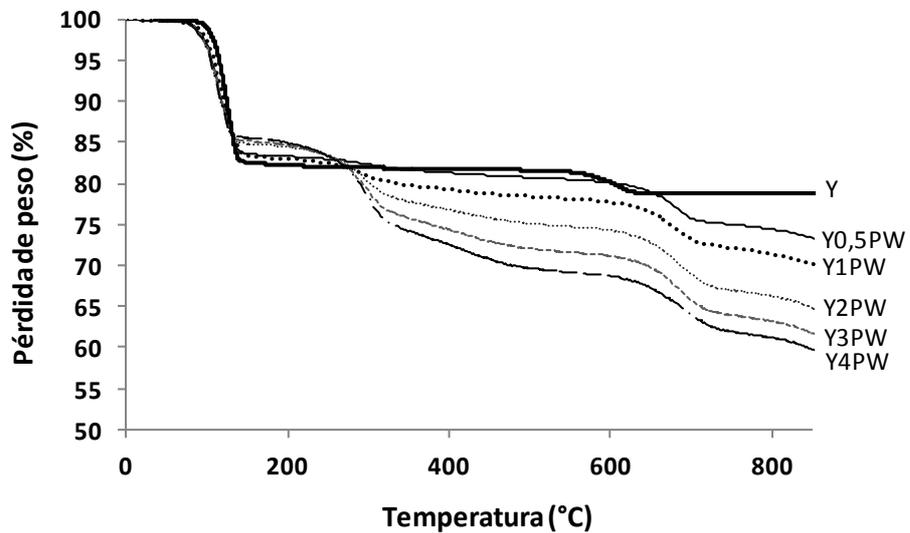


Figura 6. 21. TGA en Nitrógeno de las mezclas de yeso con poliuretano blanco

6.4.2.9.2 Conductividad térmica

La presencia de polímeros espumados en la fabricación de yeso aligerado conlleva la incorporación de gran cantidad de aire en los materiales fabricados, lo que en principio conduce a pensar en una mejora de las resistencias térmicas, medida en términos de conductividad. Por ese motivo se ha determinado la conductividad térmica según el método descrito en el Apartado 4.19.

Las probetas fueron secadas a temperatura de 35°C hasta masa constante y medidas en el equipo Laser Comp heat flow meter instrument de medición del flujo de calor.

En la Tabla 6.10 se refleja la conductividad térmica del material de yeso obtenida para las diferentes dosificaciones en relación con las densidades de cada una de las muestras. Se aprecia la existencia de una correlación entre ambos parámetros, resultando un dato muy favorable la caída de la conductividad a medida que incorporamos polímero, llegando a ser del orden de un 66% menor en las muestras Y4PW y Y4PG respecto de las probetas de referencia Y. Analizando los resultados desde otra perspectiva (Figuras 6.22 y 6.23), puede observarse que la conductividad térmica decrece a medida que se incrementa la sustitución de yeso por espuma de poliuretano. Esto puede ser debido a la estructura de celdas cerradas que la espuma produce en el interior de la matriz de yeso. Sus poros contienen aire y esto hace que la conductividad térmica resulte menor que la de otros constituyentes.

Por otro lado, si se comparan los resultados obtenidos con los datos de algunos materiales aislantes térmicos tradicionales, como puede ser el

yeso aligerado con perlita, se comprueba que a partir de relaciones yeso/poliuretano de 1/2 y superiores (probetas Y2PG y Y2PW en adelante), ya se alcanzarían los valores de referencia en torno a 0,18 W/m·K. Los resultados obtenidos son semejantes a los de otros materiales de construcción empleados con fines de aislamiento térmico.

Ejemplo	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m*K)
Enlucido de yeso con perlita	--	0,1800
Enlucido de yeso	--	0,3000
Hormigón con áridos ligeros	--	0,3300
Y	1477	0,3057
Y0,5PG	1323	0,2931
Y1PG	1140	0,2626
Y2PG	795	0,1828
Y3PG	590	0,1105
Y4PG	516	0,1014
Y0,5PW	1258	0,3160
Y1PW	1114	0,2701
Y2PW	879	0,1861
Y3PW	674	0,1285
Y4PW	535	0,1039

Tabla 6. 10. Densidad aparente seca y conductividad térmica de materiales tradicionales de construcción aligerados⁹² y de la referencia y de las Series I y II

⁹² EN 12524:2000. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values.

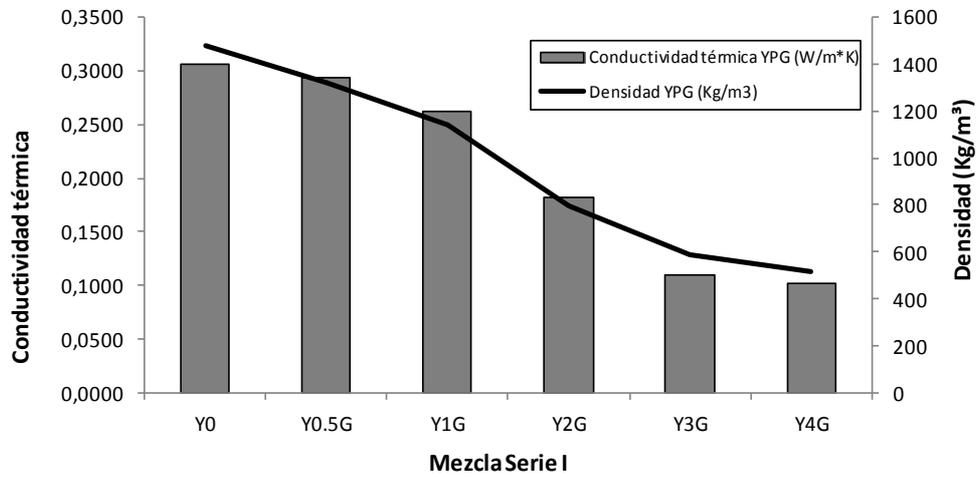


Figura 6. 22. Relación entre la conductividad térmica y la densidad de la referencia y de la Serie I

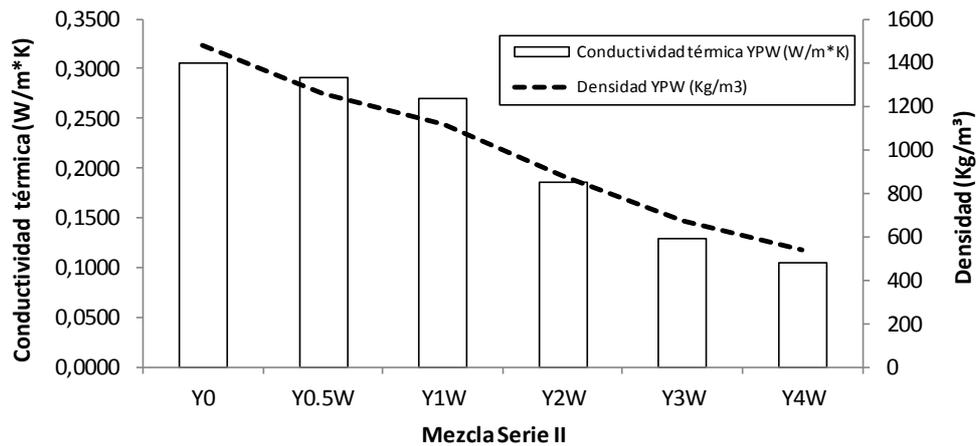


Figura 6. 23. Relación entre la conductividad térmica y la densidad de la referencia y de la Serie II

6.4.2.10 Determinación del comportamiento acústico

La determinación del comportamiento acústico en probetas de yeso con poliuretano gris se ha llevado a cabo en las instalaciones de Grupo Antolín, según lo descrito en el Apartado 4.20.

En la Tabla 6.11 se indican los valores de aislamiento medio se han calculado para diferentes bandas de frecuencia, entre 500 Hz y 10 KHz y

entre 50 Hz y 4KHz, así como el peso de cada una de las probetas de las diferentes dosificaciones. El aislamiento acústico de todas las mezclas se representa en la gráfica de la Figura 6.24.

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que el aislamiento acústico es directamente proporcional al peso de las probetas. Este dato indica que, en un principio, las probetas de referencia inducen un mejor comportamiento acústico que las que incorporan poliuretano en su composición, que son más ligeras.

Serie	Mezcla	500-10000 (Db)	500-4000 (Db)	Espesor (mm)	Peso (g)
Referencia	Y	48,9	51,40	30	7200
Serie I	Y0,5PG	44,9	45,7	30	6200
	Y1PG	45,9	46,8	30	5700
	Y2PG	41,9	43,2	30	3900
	Y3PG	41,8	43,8	30	3000

Tabla 6. 11. Valores numéricos de aislamiento acústico de la referencia y de la Serie I para diferentes bandas de frecuencia

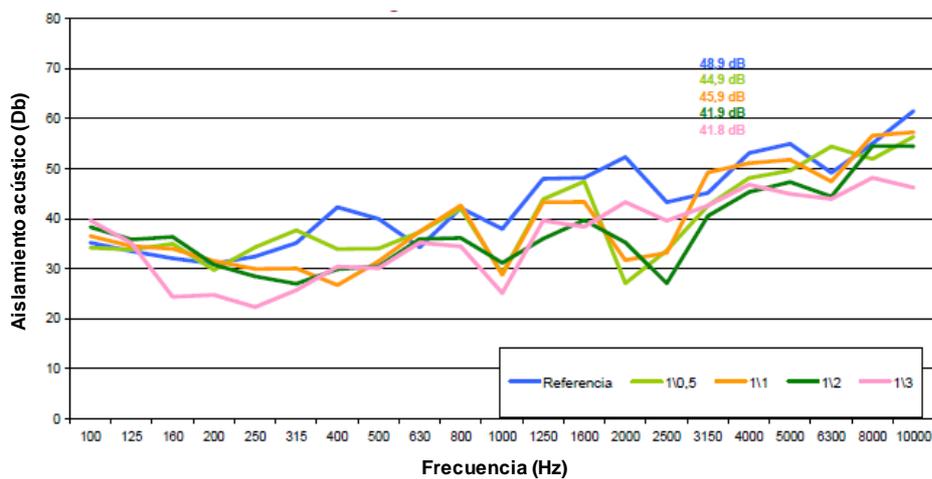


Figura 6. 24. Aislamiento acústico en función de la frecuencia de la referencia y de la Serie I

No obstante, si se analizan los resultados desde otro punto de vista, es decir, calculando el valor de la relación aislamiento/peso para dar una idea del aislamiento acústico por cada kilo de material, y no por cada pieza con un determinado volumen, se observa que la tendencia se invierte (Figura 6.25) lo que significa que, en peso, el nivel de aislamiento no experimenta una disminución tan significativa.

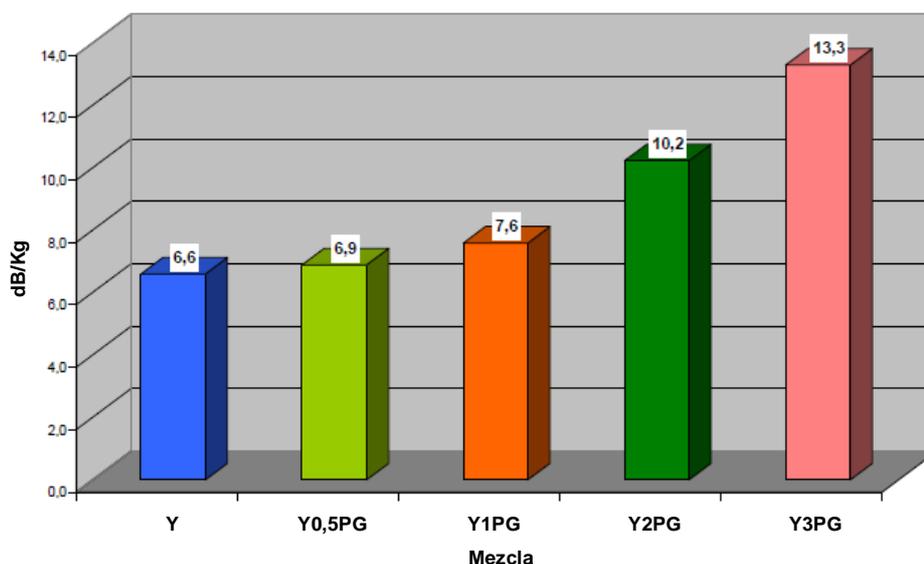


Figura 6. 25. Relación aislamiento/Peso (Db/Kg) de la referencia y de la Serie I

Otros parámetros importantes para determinar el comportamiento acústico del material de yeso-poliuretano, son el coeficiente absorción y la impedancia acústica medidos en tubos de impedancia y cámara de reverberación. Sin embargo, en esta Tesis Doctoral no se ha realizado ya que, durante el proceso de fraguado del yeso, los productos de hidratación son elásticamente restringidos por las partículas de poliuretano, lo cual podría reducir la porosidad abierta del yeso y en consecuencia, su absorción de ruido, no considerándose por tanto, un

material absorbente acústico en su conjunto. Este comportamiento ha sido observado en el trabajo que otros investigadores han realizado en materiales conglomerados con adiciones como el yeso con granulado de corcho o el mortero con *coke* de petróleo⁹³.

6.5 Conclusiones

En este capítulo se han dosificado los yesos aligerados a partir de la incorporación progresiva de dos poliuretanos espumados reciclados triturados, obteniendo mezclas de buena calidad de una manera sencilla y posteriormente, se ha procedido a su caracterización de acuerdo con la normativa vigente.

Aunque la microestructura del yeso, que en principio cristaliza en forma de aguja, es responsable de la variación de muchos parámetros tales como las condiciones de hidratación, las propiedades del yeso, la temperatura y los agregados utilizados en su preparación, hay ciertas propiedades que se ven afectadas por la inclusión de espuma de poliuretano en las mezclas fabricadas. Por lo tanto, se puede establecer que la cantidad de espuma polimérica presente en la composición es el factor que explica la variación en las propiedades de estos compuestos.

De acuerdo con este parámetro, se ha comprobado que la cantidad de agua necesaria para una consistencia adecuada aumenta con el porcentaje de espuma añadida aunque, por otro lado, este incremento de agua favorece en gran medida el tiempo de trabajabilidad de las

⁹³ Frías M, Jiménez-Mateos J.M, Pfretzschner J, Olmeda J, Rodríguez R.M, Sánchez Rojas M.I. Development of blended cement mortars with acoustic properties using petroleum coke. *Constr Build Mater* (2011), 25, 1086-1092.

muestras, es decir, no sólo lo mantiene sino que mejora el tiempo que transcurre antes de alcanzar el principio de fraguado. De igual forma, esta mejora de la trabajabilidad se debe a un retraso en el fraguado que se justifica por la progresiva reducción del conglomerante.

En estado endurecido, las densidades secas a 7 días para ambas espumas disminuyen en torno a un 65% cuando la relación yeso/polímero es de 1/4, pasando de 1477 kg/m³ en mezclas de referencia (Y), a 516 kg/m³ para la dosificación con más alta proporción de poliuretano gris en su composición (Y4PG), y a 535 kg/m³ en la mezcla Y4PW de poliuretano blanco, lo que significa que realmente se consigue una reducción de peso muy importante. A pesar de que la disminución progresiva de la densidad da lugar a un aumento en la porosidad, que repercute en las propiedades mecánicas produciendo una disminución de resistencias importante, las dosificaciones Y2PW, Y1PW, Y0,5PW, Y1PG y Y0,5PG, cumplen el mínimo requerido por la norma, de 1,0 MPa de resistencia a flexión y 2,0 MPa a compresión.

En cuanto a la adherencia, si bien es cierto que numéricamente el valor disminuye con el porcentaje de polímero, el tipo de rotura es adecuado y siempre se produce por cohesión en mezclas con alta sustitución de yeso por poliuretano, por lo que habría que buscar una situación de compromiso entre la pérdida de adherencia y el porcentaje de adición de polímero.

La adición de estos residuos de poliuretano mejora el comportamiento térmico, reduciendo la conductividad térmica hasta un 66% frente a la del material de referencia (sin PU). Además, su comportamiento térmico

frente a ensayos de TGA indica que la degradación del material sólo se produce a temperaturas elevadas, y que la inclusión de poliuretano no influye ni disminuye la resistencia al calor inicial del yeso.

El aislamiento acústico del material depende en gran medida de la masa del mismo, siendo mayor en aquellas mezclas que mayor peso tienen, como la referencia. No obstante, se han obtenido resultados óptimos de aislamiento acústico considerándose los datos como una relación entre el aislamiento y el peso, resultando que las mejores relaciones aquellas con mayor cantidad de poliuretano en su composición, lo que da un claro indicio de su buen comportamiento como aislante acústico.

Analizando de manera general los resultados obtenidos entre las dos series de polímeros, se ha comprobado que la con la espuma blanca se obtienen en general mejores datos en todas las propiedades (hasta dosificaciones Y3PW, ya que para probetas Y4PW el volumen de espuma es tan elevado que las propiedades no son adecuadas en ningún caso). Esta tendencia puede deberse a que la granulometría del poliuretano blanco es menor, por lo que la superficie específica de contacto con el agua aumenta, creando menor fricción entre partículas y obteniéndose mejores propiedades.

Capítulo VII: Caracterización de mezclas de yeso con residuo de poliamida en polvo

7 Caracterización de mezclas de yeso con residuo de poliamida en polvo

7.1 Introducción

Durante los procesos de sinterizado, gran parte de la poliamida en polvo que se utiliza como materia prima no se sinteriza y se vuelve a reutilizar. Con el tiempo, y debido a los sucesivos tratamientos térmicos, pierde parte de sus propiedades, experimentando cambios en su estructura⁹⁴. No obstante, las propiedades morfológicas no se ven afectadas, manteniendo su forma y tamaño iniciales⁹⁵. Tras un número limitado de usos, la poliamida en polvo ya no sirve para la función que se la dio inicialmente, convirtiéndose en un residuo. Una opción alternativa y sostenible al abandono de este residuo en vertedero, es reutilizarlo como incorporación de cargas aligerantes para la obtención de nuevos materiales de construcción, como son los yesos con residuo de polvo de poliamida. De esta manera, contribuimos al desarrollo sostenible y a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El objetivo de este capítulo es analizar la compatibilidad entre los residuos de poliamida en polvo (PA) y el yeso mediante la sustitución, en volumen, de yeso por poliamida, para obtener un nuevo material de

⁹⁴ Dotchev K, Yusoff W. Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal* (2009), 15, 192-203.

⁹⁵ Goodridge R.D, Tuck C.J, Hague R.J.M. Laser sintering of polyamide and other polymers. *Polym Matt Sci* (2012), 57, 29-69.

yeso aligerado y la posterior caracterización las diferentes mezclas obtenidas. Para ello, se ha llevado a cabo la determinación de las propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

7.2 Justificación del porcentaje de sustitución de yeso por poliamida

El procedimiento de trabajo seguido para la sustitución de yeso por poliamida ha sido el mismo que el empleado en mezclas de yeso con poliuretano, descrito en el Capítulo VI (Apartado 6.2), introduciendo cantidades de polímero cada vez mayores hasta alcanzar un máximo limitado para que las mezclas sean trabajables.

7.3 Experimental

El proceso de fabricación de los yesos aligerados se basa en la adición progresiva de polvo de poliamida reciclada en sustitución del yeso. La obtención de una consistencia adecuada de las mezclas, es el parámetro que se fija en todos los casos, según la norma UNE-EN 13279-2:2006, que viene dada por la relación agua/conglomerante total, considerando el conglomerante total como la suma de la cantidad de yeso y el polvo de poliamida:

Conglomerante Total = Agua / (Yeso + Residuo de Poliamida ($a/(Y+PA)$)).

La nomenclatura empleada para la designación de las diferentes pastas se presenta utilizando el yeso de construcción B1 como yeso de referencia y se designan de la siguiente manera:

- Y: mezclas de referencia.
- YPA: mezclas de yeso con residuo poliamida en polvo.

Las mezclas de estudio se clasifican a su vez según la proporción de sustitución, en volumen, de yeso por poliamida, según lo indicado en la Tabla 7.1.

Mezcla	Relación en volumen (Y/PA)
Y	1/0
Y0,5PA	1/0,5
Y1PA	1/1
Y2PA	1/2
Y3PA	1/3
Y4PA	1/4

Tabla 7. 1. Relación en volumen entre la cantidad de residuo yeso y de residuo de poliamida

Para este experimento se ha utilizado agua común limpia, manteniendo su temperatura constante en $24 \pm 1^\circ\text{C}$ en el momento del experimento.

El procedimiento de mezclado y fabricación de probetas ha seguido la misma metodología que la indicada en el Capítulo VI (Apartado 6.3.1).

7.4 Resultados y discusión

7.4.1 Caracterización en estado fresco

7.4.1.1 Relación agua/yeso+poliamida ($a/(Y+PA)$)

La consistencia se ha llevado a cabo mediante el ensayo de la mesa de sacudidas (según lo descrito en el Apartado 4.7.1), que determina la cantidad de agua necesaria para obtener una buena trabajabilidad y plasticidad en las muestras.

En la Figura 7.1 se puede observar que la incorporación al conglomerante de un volumen de poliamida cada vez mayor supone un ligero incremento de la relación $a/(Y+PA)$, en peso, para asegurar una buena trabajabilidad. En la Tabla 7.1 se observa que la dosificación con mayor sustitución de yeso por poliamida (Y4PA), requiere una relación $a/(Y+PA)$ de 0,50, que representa un 25% más de agua respecto a la referencia (Y). Este comportamiento puede ser debido al hecho de que a medida que se incorpora mayor cantidad de poliamida, el peso total del conglomerante (Y+PA) decrece, lo que significa que la relación $a/(Y+PA)$ en peso aumenta. Este efecto es inversamente proporcional si se considera el volumen de la probeta. En otras palabras, se producen menores incrementos de $a/(Y+PA)$ para el mismo volumen a medida que se añade poliamida, lo que induce a pensar que existe un menor contenido de agua para cada probeta.

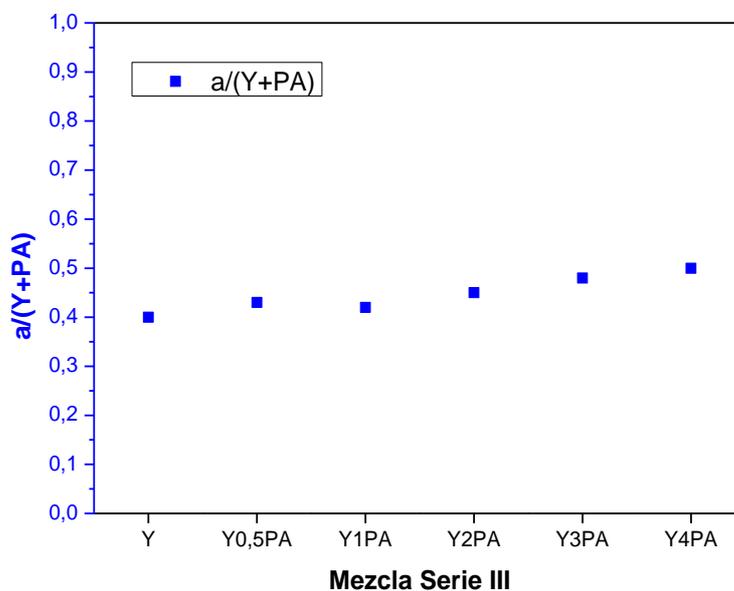


Figura 7. 1. Relación $a/(Y+PA)$ de la referencia y de las mezclas de la Serie III

Serie	Mezcla	a/(Y+PA)	Tiempo de fraguado (min)
Referencia	Y	0,40	10,3
Serie III (PA)	Y0,5PA	0,43	16,0
	Y1PA	0,42	18,0
	Y2PA	0,45	21,0
	Y3PA	0,48	26,0
	Y4PA	0,50	30,0

Tabla 7. 2. Relación a/(Y+PA) y tiempos de fraguado de la referencia y de la Serie III

7.4.1.2 Tiempo de principio de fraguado

La determinación del principio de fraguado se ha realizado por el método de la Aguja de Vicat según lo descrito en el Apartado 4.8.1.

La Figura 7.2 recoge los resultados obtenidos, donde se observa que la inclusión al yeso de un volumen cada vez mayor de poliamida, requiere mayores tiempos de fraguado y produce una mejora de la trabajabilidad del material. De esta manera, para las mezclas con alto contenido en poliamida (Y4PA) se alcanzan tiempos de fraguado de hasta tres veces mayores respecto de la referencia (Y). La explicación de este efecto podría ser que, durante el proceso de mezclado y principio de fraguado, la poliamida absorbe una cierta cantidad de agua y de iones calcio que expulsa posteriormente durante el fraguado⁹⁶. Por lo tanto, es posible afirmar que al añadir poliamida a las mezclas con yeso, podrían modificarse las propiedades reológicas del material, obteniendo yesos con menor tendencia a la segregación, lo que facilitaría su aplicación y puesta en obra.

⁹⁶ Eve S, Gomina M, Hamel J, Orange G. Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites. J Eur Ceram Soc (2006), 26, 2541–2546.

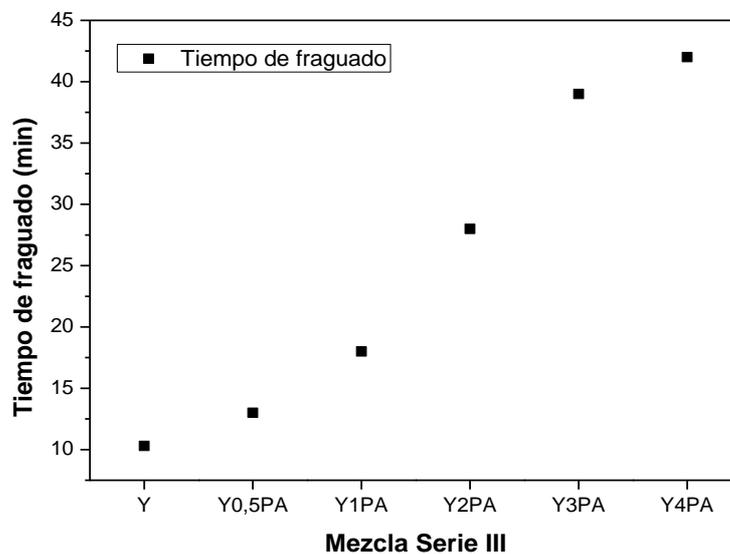


Figura 7. 2. Tiempo de fraguado de las mezclas de la referencia y de la Serie III

A la vista de los resultados obtenidos, tanto en lo referido a la relación $a/ (Y+PA)$ como a los tiempos de fraguado, puede observarse que a mayores cantidades de poliamida se produce incremento de los tiempos de trabajabilidad del material obtenido (Tabla 7.2). Esto es debido en parte a que el contenido de agua es cada vez mayor, lo que influye en el tiempo de fraguado, que se ve incrementado en torno a tres veces más en mezclas (Y4PA) respecto de la mezcla de referencia (Y), y a que la cantidad de conglomerante disminuye, lo que dificulta la reacción de fraguado, es decir, la formación continuada y en cadena de la red cristalina del yeso.

La gráfica de la Figura 7.3 muestra una buena correlación entre el tiempo de fraguado y la relación agua/yeso, con una tendencia de tipo lineal ($R=0,958$).

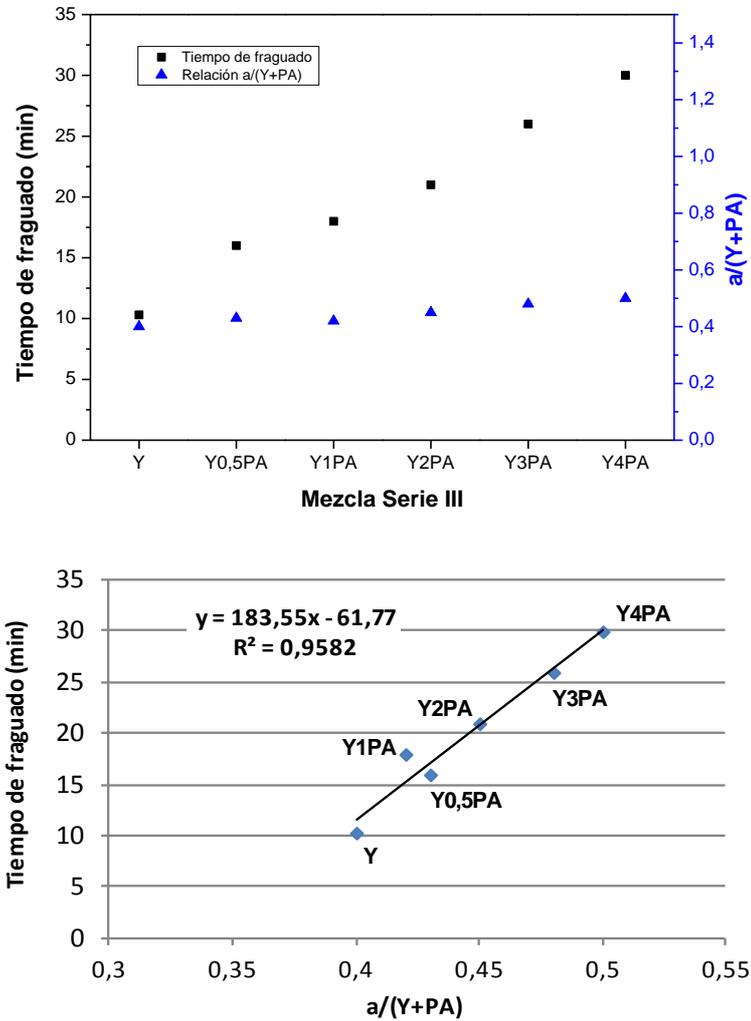


Figura 7. 3. Relación $a/(Y+PA)$ y tiempos de fraguado de la referencia y de la Serie III

7.4.2 Caracterización en estado endurecido

7.4.2.1 Densidad aparente y capacidad de retención de agua

El procedimiento operatorio para determinar la densidad aparente y la capacidad de retención de agua se ha llevado a cabo mediante los métodos descritos en el Apartado 4.18.

La Tabla 7.3 muestra los resultados de densidad aparente obtenidos. En todos los casos se comprueba que la adición de poliamida en polvo en proporciones cada vez mayores reduce la densidad del material. La explicación puede venir dada por dos factores fundamentales, uno es el incremento de la relación $a/(Y+PA)$ con el aumento de poliamida, el otro debido a la disminución de la densidad, ya que se van sustituyendo cantidades cada vez mayores de yeso, de densidad $2,32 \text{ g/cm}^3$ por poliamida de densidad $1,07 \text{ g/cm}^3$.

En cuanto a la capacidad de retención de agua del material, se observa que aumenta en probetas con más cantidad de polímero, llegando a alcanzarse un 33,3% en dosificaciones Y4PA, lo que representa aproximadamente el doble respecto de la dosificación de referencia (Y) que alcanza un 16%.

Serie	Mezcla	Densidad aparente húmeda a los 7 días (Kg/m ³)	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)	Retención de agua (%)
Referencia	Y	1713	1477	16,0
Serie III	Y0,5PA	1436	1190	20,7
	Y1PA	1306	1074	21,6
	Y2PA	1148	909	26,3
	Y3PA	1076	829	29,8
	Y4PA	1001	751	33,3

Tabla 7. 3. Densidad aparente y capacidad de retención de agua de la referencia y de la Serie III

7.4.2.1.1 Resistencia a flexión y compresión

Los resultados obtenidos de resistencia a flexión y a compresión a 7 y 28 días para las diferentes dosificaciones indican que las resistencias decrecen a medida que se añade poliamida a las mezclas (Tabla 7.4, Figura 7.4). Esto puede ser debido tanto a la disminución de

conglomerante como al incremento de absorción de agua en los poros del material, por el progresivo incremento de la proporción de poliamida, dando lugar a una importante reducción de las resistencias mecánicas⁹⁷. No obstante, se cumplen los requerimientos mínimos de 1,0 MPa de resistencia a flexión y de 2,0 MPa de resistencia a compresión. en las dosificacuones Y2PA, Y1PA y Y0,5PA, a pesar de que el volumen de poliamida añadido es muy elevado.

Se observa que existe una buena correlación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión ($R=0,994$) (Figura 7.4). De esta manera, se podrían obtener mezclas de diseño que cumplan los requerimientos mínimos establecidos por la norma, fijando el parámetro de resistencia deseado. Por ejemplo, una dosificación Y2,5PA se encontraría dentro del rango de requerimiento mínimo.

Referencia	Mezcla	Resistencia a flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	
		7 días	28 días	7 días	28 días
	Y	5,92	6,19	15,49	15,64
Serie III	Y0,5PA	3,45	3,79	8,39	8,66
	Y1PA	2,47	2,59	6,38	6,54
	Y2PA	1,07	1,39	3,54	3,75
	Y3PA	0,71	0,90	2,27	2,37
	Y4PA	0,33	0,48	1,32	1,47

Tabla 7. 4. Resistencias mecánicas a 7 y 28 días de la Serie de Referencia y de la Serie III

⁹⁷ Calderón V, Gadea J, Gutiérrez-González S, Rodríguez A, Junco C, Martín A. Lightweight conglomerates made with recycled polymer foam. Proceedings in Second International Conference on Recycling and Reuse of Materials (2011), Kottayam, India.

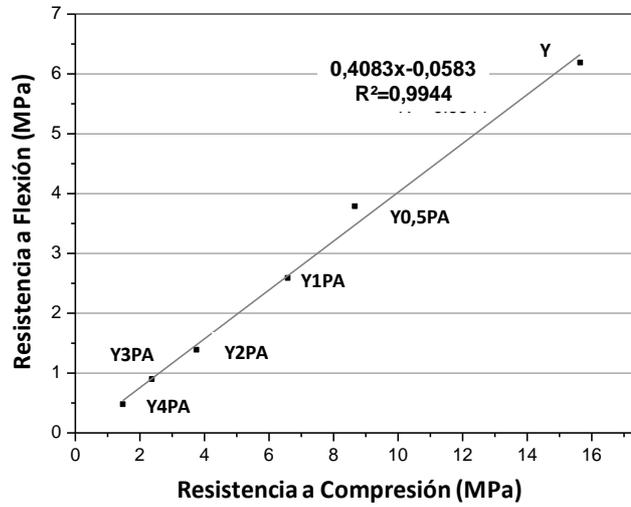


Figura 7. 4. Relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión a los 28 días de la referencia y de la Serie III

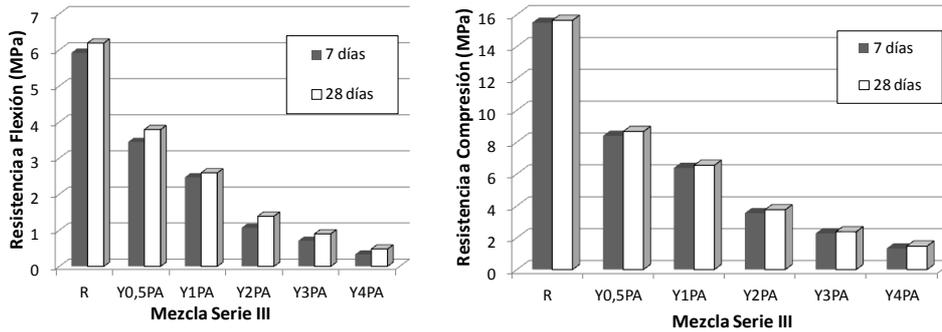


Figura 7. 5. Resistencias a flexión y a compresión a 7 y 28 días de la referencia y de la Serie III

La Tabla 7.5 muestra los valores medios de relación existente entre peso y resistencia a flexión y entre peso y resistencia a compresión, de las muestras de yeso aligeradas con poliamida y de otros materiales aligerados obtenidos de estudios previos⁹⁸.

⁹⁸ Del Río M, Hernández Olivares F. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. Mater Constr (2004), 54(275), 65–76.

Ejemplo	Peso/Resistencia a flexión	Peso/Resistencia a compresión
60% Arcilla expandida	113,90	28,48
20% Perlita	83,60	42,06
20% Vermiculita	86,01	55,80
3% Poliestireno	131,13	64,35
20% Corcho natural	98,03	63,82
Y0,5PA	80,34	35,49
Y1PA	106,13	41,77
Y2PA	258,51	62,04
Y3PA	25,71	89,51
Y4PA	400,62	130,81

Tabla 7. 5. Valores medios de datos mecánicos obtenidos en mezclas de yeso fabricadas con agregados ligeros

La mejor relación peso/resistencia a flexión se ha obtenido en las dosificaciones Y0,5PA y Y1PA con un ratio muy similar al de las mezclas tradicionales que contienen un 60% de arcilla expandida. Asimismo, se puede observar que dosificaciones con porcentajes de sustitución de hasta aproximadamente el 66% (Y0,5PA, Y1PA y Y2PA), obtienen mejores relaciones entre el peso y la resistencia a compresión que las probetas que incorporan un 3% de poliestireno o un 20% de corcho en su composición.

7.4.2.1.2 Dureza superficial Shore C

La dureza superficial Shore C se ha llevado a cabo según lo descrito en el apartado 4.13.

Los resultados obtenidos (Figura 7.6) muestran que la dureza superficial Shore C disminuye con el incremento de poliamida, debido a que la poliamida presenta menor dureza superficial que el yeso, que favorece la posibilidad de que estos compuestos sean penetrados o rayados por otros. Se observa una disminución progresiva de la dureza superficial

que se hace más evidente en dosificaciones con altos contenidos de poliamida en su composición. Así, la dureza mínima se obtiene en mezclas tipo Y4PA, que contemplan reducciones del 33,8% respecto de las mezclas de referencia (Y), a 28 días.

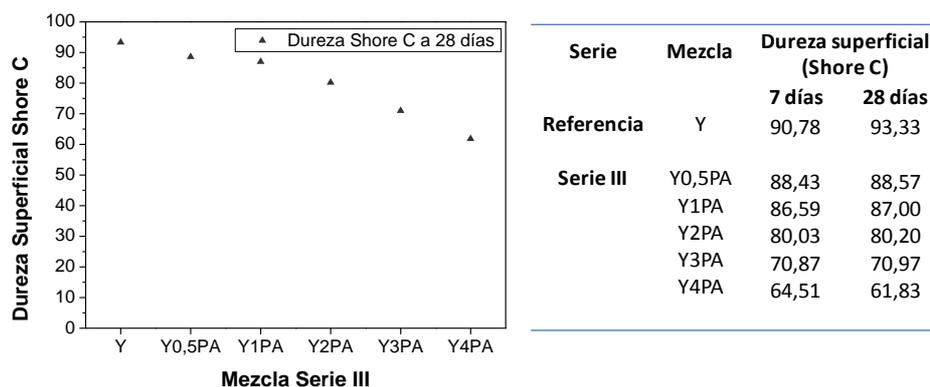


Figura 7. 6. Dureza superficial Shore C de la referencia y de la Serie III

7.4.2.2 Adherencia

El ensayo de adherencia se ha llevado a cabo según lo descrito en el apartado 4.15.

Los resultados de la adhesión medidos sobre soporte cerámico se muestran en la Tabla 7.6 y se representan en la gráfica de la Figura 7.7.

Se observa que los resultados de la fuerza de adherencia son menores a medida que aumenta la cantidad de poliamida en polvo sufriendo, respecto de la probeta de referencia Y, una disminución del 28,26% para la dosificación Y0,5PA y del 85,43% para la mezcla Y1PA, llegando a alcanzarse las máximas reducciones de pérdida de adhesión en dosificaciones con más polímero, siendo del 95,22% para la muestra Y4PA.

Analizando los resultados desde el punto de vista del tipo de rotura, se comprueba que en todos los ejemplos que incluyen dosificaciones hasta 1/2 (una parte de yeso por cada dos de poliamida), el tipo de rotura es por adhesión, tal como muestra la Figura 7.8, lo que significa que, en este sentido, la adherencia del yeso con el soporte cerámico no es adecuada. Por otro lado, y tomando como premisa que el valor de la adherencia en estos casos debe ser mayor o igual a $0,1 \text{ N/mm}^2$, en la Tabla 7.6, se determina que, tanto la referencia como las dosificaciones que incluyen poliamida en proporciones menores o iguales de 1/2, cumplen con la norma. En el caso de las mezclas Y3PA y Y4PA, la rotura se produce por cohesión (Figura 7.8), debido probablemente al aumento en la demanda de agua de las mezclas, que genera una disminución de la cohesión en la interfase yeso-poliamida. Para este tipo de rotura, la norma no establece requisitos mínimos en los valores de adherencia.

Serie	Mezcla	Adherencia (N/mm ²)	Pérdida de adherencia (%)
Referencia	Y	0,46	0
Serie III (PA)	Y0,5PA	0,33	28,26
	Y1PA	0,07	85,43
	Y2PA	0,05	90,00
	Y3PA	0,04	91,09
	Y4PA	0,02	95,22

Tabla 7. 6. Adherencia y pérdida de adherencia de la referencia y de la Serie III

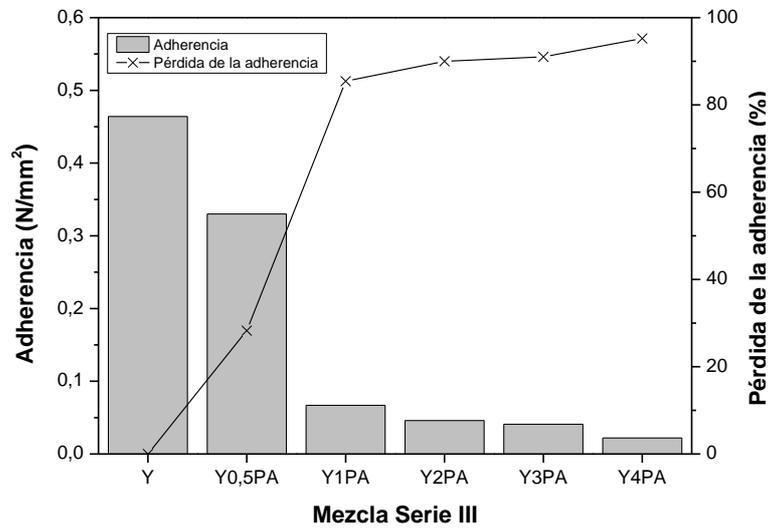


Figura 7. 7. Relación entre la adherencia y la pérdida de adherencia de la referencia y de la Serie III



Figura 7. 8. Rotura por adhesión en dosificaciones Y0,5PA y Y1PA



Figura 7. 9. Rotura por cohesión en dosificaciones Y3PA y Y4PA

7.4.2.3 Permeabilidad al vapor de agua

La determinación de la permeabilidad al vapor de agua se ha realizado según el procedimiento operatorio del Apartado 4.14.

Tanto la Tabla 7.7 como la Figura 7.10, muestran los resultados de permeabilidad obtenidos. Se observa que la permeabilidad es máxima en la mezcla Y3PA y representa un valor de hasta aproximadamente 2,5 veces mayor que el valor de permeabilidad del yeso de referencia (Y). Si la sustitución de yeso por poliamida es mayor (Y4PA), el valor de la permeabilidad decae un 11% respecto de la dosificación Y3PA. La explicación a este efecto se basa en que, a medida que se incrementa el volumen de poliamida, los poros se van llenando hasta un punto en el cual se obturan, impidiendo el paso del vapor de agua a su través.

Serie	Mezcla	Permeabilidad (Kg/m ² ·s·Pa, x10 ⁻¹¹)
Referencia	Y	1,058
Serie III (PA)	Y0,5PA	1,173
	Y1PA	1,393
	Y2PA	2,430
	Y3PA	2,505
	Y4PA	2,231

Tabla 7. 7. Permeabilidad al vapor de agua de la referencia y de la Serie III

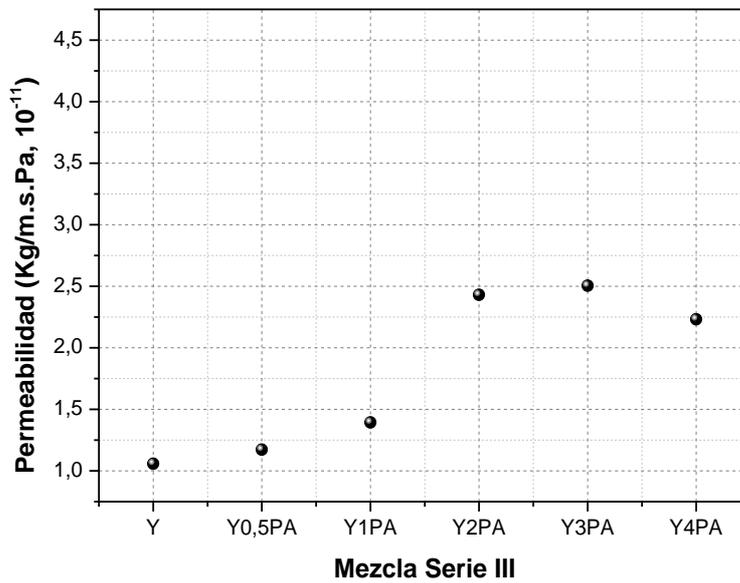


Figura 7. 10. Permeabilidad al vapor de agua de la referencia y de la Serie III

7.4.2.4 Absorción por capilaridad

La determinación de la absorción por capilaridad se ha realizado según el procedimiento operatorio del Apartado 4.16.

La Figura 7.11 muestra que se produce un incremento de la absorción por capilaridad de las muestras a medida que la cantidad de poliamida aumenta. Este hecho puede ser debido tanto a la capacidad de absorción como a la propia porosidad de la poliamida.

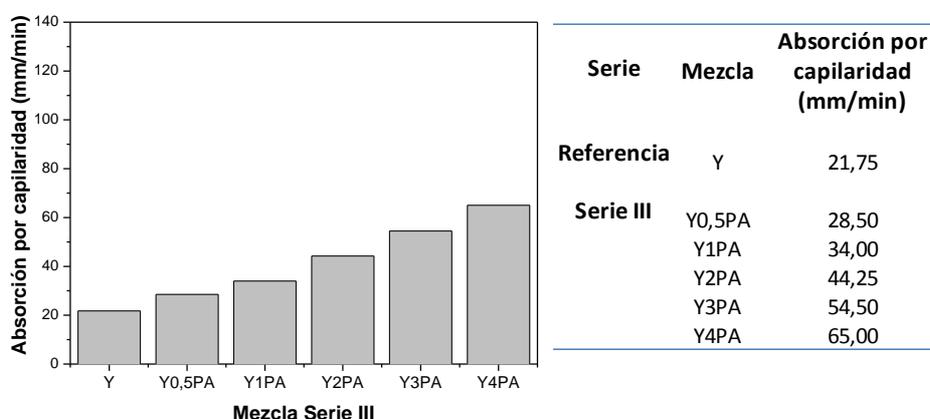


Figura 7. 11. Absorción por capilaridad de la referencia y de la Serie III

7.4.2.5 Porosidad

La porosidad de las diferentes mezclas se ha analizado utilizando dos técnicas, la tomografía axial computarizada (TAC), que determina la macroporosidad o porosidad de tamaño de poro superior a $170 \mu\text{m}$ ⁹⁹, y la porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), que revela la microporosidad o porosidad de tamaño de poro comprendido entre $170 \mu\text{m}$ y 5 nm .

1. Tomografía Axial Computarizada (TAC)

Se ha medido la macroporosidad de las mezclas según lo descrito en el Apartado 4.11.

En la Figura 7.11 se puede observar la sección axial de cada probeta, siendo el color negro el menos denso y por lo tanto, el correspondiente a los poros, y el blanco el más denso, correspondiente al sulfato cálcico hemihidratado. Entre ambos, hay una escala de colores cuyo pixelado

⁹⁹ Suzuki T, Ogata H, Takada R, Aoki M, Ohtsu M. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete. *Constr Build Mater* (2010), 24, 2347–2352.

pertenece al resto de materiales. Por ejemplo, el fucsia, azul y verde corresponden al resto de sulfatos y el amarillo a la poliamida.

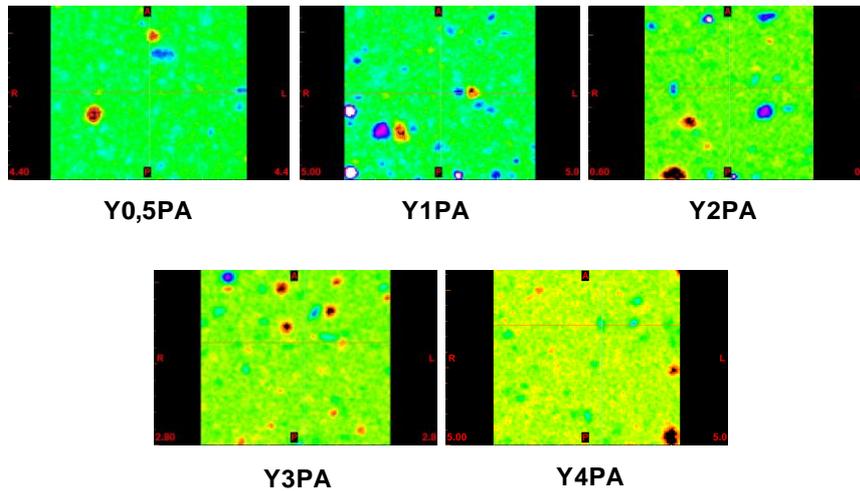


Figura 7. 12. Sección axial de las probetas Y0,5PA-Y1PA-Y2PA-Y3PA-Y4PA obtenidas mediante TAC

	Mezcla	Porosidad TAC (%)
Referencia	Y	0,60
Serie III (PA)	Y0,5PA	0,96
	Y1PA	1,57
	Y2PA	1,87
	Y3PA	2,86
	Y4PA	3,00

Tabla 7. 8. Porosidad obtenida mediante TAC de la referencia y de la Serie III

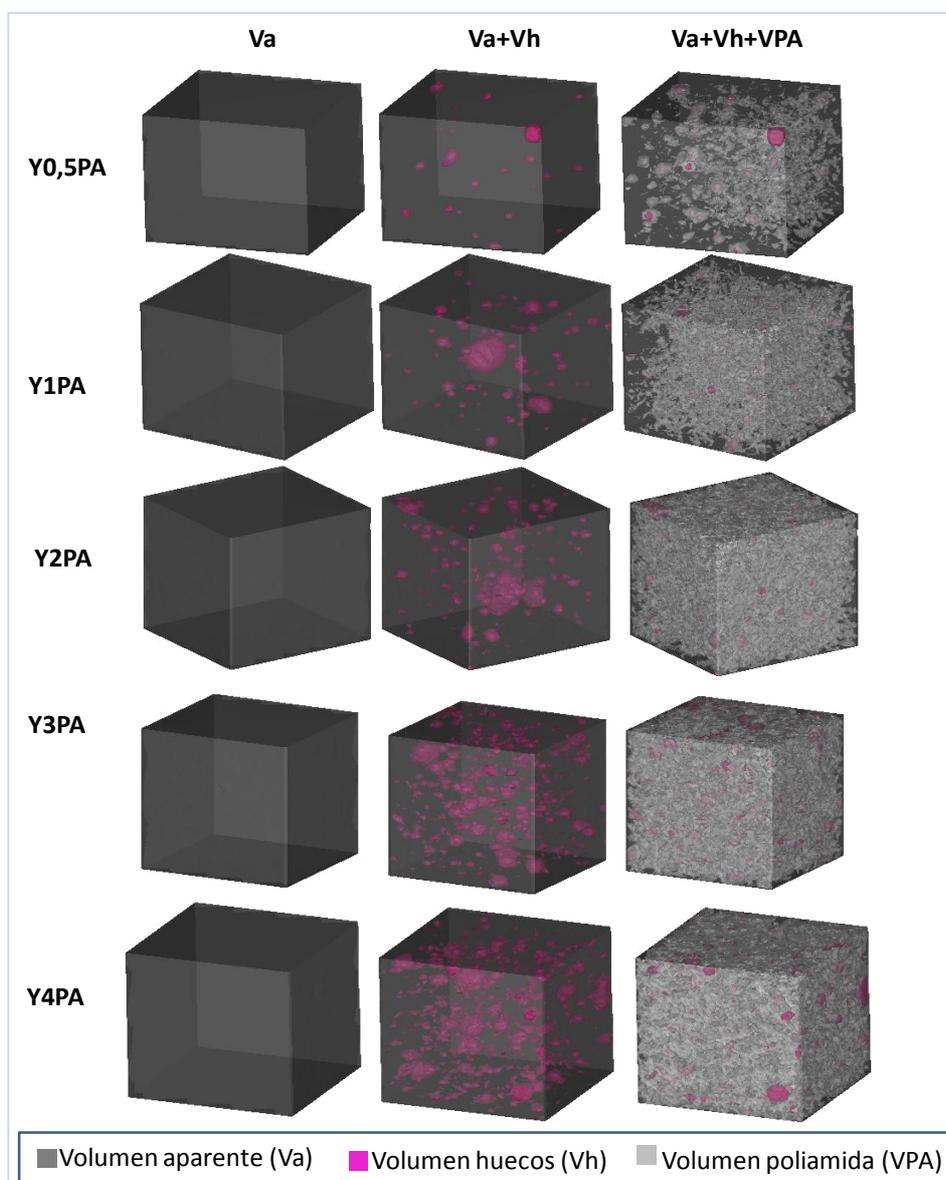


Figura 7. 13. Vista 3D de la macroporosidad en probetas de la Serie III

2. Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP)

Las probetas de dimensiones $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$, después de ser curadas durante 7 días en estufa a $35\text{-}40^\circ\text{C}$, se subdividieron en piezas de menor tamaño de aproximadamente 1 cm^3 . Seguidamente se introdujeron en

un desecador para extraer el agua libre de las muestras y se midió su porosidad mediante la técnica descrita en el Apartado 4.10.

La estimación y valorización de la microestructura de poros de las diferentes mezclas se muestra en las Figuras 7.14-7.16. La Figura 7.14 representa el volumen intruído acumulado y muestra el diámetro crítico de poro que indica el tamaño de poro interconectado que más se repite de forma continua, y corresponde a la pendiente máxima de la curva de porosidad acumulada. La Figura 7.15 muestra la curva de distribución diferencial que indica, igualmente, el diámetro crítico de poro representado como el pico máximo de la curva de distribución. Durante el ensayo de porosimetría, cuando la presión es inferior a un valor crítico, el mercurio penetra en los microporos de mayor tamaño que tienen acceso al exterior en la superficie de la probeta. Si la presión excede este valor crítico, el mercurio comienza a filtrarse a través del material. Por lo tanto, el significado físico del diámetro crítico de poro es el diámetro de poro por encima del cual no existe camino interconectado a través de la probeta¹⁰⁰.

¹⁰⁰ Cui L, Cahyadi J.H. Permeability pore structure of OPC paste. *Cem Concr Res* (2001), 31, 277–282.

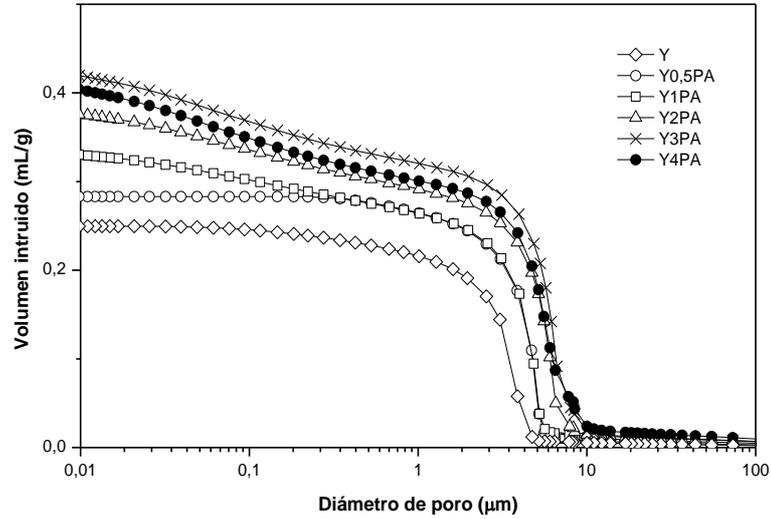


Figura 7. 14. Volumen intruido acumulado de la referencia y de la Serie III

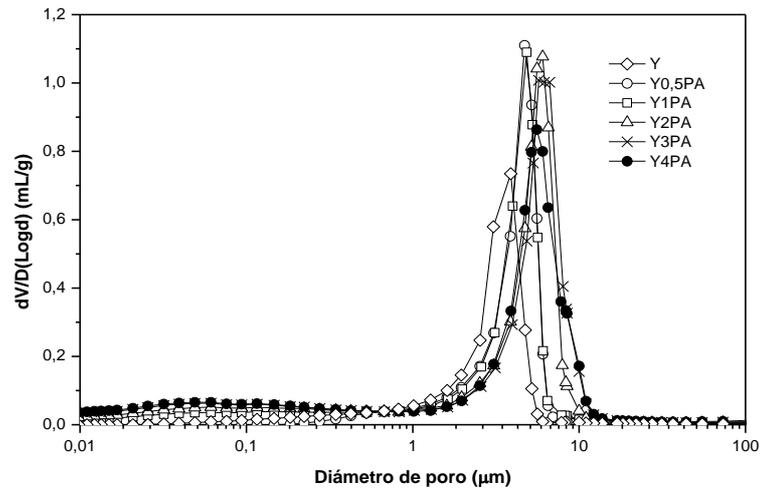


Figura 7. 15. Distribución diferencial de la referencia y de la Serie III

Analizando los resultados de la Tabla 7.9, el diámetro crítico de poro aumenta desde 3,89 μm para la referencia (Y) hasta 6,27 μm en dosificaciones Y3PA. Es decir, se produce un incremento progresivo a medida que la sustitución de yeso por poliamida es mayor, hasta un valor umbral. Por otro lado, se observa que la dosificación que incorpora

mayor contenido de poliamida en su composición (Y4PA), invierte este efecto, dando lugar a diámetros de menor tamaño. Este efecto puede ser debido a que el polímero se distribuye de forma homogénea generando una red conectada de capilares, llegando un momento en el que, debido a la gran cantidad de poliamida, se produce un “empaquetamiento” que hace que esos capilares sean más pequeños y a su vez, que la porosidad total sea menor.

Serie	Mezcla	Diámetro crítico de poro (μm)	Porosidad MIP (%)
Referencia	γ	3,89	37,38
Serie III (PA)	Y0,5PA	4,94	35,64
	Y1PA	5,04	35,00
	Y2PA	6,03	34,59
	Y3PA	6,27	33,44
	Y4PA	5,81	29,20

Tabla 7. 9 Diámetro crítico de poro y porosidad total de la referencia y de la Serie III

La Figura 7.16 representa la distribución de tamaño de poro con respecto al porcentaje de porosidad total de cada muestra. La clasificación del tamaño de poro se ha realizado de acuerdo con la bibliografía existente¹⁰¹. De esta manera, los tamaños de poro de más de 10 μm son referidos al aire atrapado. Los poros de tamaño comprendido entre 0,05 y 10 μm representan a los capilares grandes, y finalmente, los poros con tamaños comprendidos entre 0,01 y 0,05 μm son asociados a los capilares medianos que afectan a la

¹⁰¹ Mindess S, Young J.F, Darwin D. Concrete. 2nd ed. Englewood Cliffs 483 (NJ): Prentice Hall, 2002.

permeabilidad¹⁰², ya que la porosidad capilar está asociada a un mayor efecto en los procesos de transporte del vapor de agua a través de la muestra siendo mayor cuanto mayor es el número de este tipo de poros. Tal y como era de esperar, la adición de poliamida crea grandes cantidades de este tipo de poros que induce a una reducción de los capilares grandes.

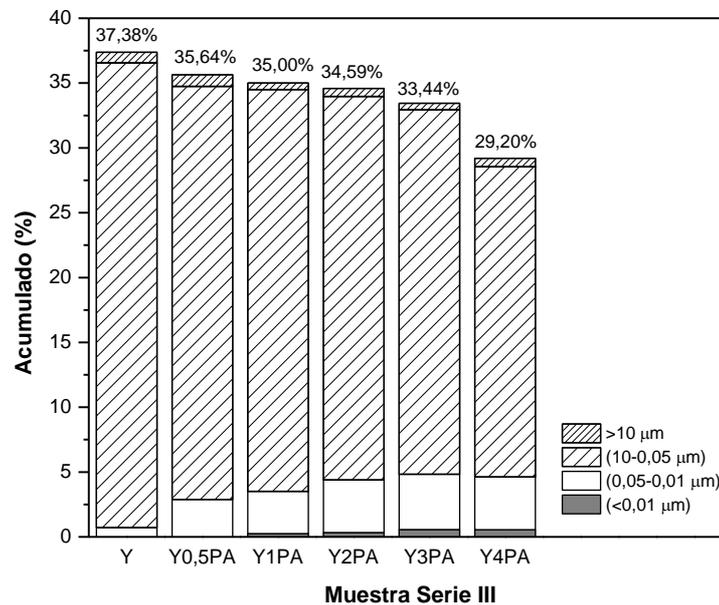


Figura 7. 16. Distribución de tamaño de poro de la referencia y de la Serie III

Los datos de porosidad concuerdan con los resultados de permeabilidad obtenidos anteriormente, por lo que ambos parámetros están estrechamente ligados entre sí¹⁰³, como puede apreciarse en la Figura 7.17.

¹⁰² Pipilikaki P, Beazi-Katsioti M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes. *Constr Build Mater* (2009), 23, 1966–1970.

¹⁰³ Caré S, Derkx F. Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. *Constr Build Mater* (2011), 25, 48-56.

El aumento progresivo en el diámetro crítico de poro junto con la reducción del porcentaje de los capilares grandes (0,05-10 μm), y el incremento gradual de los capilares medianos (0,01-0,05 μm), produce un aumento de la permeabilidad en todas las muestras. El vapor de agua pasa con mayor facilidad a través de la probeta, ya que los conductos capilares están distribuidos uniformemente en el yeso, conectados unos con otros mediante una fina red capilar.

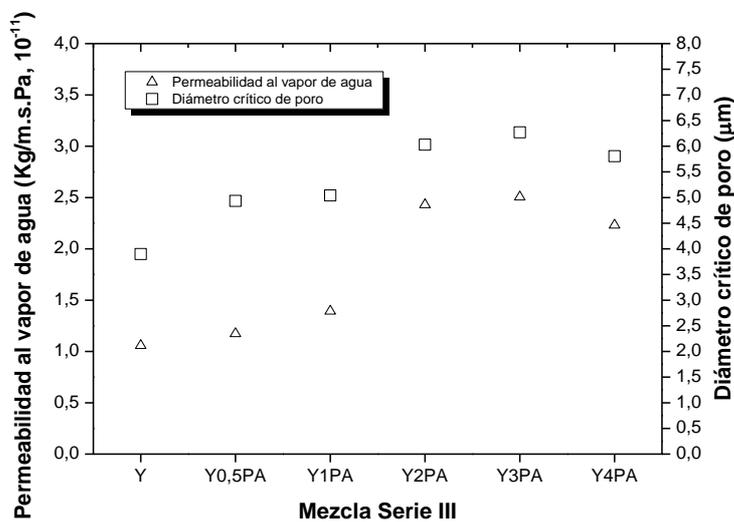


Figura 7. 17. Comparativa entre la permeabilidad y el diámetro crítico de poro de la referencia y de la Serie III

Para determinar la porosidad total de cada muestra, se ha tenido en cuenta la macro porosidad obtenida por TAC y la microporosidad obtenida por MIP (Tabla 7.11).

Serie	Mezcla	Porosidad TAC (%)	Porosidad MIP (%)	Porosidad total (%)
Referencia	γ	0,60	37,38	37,98
Serie III (PA)	Y0,5PA	0,96	35,64	36,60
	Y1PA	1,57	35,00	36,57
	Y2PA	1,87	34,59	36,46
	Y3PA	2,86	33,44	36,30
	Y4PA	3,00	29,20	32,20

Tabla 7. 10. Porosidad total obtenida mediante TAC y MIP de la referencia y de la Serie III

7.4.2.6 Caracterización microestructural de los yesos por FSEM

El análisis microestructural del yeso revela que se produce la penetración del polímero en los poros y huecos que se forman entre los cristales de yeso. En la Figura 7.18 se muestra la interfase yeso-poliamida, donde puede observarse una distribución homogénea de las partículas de poliamida en la matriz del yeso.

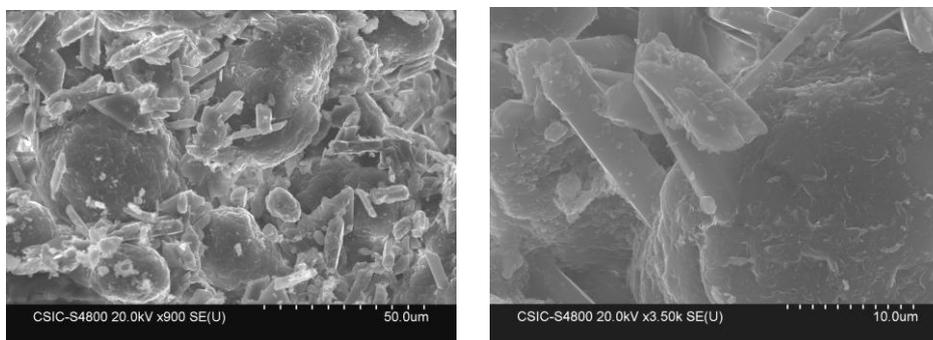


Figura 7. 18. FSEM de la interface yeso-poliamida

A esta muestra se le ha realizado un análisis de EDX aplicando para ello la metodología mapping donde, como cabía de esperar, se observa la total coincidencia espacial de las señales de calcio (C) y azufre (S), que corresponde al hueco ocupado por el yeso, mientras que el carbono (C) ocupa el espacio intermedio entre dichas partículas (Figura 7.19).

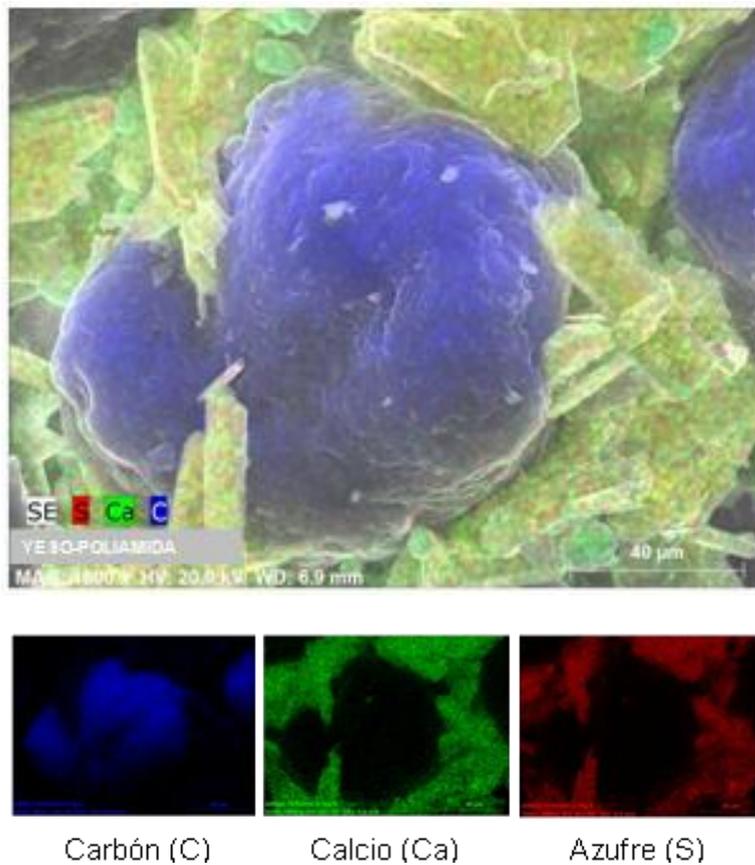


Figura 7. 19. FSEM y análisis mapping de la muestra Y2PA

7.4.2.7 Comportamiento térmico

7.4.2.7.1 TGA

Los materiales compuestos yeso-polímero obtenidos han sido caracterizados mediante termogravimetría (TGA), según lo descrito en el Apartado 4.5. El estudio determina la degradación que sufren todos los componentes con la temperatura, lo que ha permitido estimar el comportamiento frente al fuego de estos materiales.

En la Figura 7.20 se muestran los resultados del ensayo, donde puede observarse que, para la probeta de referencia, la primera pérdida de

masa se produce entre 90-180°C, debido a la descomposición del agua estructural del sulfato cálcico dihidratado, $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$, pasando primero a hemihidrato, $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{1/2}$ y después a anhidrita, CaSO_4 . El segundo tramo de descomposición, comprendido entre 580 y 700°C, se debe a la degradación de la dolomita, presente en el yeso comercial.

Para el resto de dosificaciones (Y0,5PA, Y1PA, Y2PA, Y3PA), se producen las mismas degradaciones que para probetas de referencia, con otro tramo adicional entre 400 y 500°C, que se corresponde con la descomposición de parte de la poliamida. Con los resultados obtenidos se puede considerar que el comportamiento térmico del material será aceptable, debido en parte a la gran resistencia térmica de la poliamida.

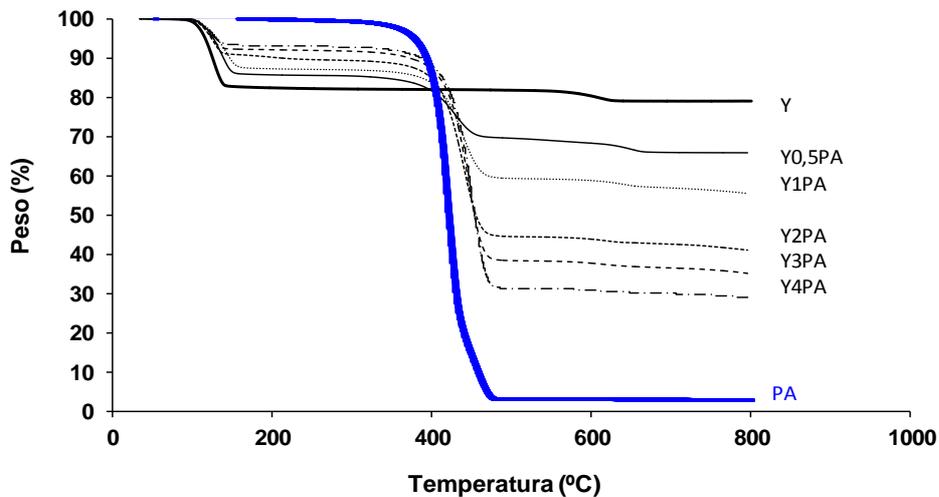


Figura 7. 20. TGA en Nitrógeno de las mezclas de la referencia, de la Serie III y de la poliamida

7.4.2.7.2 Conductividad térmica

Uno de los factores de los que depende la conductividad térmica es la relación existente entre ésta y el peso/densidad del material. Otro

parámetro importante es el coeficiente de conductividad térmica de los componentes que forman el material¹⁰⁴.

En la Tabla 7.12 se reflejan los datos de conductividad térmica del material con diferentes sustituciones de yeso por poliamida en polvo reciclada en relación con las densidades de cada una de las muestras. En la Figura 7.21 se aprecia la existencia de una correlación entre ambos parámetros, donde la disminución de la conductividad con el incremento de polímero alcanza el 54 % menos para las muestras Y4PA respecto de las probetas de referencia Y.

Además, si se comparan los valores obtenidos con los datos de los agregados que tradicionalmente se añaden al yeso (Tabla 7.12), se determina que a partir de relaciones yeso/poliamida de 1/3 y superiores, es decir, dosificaciones de Y3PA y Y4PA, ya se alcanzarían los valores de referencia en torno a 0,18 W/m·K. Por tanto, los resultados obtenidos son similares a los de los materiales de construcción con propiedades de aislamiento térmico, que habitualmente son utilizados en edificación.

¹⁰⁴ Li M, Wu Z, Chen M. Preparation and properties of gypsum-based heat storage and preservation material. *Energy Build* (2011), 43, 2314–2319.

Ejemplo	Conductividad térmica (λ) (W/m ² *K)	Resistencia térmica (M ² K/W)
Enlucido de yeso con perlita	0,1800	-
Enlucido de yeso	0,3000	-
Hormigón con áridos ligeros	0,3300	-
Y	0,3057	0,1013
Y0,5PA	0,2624	0,1281
Y1PA	0,2419	0,1337
Y2PA	0,1902	0,1604
Y3PA	0,1418	0,2207
Y4PA	0,1397	0,2220

Tabla 7. 11. Conductividad térmica de materiales tradicionales de construcción aligerados, de la referencia y de la Serie III

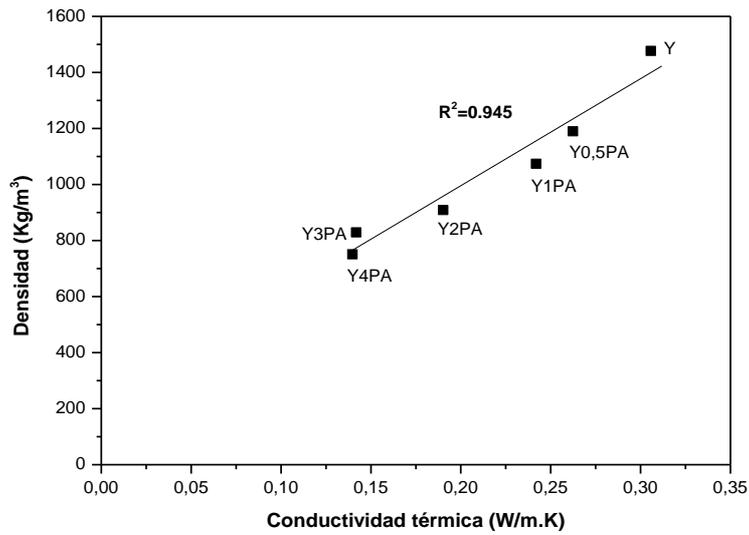


Figura 7. 21. Relación entre la conductividad térmica y la densidad de la Serie de Referencia y de la Serie III

7.5 Conclusiones

En este capítulo se han caracterizado y fabricado yesos aligerados con polvo de poliamida reciclada, obteniendo mezclas con propiedades adecuadas, de acuerdo a la normativa vigente.

Se ha comprobado que sustituciones elevadas de yeso por poliamida requieren mayores cantidades de agua para asegurar una buena trabajabilidad. Este hecho, junto con la mejora en la distribución de las partículas de poliamida entre los huecos de la estructura cristalina del yeso, permite una reducción parcial de la porosidad del material a medida que se incorpora polímero en la mezcla. Además, la adición de grandes volúmenes de poliamida incrementa la capacidad de retención de agua, lo que se traduce en mayores tiempos de trabajabilidad y en un aumento de la absorción por capilaridad del material. A partir de un volumen crítico de poliamida, se obturan los poros reduciéndose el tamaño crítico del poro y disminuyendo la permeabilidad al vapor de agua.

En todos los ejemplos estudiados se verifica que la adición progresiva de poliamida reduce proporcionalmente la densidad del material. Esto se atribuye en principio a la menor densidad de la poliamida frente a la densidad de yeso, y no a que exista un incremento en la porosidad del material, ya que, de hecho, la porosidad no sigue la misma tendencia, sino que disminuye con el incremento de poliamida que se añade a las mezclas.

Se constata una buena correlación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión de las mezclas de yeso con poliamida, lo que permite dar una idea de las proporciones óptimas de las mezclas para alcanzar los valores mínimos normalizados. La disminución de resistencias mecánicas a medida que se incrementa la cantidad de PA, puede ser atribuida a la presencia del polímero y al menor contenido de conglomerante de yeso en la mezcla. Sin embargo, existe una buena calidad de la zona intersticial yeso-poliamida que influye positivamente en la compatibilidad entre ambos componentes.

Existe una relación directa entre la microestructura porosa y la permeabilidad al vapor de agua de las muestras, de manera que dosificaciones hasta Y3PA producen un aumento en el diámetro de poro tamaño, una reducción de los capilares grandes y un aumento de los capilares medianos, lo que da lugar a un aumento de la permeabilidad al vapor de agua. Por el contrario, el efecto se invierte para las dosificaciones Y4PA, probablemente debido al efecto de llenado de las partículas de poliamida en los capilares interconectados que reducen el diámetro crítico de poro y en consecuencia, su permeabilidad al vapor de agua.

Se ha comprobado mediante TGA que la poliamida es capaz de resistir altas temperaturas sin descomponerse (380-580°C).

Así mismo, se ha demostrado que un mayor contenido de poliamida mejora significativamente la resistencia térmica del material. Este aumento está estrechamente ligado a la disminución de la densidad del material, que a su vez se ve reducida por el bajo peso de la propia

poliamida. Este efecto, sumado al alto poder aislante del material, son factores que mejoran el comportamiento térmico, reduciendo la conductividad térmica. Los valores obtenidos son comparables a los de otros materiales de construcción empleados con fines de aislamiento térmico.

Capítulo VIII. Reología de pastas yeso-polímero

8 Reología de pastas yeso-polímero

8.1 Introducción

La reología es la ciencia que se ocupa del estudio de la deformación y del flujo de la materia, entendiendo el flujo como una relación entre el esfuerzo, deformación, velocidad y tiempo. El flujo está relacionado con el movimiento relativo de los elementos adyacentes del líquido¹⁰⁵.

Los parámetros reológicos resultan esenciales a la hora de establecer información sobre el comportamiento de los materiales durante su aplicación. Una de las herramientas más útiles para evaluar la aplicabilidad de los materiales de yeso es el estudio de sus propiedades reológicas, que se ven modificadas por varios factores, como son la relación agua/conglomerante, las condiciones de mezclado o el tipo y concentración de aditivos^{106,107}. Estas modificaciones están asociadas al fenómeno de fraguado a lo largo del tiempo y juegan un importante papel en la fase de aplicación del material en revestimientos.

Uno de los métodos más empleados para aplicar el material a base de yeso en un paramento vertical u horizontal es el proyectado, que induce tasas de velocidad de cizalla, del orden de 20 a 40 s⁻¹. La aplicación

¹⁰⁵ Barnes HA, Hutton JF, Walters K. An introduction to rheology. Elsevier (1989), 199.

¹⁰⁶ Klin S. Rheological properties of building gypsum fresh pastes. Arch Hydroeng Env Mec (2005), 52, 265-282.

¹⁰⁷ Colusi I, Lapasin R, Papo A. Shear-dependent behavior of gypsum plasters. Ind Eng Chem Process Des Dev (1982), 21, 514-516.

manual con llana induce tasas aún mayores¹⁰⁸. Estas tasas de velocidad de cizalla, nos permiten diseñar el método más adecuado para poder reproducir las condiciones de aplicación mediante la utilización del viscosímetro rotacional.

La metodología tradicional se emplea para evaluar el fenómeno de fraguado y de la consistencia de las pastas de yeso en estado fluido, estableciendo el tiempo que tarda en alcanzar el estado plástico. Sin embargo, tienen una limitación para evaluar la trabajabilidad del material, porque no son capaces de determinar ni la viscosidad plástica ni el esfuerzo umbral de cizalla. Es decir, no pueden determinar el comportamiento del material desde el punto de vista reológico¹⁰⁹. Esta limitación resulta aún más significativa cuando se evalúan nuevas formulaciones que contienen componentes adicionales como son, entre otros, aditivos superplastificantes, resinas poliméricas, fibras, fillers, Etc., los cuales no solo cambian la reacción cinética de fraguado, sino que también afectan al comportamiento reológico de la pasta^{110,111,112}. En el estudio de las pastas de cemento y de yeso, el viscosímetro rotacional ha sido ampliamente utilizado para superar las limitaciones

¹⁰⁸ Toussaint F, Roy C, Jézequél P.H. Reducing shear thickening of cement-based suspensions. *Rheol Acta* (2009), 48, 883-895.

¹⁰⁹ Cardoso F.A, Agopyan A.K, Carbone C, Pileggi R.G, John V.M. Squeeze flow as a tool for developing optimized gypsum plasters. *Constr Build Mater* (2009), 23, 1349-1353.

¹¹⁰ Chougnat A, Audibert A, Moan M. Linear and non-linear rheological behaviour of cement and silica suspensions. Effect of polymer addition. *Rheologica Acta* (2007), 46, 793-802.

¹¹¹ Singh M, Garg M. Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different Ph. *Cem Concr Res* (1997), 27, 947-950.

¹¹² Peng J, Qu J, Zhang J, Chen M, Wan T. Adsorption characteristics of water reducing agents on gypsum surface and its effect on the rheology of gypsum plaster. *Cem Concr Res* (2005), 35, 527-531.

de los métodos tradicionales mediante la determinación de los parámetros reológicos de esfuerzo y velocidad de cizalla, que son calculados a partir del torque y de la velocidad de rotación, respectivamente¹¹³.

Los ensayos reológicos en viscosímetros consisten en someter a la pasta de yeso a una elevada velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), con el fin de romper los flóculos formados en la hidratación del hemihidrato y posteriormente disminuir la velocidad de cizalla de forma gradual. Se determinan entonces los parámetros reológicos sobre la curva de descenso de la velocidad, lo que permite definir la fluidez de las diferentes mezclas en función de parámetros físicos como son la viscosidad plástica (μ) o el esfuerzo umbral de cizalla (τ_o).

En la actualidad, se acepta de manera general que, en el caso de pastas de yeso, dicha curva se ajusta al modelo de Bingham (Eq. 1), donde la viscosidad plástica proporciona una medida sobre la cantidad y dimensiones de los flóculos formados en el proceso de hidratación, y el esfuerzo de cizalla umbral da una idea de la fortaleza y número de interacciones entre dichos flóculos¹¹⁴.

$$\tau = \tau_o + \mu\dot{\gamma} \text{ (Eq. 1)}$$

En este trabajo se determinaron los parámetros reológicos de viscosidad plástica y el esfuerzo umbral de cizalla en un viscosímetro rotacional, en pastas con diferentes sustituciones de yeso por residuo de poliamida

¹¹³ Caufin B, Lapasin R, Papo A. Rheological behavior of gypsum plaster pastes. *Ind Eng Chem Process Des Dev* (1985), 24, 49-53.

¹¹⁴ Banfill PFG. The rheology of fresh cement and concrete -A review. *Proceedings in 11th International Cement Chemistry Congress, Durban* (2003).

(PA) y de poliuretano blanco (PW), y además, la fluidez de las pastas, lo que permitió establecer una comparativa entre los valores de fluidez y de viscosidad plástica de las diferentes mezclas. El comportamiento tixotrópico de las pastas se ha analizado mediante la representación de sus ciclos de histéresis.

Finalmente, se ha analizado el efecto de dos aditivos superplastificantes basados en carboxilatos (PC) y en melaminas (PMS), en los parámetros reológicos anteriormente descritos.

8.2 Objetivo

El objetivo de este apartado consiste en estudiar el efecto que producen los dos tipos de residuos poliméricos (PW y PA) en la reología de las pastas de yeso, así como evaluar la influencia de dos tipos de aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos (PC) y en melaminas (PMS) en las pastas de estudio.

Para ello, se realiza el análisis de los siguientes puntos:

1. Determinar los parámetros reológicos mediante un viscosímetro rotacional.
2. Relacionar los parámetros reológicos obtenidos mediante viscosímetro rotacional con los obtenidos mediante el método tradicional de fluidez de la pasta.
3. Analizar los ciclos de histéresis para determinar la tixotropía de las mezclas.

Los resultados obtenidos para las diferentes pastas se presentan utilizando el yeso de construcción B1 como yeso de referencia y se agrupan según el tipo de residuo empleado:

- YPA: Pastas de yeso con residuo de poliamida en polvo (PA), en presencia y ausencia de aditivos superplastificantes PCE y PMS.
- YPW: Pastas de yeso con residuo de poliuretano blanco (PW), en presencia y ausencia de aditivos superplastificantes PCE y PMS.

Para este experimento se ha empleado agua común limpia, manteniendo su temperatura constante en $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ en el momento del experimento.

8.3 Experimental

El procedimiento operatorio previo para obtener las pastas a ensayar, consistió en la mezcla de yeso con diferentes cantidades de dos de los residuos poliméricos estudiados anteriormente, PW o PA, añadiendo una cantidad de agua adecuada. Se considera la cantidad total de conglomerante como la suma del yeso más el residuo polimérico añadido. Para los ensayos en el viscosímetro se ha fijado la relación agua/conglomerante en un valor determinado para cada tipo de dosificación empleada. Las mezclas ensayadas se muestran en la Tabla 8.1.

Dosificaciones	
PA	PW
Y0PA	Y0PW
Y0,5PA	Y0,5PW
Y1PA	Y1PW
Y2PA	Y2PW
Y3PA	-
Y4PA	-

Tabla 8. 1. Dosificaciones empleadas en el estudio reológico

La relación agua/conglomerante en pastas de yeso con poliamida (YPA) es de 0,645 para todas las dosificaciones, mientras que para las pastas de yeso con poliuretano (YPW), esta relación se establece en 1,35. En ambos casos, las cantidades de agua han sido ajustadas en base al criterio de funcionamiento del equipo, ya que relaciones de agua bajas suponen una disminución del tiempo fraguado, que provoca que el viscosímetro se sobrecargue y no funcione. En cuanto a las pastas que incorporan espuma de poliuretano, se ha alcanzado la máxima sustitución de yeso por residuo en mezclas Y2PW. Sustituciones mayores provocan una decantación del residuo en la parte inferior del cilindro, ocasionando una separación entre las fases yeso/agua-polímero (Figura 8.1), que impide realizar el ensayo.



Figura 8. 1. Decantación del residuo con separación de la fase acuosa yeso/agua-polímero de PW en muestras Y3PW

Para las mezclas que incorporan aditivo superplastificante se han añadido, junto con el agua de amasado, dosificaciones de aditivo de 0,4 y 0,8 % sobre el peso de yeso.

El procedimiento operatorio consistió en la mezcla manual de 100 gramos de yeso con las proporciones en volumen necesarias de residuo polimérico (PA o PW) para cada dosificación (Figura 8.2).

Posteriormente, se incorporó el agua y se mezclaron todos los componentes a una velocidad de 700 rpm durante 2 minutos, en un agitador de aspas IKA-JUNKER (Figura 8.3). Transcurrido el tiempo de mezclado mecánico, se introdujo la pasta en el viscosímetro rotacional (Figura 8.4).



Figura 8. 2. Pesado de los materiales y mezclado manual en las mezclas YPA

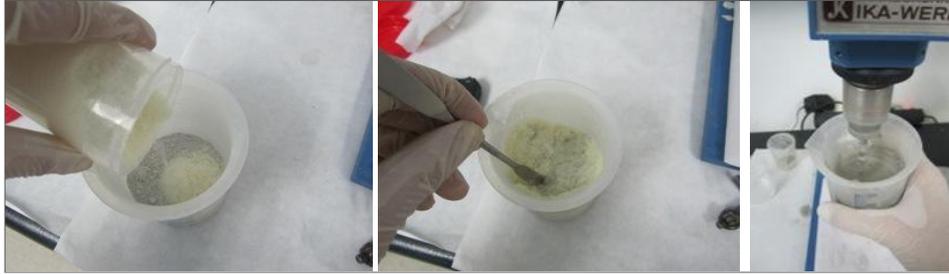


Figura 8. 3. Mezclado manual y mezclado mecánico en las mezclas YPW



Figura 8. 4. Ensayo en el viscosímetro rotacional de la pasta YPW

8.3.1 Parámetros reológicos en el viscosímetro rotacional

La determinación de los parámetros reológicos se realizó con un viscosímetro rotacional, según lo descrito en el Apartado 4.6.

Las pastas preparadas con o sin aditivo se introdujeron en el viscosímetro y se sometieron a una preagitación en rampa de 0 a 100 s^{-1} durante 30 segundos, que se mantuvo constante durante 30 segundos para conseguir la homogeneización de las mezclas. Posteriormente se disminuyó la velocidad hasta estado de reposo en 30 segundos, continuando con un aumento hasta 100 s^{-1} en 1,5 minutos. Finalmente

se alcanzó de nuevo el estado de reposo en 1,5 minutos^{115,116}. Este ciclo se representa en la Figura 8.5.

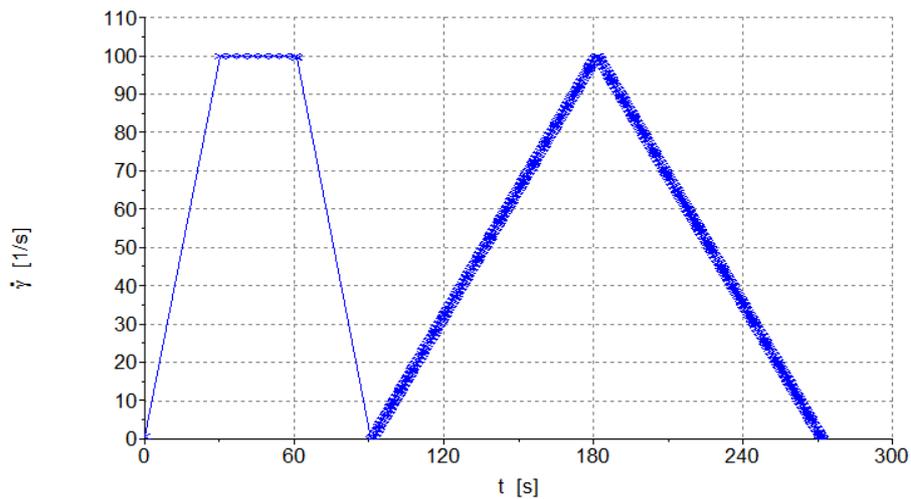


Figura 8. 5. Evolución de la velocidad de cizalla con el tiempo en el ensayo reológico

Se calcularon los parámetros de viscosidad plástica y esfuerzo de cizalla umbral, correspondientes a la curva de bajada de cada una de las diferentes pastas de cada tipo de dosificación.

Para cada dosificación, las medidas se repitieron un mínimo de tres veces, hasta obtener un valor de viscosidad y de esfuerzo umbral de cizalla con una reproducibilidad del 90 %.

8.3.2 Tixotropía

Se ha comprobado la tixotropía de las diferentes mezclas ensayadas en el viscosímetro rotacional mediante la obtención de sus ciclos de

¹¹⁵ Alonso M.M, Palacios M, Puertas F, de la Torre A.G y Aranda M.A.G. Effect of polycarboxylate admixture structure on cement paste rheology. Mater Constr (2007), 57(286), 65-81.

¹¹⁶ Bui V.K, Akkaya Y, Shah S.P. Rheological model for self-consolidating concrete. ACI Mater J (2002), 99(6), 549-559.

histéresis inmediatamente después de la mezcla de sus componentes. Para ello, se han representado las curvas de ida y vuelta que relacionan el parámetro de velocidad de cizalla con el parámetro de esfuerzo de cizalla. De esta manera se pretende analizar el proceso de formación y destrucción de estructuras internas de las dos dosificaciones en ausencia de aditivos, en las mismas condiciones de medida.

8.3.3 Determinación de la fluidez de la pasta

Se determinó la fluidez de la pasta, con y sin los dos aditivos empleados en las mismas dosificaciones utilizadas en el viscosímetro rotacional, según lo descrito en el Apartado 4.7.2 (Figura 8.6).



Figura 8. 6. Ensayo de la fluidez de la pasta

8.4 Resultados y discusión

8.4.1 Parámetros reológicos. Esfuerzo de cizalla umbral y viscosidad plástica

En dispersiones concentradas de un sólido en un líquido, al igual que en los sistemas de cemento, la proximidad entre las partículas da lugar a fuertes interacciones entre las mismas. La fortaleza de estas interacciones depende de la forma de las partículas, de su distribución

de tamaño, de la concentración y de sus propiedades superficiales. Generalmente, existe una fuerza de atracción neta que origina la floculación, consecuencia de que las partículas en movimiento se unan unas con otras y se adhieran entre sí. El tamaño y forma de los flóculos juega un papel fundamental en la reología de las dispersiones de un sólido en un líquido, como es el caso de las pastas de yeso con residuo polimérico¹¹⁷.

Se han determinado los parámetros reológicos de esfuerzo de cizalla umbral y viscosidad plástica de las pastas de yeso con diferentes sustituciones de yeso por residuo polimérico, de poliamida en polvo (YPA) o de espuma de poliuretano triturada (YPW), tanto en pastas aditivadas como en pastas en ausencia de aditivos.

8.4.1.1 Esfuerzo de cizalla umbral

El esfuerzo umbral de cizalla proporciona información relativa a la interacción entre los flóculos formados en la pasta, de manera que valores bajos de esfuerzo de cizalla umbral indican una baja interacción entre las partículas.

Las Figuras 8.7 y 8.8 muestran respectivamente, la evolución de los parámetros reológicos de esfuerzo umbral de cizalla de las mezclas YPA y YPW.

De los resultados de esfuerzo de cizalla umbral de la dosificación tipo YPA, se deduce que sustituciones de yeso por poliamida inducen a una

¹¹⁷ Senff L, Hotza D, Labrincha J.A. Effect of lightweight aggregates addition on the rheological properties and the hardened state of mortars. Appl Rheol (2011), 21, 13668.

reducción del punto de flujo comprendido aproximadamente entre 40 y 60 % respecto de la dosificación de referencia (Y0PA). Una explicación a este efecto puede ser que la formación de la estructura de cristales aciculares hace que se adopte una configuración desordenada durante la cizalla que se ve disminuida por la presencia de partículas redondeadas de poliamida en polvo¹¹⁸. Es decir, las partículas de polímero se distribuyen de forma homogénea en la dispersión acuosa del hemihidrato, situándose en los huecos que se forman entre los cristales de yeso, facilitando la cizalla de las pastas. Este efecto se traduce en una reducción del esfuerzo de cizalla umbral de todas las dosificaciones que incorporan PA en su composición.

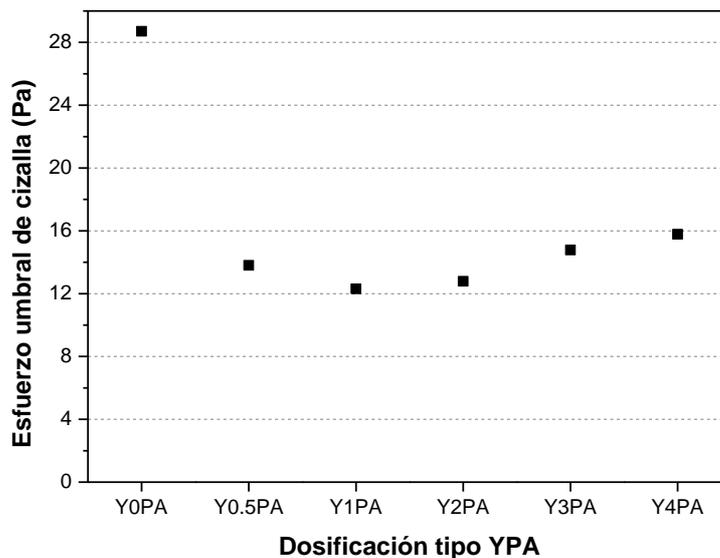


Figura 8. 7. Evolución del esfuerzo de cizalla umbral en las pastas YPA

En cuanto a los resultados de esfuerzo de cizalla umbral de la dosificación tipo YPW, se observa que la presencia cada vez mayor de

¹¹⁸ Moreno, R. Reología de las suspensiones cerámicas. Madrid (2005). ISBN: 84-00-08322-9.

poliuretano conlleva un aumento del punto de flujo (Figura 8.8). Este comportamiento indica que existe una interacción muy fuerte entre las partículas de la mezcla, lo que da una idea de la mayor fortaleza que existe entre sus flóculos. Este efecto se debe a que, a medida que se incrementa la proporción de espuma de poliuretano, la cantidad de agua absorbida por la espuma también aumenta, reduciéndose la lubricación entre los componentes de la pasta y obteniéndose cada vez pastas más secas y con menor facilidad para fluir.

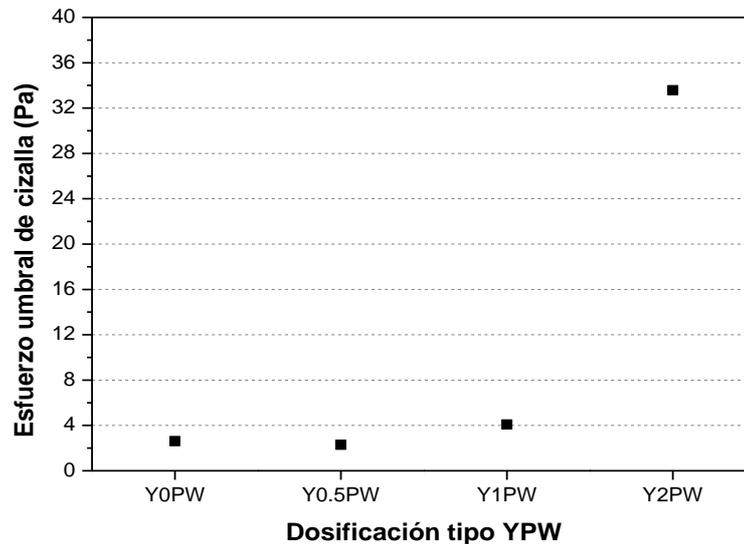


Figura 8. 8. Evolución del esfuerzo de cizalla umbral en las pastas YPW

8.4.1.2 Viscosidad plástica

Las Figuras 8.9 y 8.10 muestran respectivamente, la evolución de los parámetros reológicos de viscosidad plástica de las mezclas YPA y YPW.

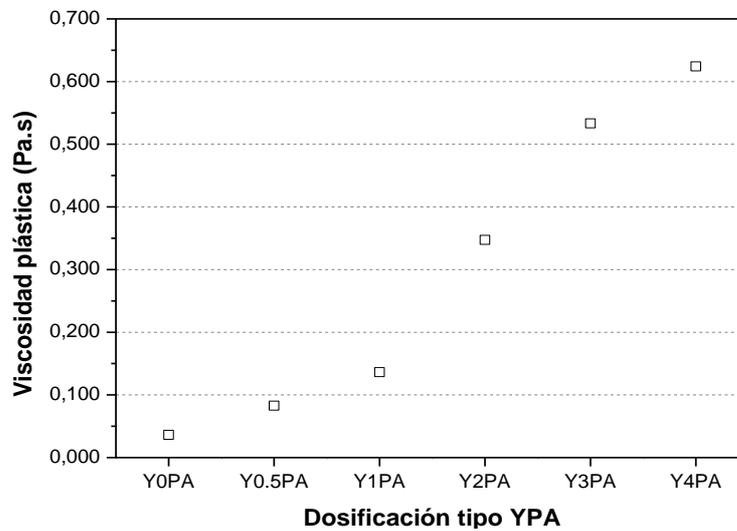


Figura 8. 9. Evolución de la viscosidad plástica en las pastas YPA

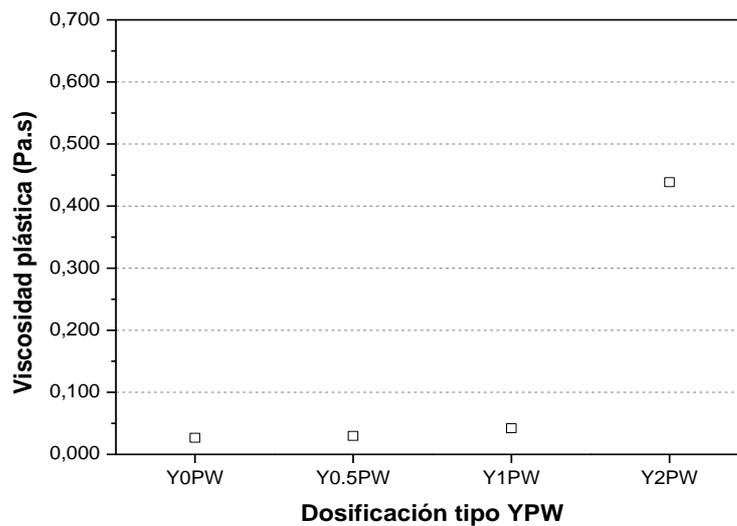


Figura 8. 10. Evolución de la viscosidad plástica en las pastas YPW

A la vista de los resultados de viscosidad plástica obtenidos en las mezclas YPA, se observa que la existencia de una proporción cada vez más elevada de poliamida incrementa la viscosidad de las mezclas, partiendo de valores de viscosidad de 0,0362 Pa·s en las muestras de referencia (Y0PA), a valores de 0,6243 Pa·s en las pastas con

sustituciones de yeso más elevadas (Y4PA). Este efecto podría deberse a que las partículas redondeadas de poliamida se sitúan en los espacios que quedan entre los cristales de yeso, produciendo una mayor compactación de materiales que genera un efecto espesante en las pastas, haciéndose cada vez más viscosas. Esta explicación se apoya además en la observación de su microestructura mediante FSEM (Figura 8.11).

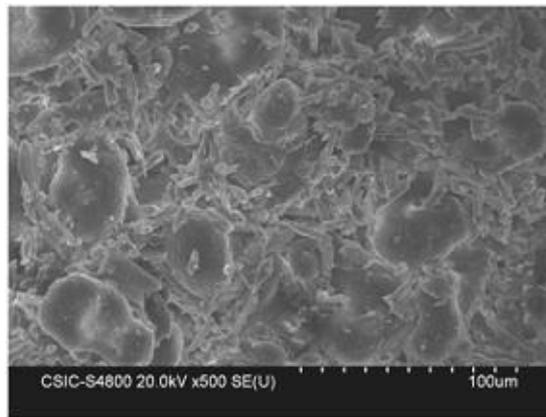


Figura 8. 11. FSEM de la dosificación Y2PA

En las mezclas YPW, el incremento de viscosidad se produce en dosificaciones con alto contenido de espuma de poliuretano, de tal forma que las mezclas de referencia (Y0PW) parten de unos valores de viscosidad de 0,0268 Pa·s, llegando a alcanzar valores de 0,4386 Pa·s para la dosificación Y2PW, lo que indica un mayor tamaño de los flóculos que se hace más evidente en mezclas con mayores sustituciones de yeso por poliuretano.

8.4.2 Determinación de la fluidez de la pasta con metodología tradicional

Las Figuras 8.12 y 8.13 muestran los resultados del ensayo de la fluidez de la pasta de las mezclas YPA y YPW.

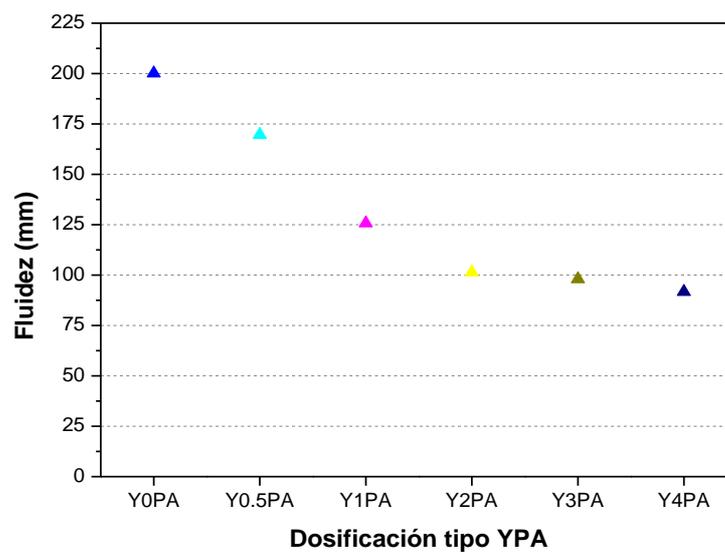


Figura 8. 12. Ensayo de la fluidez de la pasta en mezclas YPA

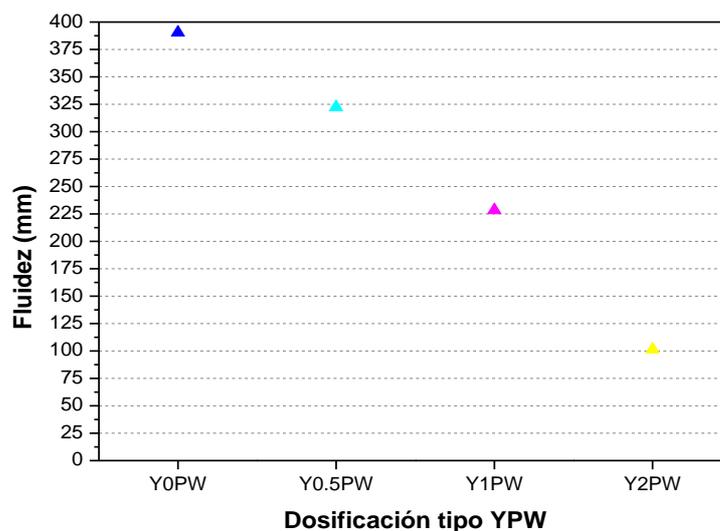


Figura 8. 13. Ensayo de la fluidez de la pasta en mezclas YPW

En ambos tipos de dosificación se observa que la adición de residuo en las mezclas produce un diámetro de escurrimiento cada vez menor, lo que indica una pérdida progresiva de la fluidez de la pasta, para una misma relación agua/conglomerante. De esta manera, en dosificaciones YPA, las mezclas con elevadas sustituciones de yeso por poliamida (Y4PA), producen una pérdida del efecto fluidificante de aproximadamente el 54% respecto a las mezclas de referencia (Y0PA). La explicación a este efecto puede ser debida a que la poliamida absorbe inicialmente parte del agua y de los iones de calcio durante el proceso de mezclado y principio de fraguado¹¹⁹. El mismo efecto se produce en las pastas YPW, llegando a alcanzar una pérdida del efecto fluidificante de aproximadamente el 74% para la muestra Y2PW respecto de la referencia. En este segundo caso, la elevada capacidad de absorción de agua del poliuretano contribuye en gran medida a la disminución de la fluidez.

De esta manera, al añadir residuo polimérico, bien poliamida en polvo, bien espuma de poliuretano, se producen cambios en las propiedades reológicas del material.

8.4.3 Relación entre la fluidez de la pasta y la viscosidad plástica

Si se comparan los resultados de fluidez de la pasta, obtenidos con la metodología tradicional, con los de la viscosidad plástica alcanzada

¹¹⁹ Xian-Wu C, Zi-Cong Z, Ying X, Jin-Ping Q. The effect of polypropylene/polyamide 66 blending modification on melt strength and rheologic behaviors of polypropylene. *Polym Bull* (2010), 64(2), 197-207.

mediante el viscosímetro rotacional, se observa que existe una correlación entre ambos parámetros, de manera que varían de forma inversamente proporcional, siguiendo una línea de tendencia de tipo potencial, de acuerdo con las ecuaciones que pueden observarse en las Figura 8.14 y 8.15.

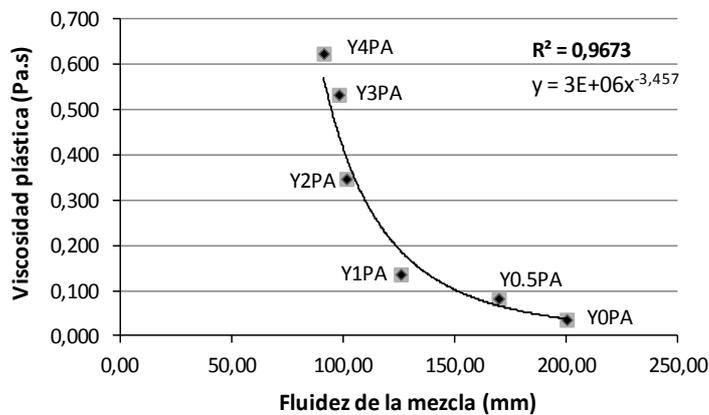


Figura 8. 14. Relación entre la fluidez de la pasta y la viscosidad plástica en pastas YPA

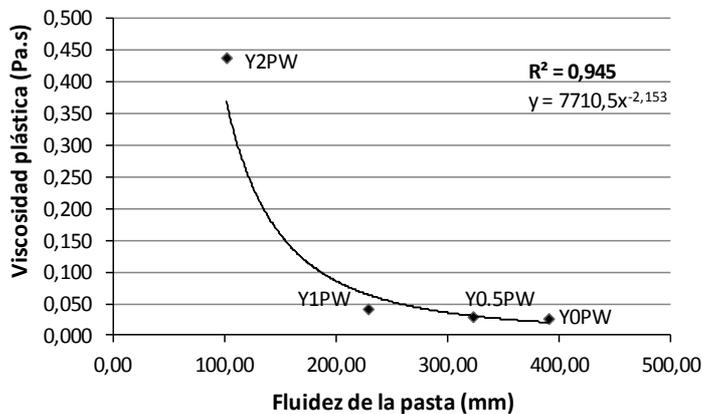


Figura 8. 15. Relación entre la fluidez de la pasta y la viscosidad plástica en YPW

Si se comparan ambos métodos, se observa que el ensayo de la medida de la fluidez de la pasta no mide con precisión los cambios reológicos a lo largo del tiempo, ya que únicamente determina valores de fluidez

puntual en un momento determinado. Por otro lado, la fluidez no aporta valores de parámetros físicos, por lo que no puede ser expresado en unidades físicas reológicas, pero sí proporciona datos para clasificar los materiales en términos de su capacidad de ser proyectado¹²⁰.

Las Tablas 8.2 y 8.3 muestran a modo de resumen, los valores numéricos de los parámetros reológicos obtenidos en las dosificaciones YPA y YPW, respectivamente.

Dosificación	Mezcla	Fluidez de la pasta (mm)	Viscosidad plástica (Pa·s)	Esfuerzo de cizalla umbral (Pa)
Referencia	YOPA	200,15	0,0362	28,71
YPA	Y0,5PA	169,65	0,0829	13,80
	Y1PA	125,75	0,1364	12,31
	Y2PA	101,40	0,3474	12,79
	Y3PA	98,05	0,5333	14,78
	Y4PA	91,70	0,6243	17,80

Tabla 8. 2. Parámetros reológicos y datos del ensayo de la fluidez de la pasta en pastas YPA

¹²⁰ Roussel, N. Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. Mater Struct (2006), 39, 501-509.

Dosificación	Mezcla	Fluidez de la pasta (mm)	Viscosidad plástica (Pa·s)	Esfuerzo de cizalla umbral (Pa)
Referencia	Y0PW	390,35	0,0268	2,62
YPW	Y0,5PW	322,50	0,0298	2,29
	Y1PW	228,50	0,0421	4,09
	Y2PW	101,45	0,4386	33,58

Tabla 8. 3. Parámetros reológicos y datos del ensayo de la fluidez de la pasta en pastas YPW

8.4.4 Tixotropía

La tixotropía se define como el área encerrada entre las curvas de subida y de bajada del reograma. Este área se puede expresar como:

$$A = \tau \dot{\gamma} \text{ (Eq.2)}$$

Donde A determina la energía requerida para romper la estructura tixotrópica del material, es decir, explica su comportamiento en términos tixotrópicos.

En la Figura 8.16 se pueden observar los ciclos de histéresis de las diferentes dosificaciones, así como el área de cada una de ellas, lo que permite conocer la tixotropía de las pastas YPA.

A la vista de los resultados obtenidos en las dosificaciones tipo YPA, se comprueba que la muestra de referencia (YOPA), tiene un comportamiento reopéxico o antitixotrópico, dado que el yeso es dependiente del tiempo por los cambios en la propia estructura del material en su proceso de fraguado. Esto se traduce en una ruptura irreversible de la estructura, en la que a medida que se reduce la

velocidad de cizalla en la curva de bajada, el esfuerzo de cizalla es cada vez mayor. Por otro lado, al incorporar PA como sustituto de yeso en las mezclas, se observa una reducción del efecto reopéxico, como ocurre por ejemplo en el caso de las muestras Y0,5PA, con una disminución de aproximadamente el 85%. A medida que se sigue incorporando más cantidad de PA, este efecto reopéxico se invierte, dando lugar a pastas tixotrópicas. Así, en dosificaciones Y1PA, Y2PA, Y3PA y Y4PA se observa que en la curva de bajada, a medida que disminuye la velocidad de cizalla, el esfuerzo de cizalla registrado es inferior al registrado en la curva de subida, a medida que la velocidad de cizalla aumenta, traduciéndose en un comportamiento de fluido tixotrópico que aumenta con contenidos cada vez mayores de PA. Todas las muestras que incorporan PA en su composición presentan una recuperación gradual de su estructura cuando la cizalla es eliminada. Esto puede ser debido a que una presencia cada vez mayor de PA significa mayor tiempo de fraguado, lo que reduce a su vez el esfuerzo de cizalla producido por el fenómeno de fraguado con el tiempo¹²¹.

Este comportamiento se produce también en mezclas tipo YPW (Figura 8.17). De esta manera, al incorporar PW como sustituto de yeso en las mezclas, se observa una reducción del efecto reopéxico. Así, las muestras que incorporan PW en su composición presentan una reducción de la tixotropía que pasa de -117 Pa/s para la mezcla Y0PW hasta -3 Pa/s en la dosificación Y0,5PW. A medida que se sigue incrementando la cantidad de PW, este efecto reopéxico se invierte,

¹²¹ Alessandrini A, Caufin B, Lapasin R, Papo A. Rheological description of the thixotropic behaviour of gypsum plaster pastes. *Rheol Acta* (1985), 24, 615-622.

dando lugar a pastas tixotrópicas con valores de 1,20 Pa/s en mezclas Y1PW y de 2,06 Pa/s en mezclas Y2PW.

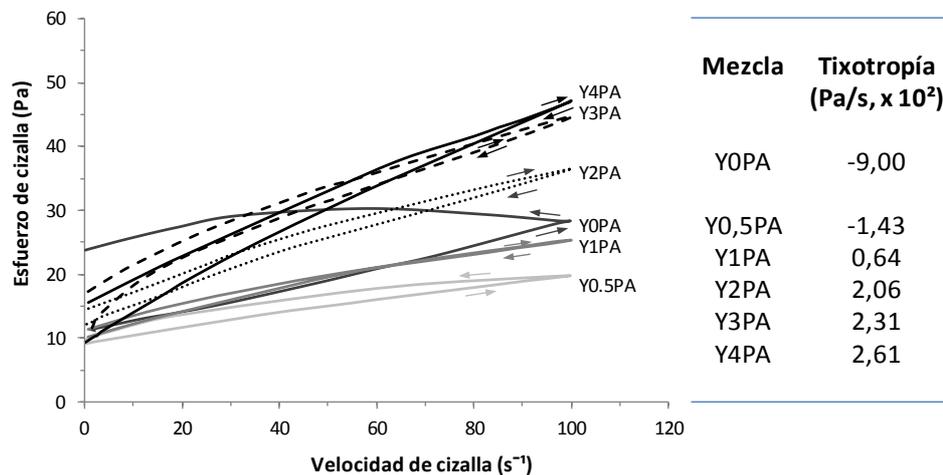


Figura 8. 16. Ciclos de histéresis y tixotropía en las pastas con diferentes sustituciones de yeso por PA

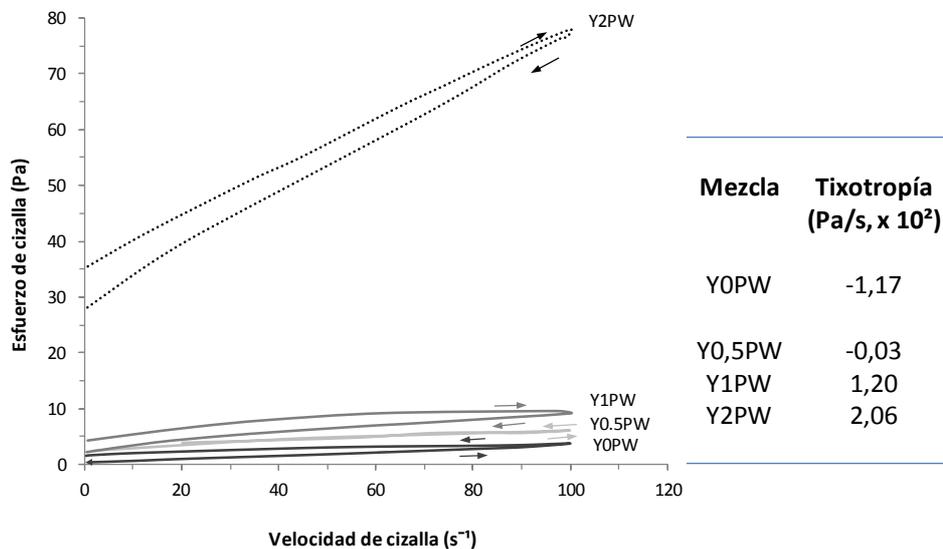


Figura 8. 17. Ciclos de histéresis y tixotropía en las pastas con diferentes sustituciones de yeso por PW

8.5 Efecto de los aditivos superplastificantes en la reología de las mezclas

8.5.1 Determinación del esfuerzo de cizalla umbral en presencia de aditivos

Las Figuras 8.18 y 8.19 muestran, respectivamente, la evolución de los parámetros reológicos de esfuerzo de cizalla umbral de probetas YPA y YPW en presencia de los dos aditivos empleados, PC (Viscocrete) y PMS (Sikamix) y para las dos dosificaciones (0,4 y 0,8%) de aditivo sobre el peso del yeso). La Tabla 8.4 muestra los valores de reducción del esfuerzo umbral de cizalla de las dosificaciones YPA y la Tabla 8.5 recoge los valores de aumento del esfuerzo umbral de cizalla de las dosificaciones YPW.

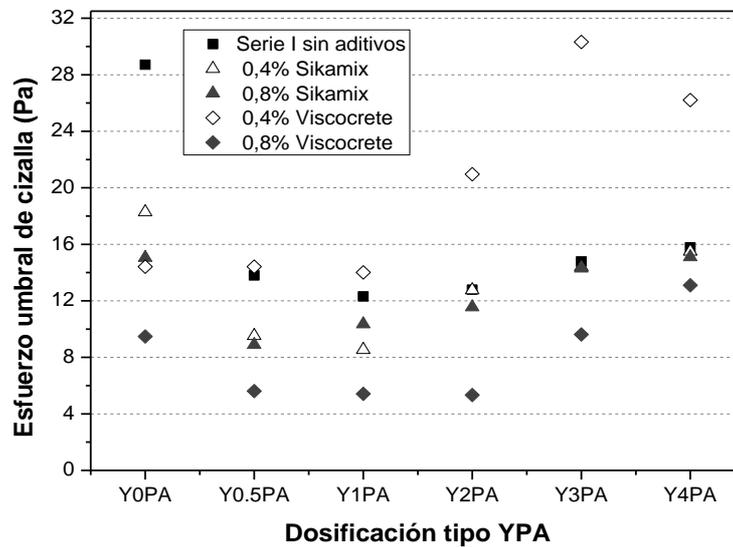


Figura 8. 18. Evolución del esfuerzo umbral de cizalla en las pastas YPA en presencia de aditivos

Dosificación	0,4% Sikamix	0,8% Sikamix	0,4% Viscocrete	0,8% Viscocrete
Y0PA	36%	48%	50%	67%
Y0.5PA	31%	36%	0%	59%
Y1PA	31%	16%	0%	56%
Y2PA	0%	10%	0%	58%
Y3PA	3%	3%	0%	35%
Y4PA	2%	4%	0%	17%

Tabla 8. 4. Reducción de los valores del esfuerzo de cizalla umbral de las pastas YPA en presencia de aditivos

A través de los resultados obtenidos en la dosificación tipo YPA y, en concreto, en las pastas de referencia (YOPA), se observa que los aditivos Sikamix y Viscocrete reducen en general el esfuerzo umbral de cizalla entre un 36 y un 67 %, siendo este efecto mayor para el aditivo Viscocrete, que se hace más evidente en dosificaciones elevadas (0,8%). La reducción de este valor en presencia de aditivos, con respecto al valor de la pasta sin aditivo, indica que la interacción entre los flóculos es menor y, consecuentemente, la fluidez de la pasta debería ser mayor. A medida que se sustituye yeso por PA, se observa que la disminución del esfuerzo umbral de cizalla es menos acusada que en las mezclas que no incorporan residuo de poliamida. Una explicación a este efecto es que el aditivo se absorbe en menor medida por el polímero que por el yeso. Se observa a su vez que, a partir de dosificaciones Y0,5PA, el aditivo Viscocrete, en bajas dosificaciones (0,4%), no reduce el esfuerzo de cizalla umbral, necesitándose un mayor porcentaje de aditivo (0,8%) para disminuirlo.

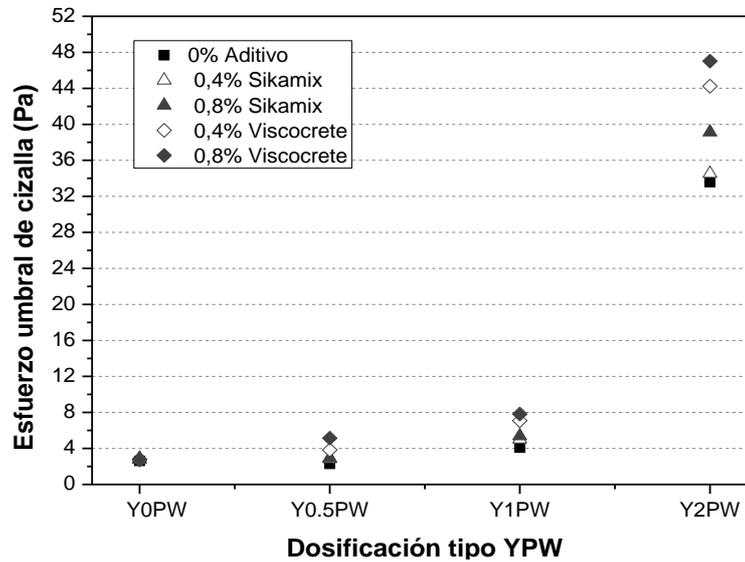


Figura 8. 19. Evolución del esfuerzo umbral de cizalla de las pastas YPW en presencia de aditivos

Dosificación	0,4% Sikamix	0,8% Sikamix	0,4% Viscocrete	0,8% Viscocrete
Y0PW	6%	11%	0%	0%
Y0.5PW	24%	28%	68%	125%
Y1PW	23%	32%	73%	91%
Y2PW	53%	73%	96%	108%

Tabla 8. 5. Aumento de los valores del esfuerzo de cizalla umbral de las pastas YPW en presencia de aditivos

A la vista de los resultados de esfuerzo de cizalla umbral obtenidos en la dosificación YPW, se comprueba que ninguno de los aditivos utilizados, reduce el esfuerzo de cizalla umbral. La explicación a este efecto puede deberse a que la espuma de poliuretano impide la absorción del aditivo llegando incluso a producirse, para pastas Y2PW, aumentos en los valores de esfuerzo umbral de cizalla (del 53 al 108%).

8.5.2 Determinación de la viscosidad plástica en presencia de aditivos

Las Figuras 8.20 y 8.21 muestran, respectivamente, la evolución de la viscosidad plástica de de las dosificaciones YPA y YPW, en presencia de los diferentes aditivos superplastificantes utilizados.

A través de los resultados obtenidos en las mezclas tipo YPA se advierte que, en general, la reducción de la viscosidad se obtiene cuando la cantidad de aditivo es mayor, siendo entre un 12 y un 32 % para el aditivo Viscocrete frente al aditivo Sikamix con una concentración entre un 6 y un 20%. Esta reducción de la viscosidad plástica indica que hay un menor número de flóculos o que estos son de menor tamaño.

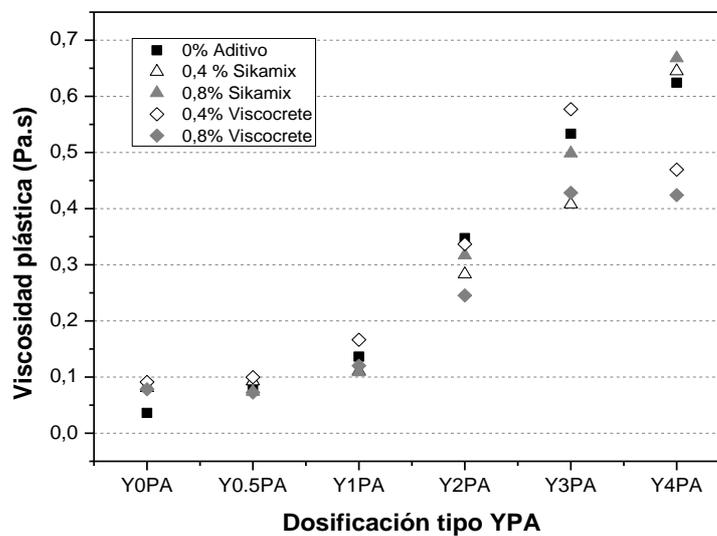


Figura 8. 20. Evolución de la viscosidad plástica de las pastas YPA en presencia de aditivos

Si se analizan los resultados de viscosidad plástica obtenidos en las dosificaciones tipo YPW se observa que, en general, ninguno de los dos aditivos reducen la viscosidad en las pastas con bajas cantidades de

poliuretano (Y0,5PW, Y1PW). Sin embargo, en mezclas con altos contenidos en poliuretano (Y2PW), se produce una disminución de la viscosidad plástica, de tal forma que el aditivo Sikamix reduce este valor entre un 2% y un 4%, según la concentración de aditivo sea de 0,4 o de 0,8%, respectivamente, mientras que el aditivo Viscocrete reduce la viscosidad entre un 43% un 57%

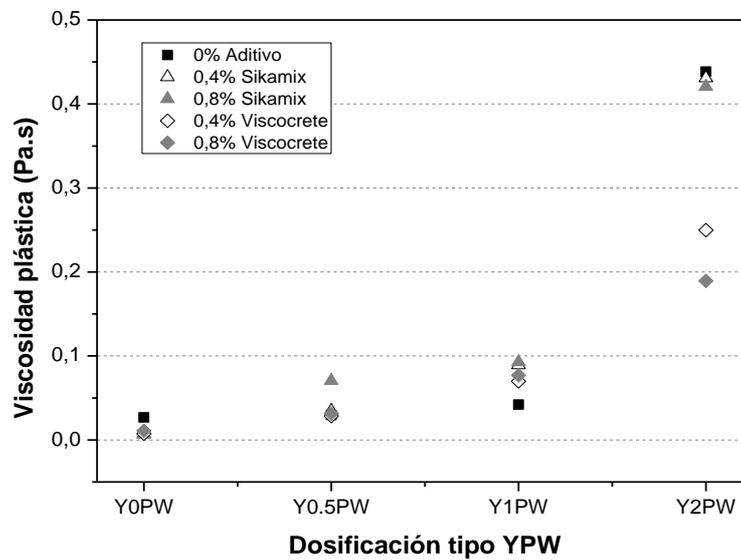


Figura 8. 21. Evolución de la viscosidad plástica de las pastas YPW en presencia de aditivos

8.5.3 Determinación de la fluidez de la pasta en presencia de aditivos

Los resultados del ensayo de la fluidez de la pasta obtenidos para las dosificaciones YPA se representan en la Figura 8.22 y en la Tabla 8.6, y los resultados para las mezclas YPW se representan en la Figura 8.23 y en la Tabla 8.7.

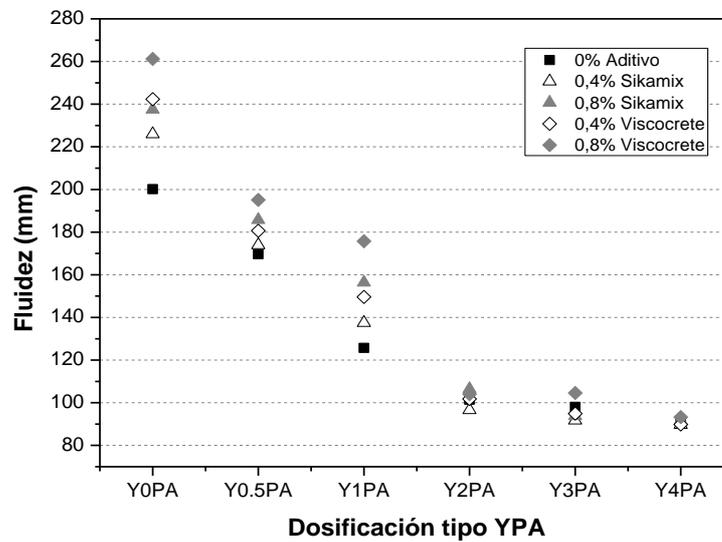


Figura 8. 22. Evolución de la fluidez de las pastas YPW en presencia de aditivos

Dosificación	0,4% Sikamix	0,8% Sikamix	0,4% Viscocrete	0,8% Viscocrete
Y0PA	13%	19%	21%	31%
Y0.5PA	3%	9%	6%	15%
Y1PA	9%	24%	19%	40%
Y2PA	0%	5%	0%	3%
Y3PA	0%	0%	0%	7%
Y4PA	0%	0%	0%	2%

Tabla 8. 6. Aumento de los valores de la fluidez de la pasta en pastas YPW en presencia de aditivos

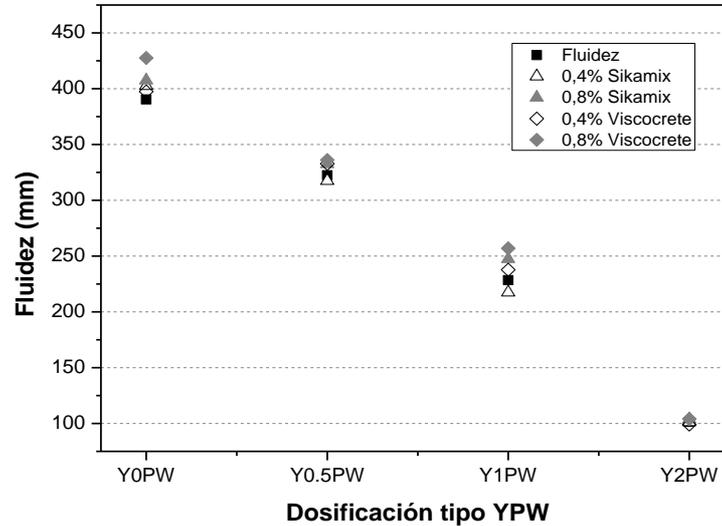


Figura 8. 23. Evolución de la fluidez de las pastas YPW en presencia de aditivos

Dosificación	0,4% Sikamix	0,8% Sikamix	0,4% Viscocrete	0,8% Viscocrete
Y0PW	3%	4%	2%	10%
Y0.5PW	0%	3%	3%	4%
Y1PW	0%	8%	4%	12%
Y2PW	0%	2%	0%	3%

Tabla 8. 7. Aumento de los valores de la fluidez de la pasta en pastas YPW en presencia de aditivos

De los resultados obtenidos en las dosificaciones tipo YPA y YPW, se comprueba que el aditivo Viscocrete es el que ejerce un mayor efecto fluidificante, y se vuelve mayor cuanto más elevada es su concentración. Este efecto es inversamente proporcional a los valores de esfuerzo de cizalla umbral registrados, que son menores cuanto mayor es el porcentaje del aditivo.

8.6 Conclusiones

Se ha comprobado que la adición de residuo polimérico como sustituto del yeso es uno de los factores que más influye en las propiedades

reológicas de estos compuestos, junto con los aditivos superplastificantes.

Existe una buena correlación entre el parámetro de fluidez y el de viscosidad plástica con una $R=0,967$ en el caso de mezclas YPA y con $R=0,945$ en el caso de dosificaciones YPW, que nos permite establecer una relación entre ambos parámetros.

Un incremento cada vez mayor de PA induce a una mayor viscosidad, llegando a ser del orden de 17 veces superior en mezclas con máxima sustitución de yeso por poliamida (Y4PA) respecto a las mezclas de referencia (Y0PA), generando a su vez un menor esfuerzo de cizalla umbral del orden del 40% para mezclas (Y4PA) y del 60% en mezclas (Y1PA).

La presencia de cantidades cada vez mayores de PW ejercen una fuerte interacción entre las partículas del compuesto, que incrementan los valores de esfuerzo de cizalla umbral y aumentan la viscosidad plástica, ejerciendo un menor efecto fluidificante que se ve reflejado en los resultados de fluidez de la pasta.

A medida que se incrementa el residuo polimérico en la composición de las mezclas YPA y YPW, se reduce el efecto reopéctico de las mismas. De esta manera, las mezclas producen un efecto tixotrópico a partir de sustituciones de yeso por polímero en relación 1/1 (una parte de yeso por cada parte de residuo polimérico).

Se ha demostrado que los aditivos superplastificantes influyen en los parámetros reológicos de las mezclas de yeso con residuo polimérico. Así, en pastas tipo YPA reducen el esfuerzo de cizalla umbral,

disminuyen la viscosidad plástica y aumentan la fluidez de la pasta. El aditivo Viscocrete, basado en policarboxilatos es el que ejerce mayores cambios en las propiedades reológicas, siendo más evidente en altas concentraciones. En cuanto a las dosificaciones tipo YPW, se ha observado que cantidades del 0,8% de aditivo Sikamix, reduce la viscosidad plástica e incrementa la fluidez de las pastas en mayor medida.

A medida que la sustitución de yeso por polímero aumenta, el efecto del aditivo disminuye, debido a que la presencia de las partículas de polímero dificulta su absorción.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que las pastas de yeso que incorporan residuo de polímero en presencia de aditivos superplastificantes mejoran sus propiedades reológicas, lo que favorecería su puesta en obra.

Capítulo IX: Aditivos y fibras en yesos aligerados con polímeros

9 Aditivos y fibras en yesos aligerados con polímeros

9.1 Introducción

9.1.1 Aditivos

Superplastificantes

Los aditivos superplastificantes o reductores de alto rango son surfactantes aniónicos de naturaleza orgánica, que una vez disueltos en agua, dispersan las partículas de yeso y mejoran la cohesión y reología del sistema. La función de estos aditivos puede dirigirse en tres direcciones diferentes¹²².

1. Reducir la relación agua/yeso de la mezcla manteniendo la trabajabilidad.
2. Mejorar la trabajabilidad para una relación agua/yeso dada.
3. Reducir tanto el contenido de agua como de yeso para una misma trabajabilidad y resistencias mecánicas.

Con la reducción de agua por estos aditivos, se consiguen yesos con mayores resistencias, menor permeabilidad y mejores propiedades durables.

¹²² Edmeades R.M, Hewlett P.C. Cement admixtures. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. IV Edition. Ed PC. Hewlett (1998): 837-902.

Desde el punto de vista químico, los superplastificantes son polielectrolitos orgánicos que pertenecen a la categoría de dispersantes poliméricos de alto peso molecular¹²³. Estos polímeros son solubles en agua debido a la presencia de grupos aniónicos como grupos hidroxilos (OH^-), sulfónicos (R-SO_3^-) y carboxilatos (R-COO^-) unidos a la cadena principal hidrocarbonada.

Los primeros superplastificantes utilizados, hacia la década de 1940, fueron lignosulfonatos modificados, que se utilizaban como reductores de agua con un rango de reducción entre el 5 y el 10 %.

A partir de la década de los 60 se desarrollaron los aditivos derivados de melamina en Alemania (Figura 9.1), que se sintetizan a partir de la sulfonación de la melamina y posterior polimerización con un rango de reducción de agua entre el 10 y el 20 %.

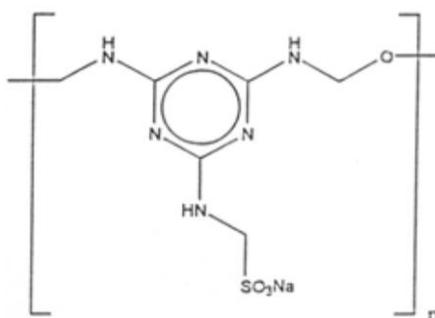


Figura 9. 1. Estructura molecular básica de un aditivo superplastificante derivado de melamina

A principios de la década de los 90 se desarrolló una nueva generación de aditivos superplastificantes basados en polímeros sintéticos, con formulaciones basadas en policarboxilatos (PCE), cuya síntesis proviene

¹²³ Collepardi M, Ramachnadran V.S. Effect of admixtures. Proceedings in IX International Congress of the Chemistry of Cement. New Delhi, India, (1992), 529-568.

generalmente de la polimerización de derivados del ácido acrílico o del metacrílico.

Los aditivos PCE poseen cadenas laterales, más o menos largas, generalmente de tipo poliéter (PEO). Estos aditivos tienen una estructura tipo “peine”¹²⁴ (Figura 9.2) con una cadena hidrocarbonada principal con grupos carboxilatos y cadenas laterales con los grupos éteres. En los últimos años, existe una mayor tendencia a sintetizar aditivos con cadenas principales más cortas y cadenas laterales de poliéters más largas y de propiedades más específicas^{125,126}. Además, las propiedades fluidificantes de los PCE son muy sensibles a la naturaleza del sulfato cálcico¹²⁷.

¹²⁴ Otha A, Sugiyama T, Tanaka Y. Fluidizing mechanism and application of polycarboxylate-based superplasticizers. Proceedings in 5th CANMET/ACI International Conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. American Concrete Institute SP 173-19 (1997), 359-378.

¹²⁵ Hamada D, Sato T, Yamato F, Mizunuma T. Development of new superplasticizers and its application to self-compacting concrete. Proceedings in 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. (2000). Nice, France, 269-290.

¹²⁶ Sugiyama T, Otha A, Uomoto T. The dispersing mechanism and applications of polycarboxylates-based superplasticizers. Proceedings in XI International Congress on the Chemistry of Cement. Durban, South Africa (2003), 560-568.

¹²⁷ Moulin EM, Broker V. Effect of superplasticizers type on the fluidity retention of Portland cement mortars as a function of the C₃A level and the nature of added calcium sulfates. Proceedings in XI International Congress on the Chemistry of Cement. Durban, South Africa (2003), 550-559.

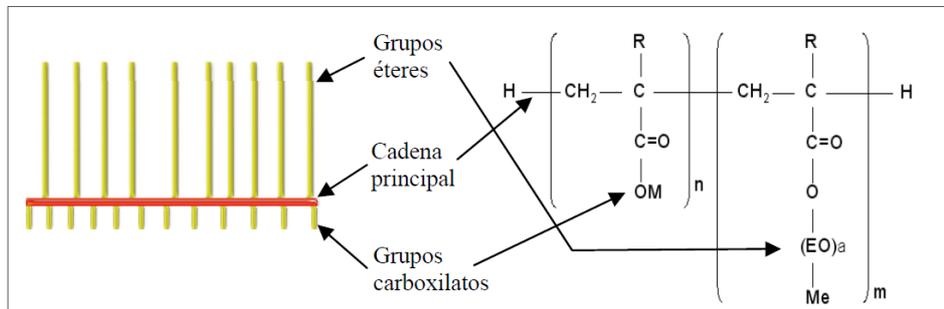


Figura 9. 2. Estructura química y molecular de un aditivo PCE

Emulsión sintética de estireno-butadieno

Se han estudiado varias técnicas basadas en productos impermeabilizantes con base polimérica que retardan la permeabilidad al vapor de agua, con el fin de proteger el yeso para evitar la entrada de humedad. Este es el caso de las emulsiones sintéticas a base de polímeros como el látex, que influyen en el principio de fraguado, incrementándolo, y reduciendo a su vez las relaciones agua/yeso de las mezclas. La reducción de agua se debe al efecto lubricante de las partículas poliméricas del látex, que ejercen una influencia significativa en las propiedades mecánicas, aumentando la resistencia a flexión y disminuyendo la resistencia a compresión con el contenido de emulsión¹²⁸.

Químicamente, el látex es un estireno butadieno y puede encontrarse en forma de dispersión acuosa¹²⁹. Su estructura química se muestra en la Figura 9.3.

¹²⁸ Çolak A. Characteristics of acrylic latex-modified and partially epoxy-impregnated gypsum. *Cem Concr Res* (2001), 31, 1539-1547.

¹²⁹ Blackley DC. *Polymer latices: science and technology, types of latices*, vol 2. London: Chapman and Hall; 1997.

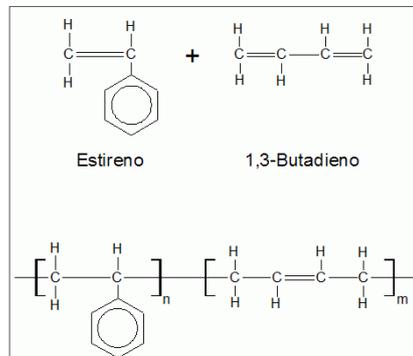


Figura 9. 3. Estructura química y molecular de un latex

9.1.2 Fibras

Una fibra polimérica contiene, de manera general, cadenas de polímeros flexibles alargadas y sin entrecruzamiento. Los polímeros ordenados en fibras pueden ser hilados y empleados como textiles. Las más utilizadas en construcción por sus prestaciones son: polietileno, polipropileno, nylon, poliéster y celulosa, entre otros.

Las fibras están siempre constituidas por polímeros dispuestos en cristales. Tienen que ser capaces de poder empaquetarse según un ordenamiento regular, a los efectos de alinearse en forma de fibras.

Las fibras utilizadas en los ensayos son algunas de los que se incluyen habitualmente en los yesos preparados.

Polipropileno

El polipropileno (C₃H₆) es un termoplástico semicristalino, que se produce mediante una reacción de adición o en cadena de polipropileno en presencia de un catalizador específico. Es el segundo miembro de los

hidrocarburos etilénicos, caracterizados por tener uno o más dobles enlaces carbono-carbono en su molécula, $(\text{H}_3\text{C}-\text{CH}=\text{CH}_2)^{130}$.

Este polímero tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos más empleados. Es un producto inerte y reciclable cuando está puro, lo que le otorga una cualidad atractiva frente a otros materiales alternativos de refuerzo.

El yeso reforzado con adiciones de fibras de polipropileno presenta una mejora de las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a flexión del material compuesto¹³¹.

Celulosa

Desde el punto de vista químico, la celulosa es un polímero natural lineal formado por unidades de D-glucosa unidas entre sí por enlaces $\beta(1\rightarrow4)$ -O-glicosídicos. Éste es el carbohidrato más abundante en la naturaleza.

Si consideramos el tipo de enlace entre las moléculas de glucosa, la unidad repetitiva de la celulosa es la celobiosa, el disacárido formado por dos moléculas de D-glucosa unidas por un enlace $\beta(1\rightarrow4)$ -O-glicosídicos (Figura 9.4)

¹³⁰ Oliver A. Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Tesis Doctoral (2009). Madrid.

¹³¹ García Santos A. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos. Revista de la Construcción (1988), 23:614-8.

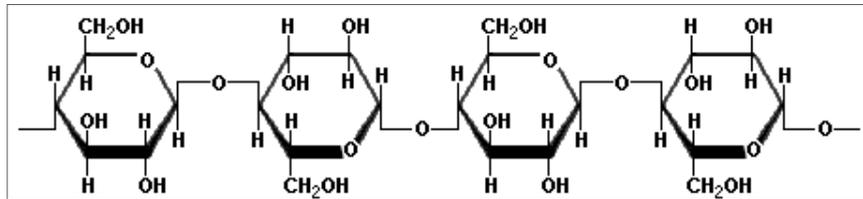


Figura 9. 4. Estructura química de una celulosa

Las largas fibras de celulosa se mantienen unidas a través de enlaces de hidrógeno intermoleculares. Los puentes de hidrógeno se establecen con otras cadenas que están en el mismo plano, así como con cadenas en planos superiores e inferiores para formar paquetes fuertes y fibrosos.

Las fibras de celulosa pueden tener muy distintos orígenes. En esencia, pueden ser de origen forestal, diferentes a su vez según procedan de maderas coníferas o frondosas, o fibras de celulosa de plantas herbáceas (bambú). Dicho origen condiciona sus características morfológicas y químicas y puede determinar también su uso en materiales compuestos de matriz polimérica. Asimismo, los procesos de obtención de las fibras de celulosa (procesos químicos, semiquímicos y mecánicos) y, posteriormente, los tratamientos adicionales de la pasta como son el blanqueo y el refinado, influyen en las características del material compuesto que se forme a partir de ellas.

La incorporación de fibras de celulosa en una matriz de yeso se realiza con el objetivo de mejorar sus propiedades de resistencia a flexión y de reducir la fisuración en elementos prefabricados de yeso¹³².

¹³² Carvalho M.A, Calil C, Savastano H, Tubino R, Carvalho M.T. Microstructure and mechanical properties of gypsum composites reinforced with recycled cellulose pulp. Mater Res (2008), 11(4), 391-397.

Las fibras de celulosa procedentes del bambú, son conocidas por sus propiedades tecnológicas, su estabilidad y resistencia a tracción (hasta 40kp/mm²). Este tipo de fibras se han empleado como refuerzo de composites de caucho¹³³.

9.2 Objetivo

El objetivo de este capítulo es analizar la mejora de las propiedades de las mezclas de yeso aligerado con residuos poliméricos ya estudiadas, al añadir diferentes tipos de aditivos y fibras para la obtención de mezclas de diseño con buenas prestaciones.

Para ello, se han llevado a cabo los siguientes pasos:

1. Estudio de selección del aditivo y fibra óptimos en su dosificación idónea.
2. Análisis de la compatibilidad entre el aditivo y la fibra adecuados, sin yeso.
3. Caracterización de las mezclas aditivadas en estado fresco mediante:
 - a. La relación agua/yeso.
 - b. El tiempo de fraguado.
4. Determinación de las propiedades de las muestras mejoradas en estado endurecido a partir de los siguientes ensayos:
 - a. Densidad aparente húmeda y seca de las probetas.

¹³³ Visakh P.M, Thomas S, Oksman K, Mathew A.P. Crosslinked natural rubber nanocomposites reinforced with cellulose whiskers isolated from bamboo waste: Processing and mechanical/thermal properties. Comp Part A: Appl Sci Manufacturing (2012), 43(4), 735–741.

- b. Capacidad de retención de agua.
- c. Propiedades mecánicas a 7 y 28 días.
- d. Dureza superficial Shore C a 7 y 28 días.
- e. Adherencia sobre soporte cerámico.
- f. Absorción por capilaridad.
- g. Permeabilidad al vapor de agua.

9.3 Materias primas

A continuación se describen los aditivos y fibras empleados en este trabajo, así como la nomenclatura empleada en las mezclas de estudio:

V: Superplastificante a base de policarboxilatos (Sika® Viscocrete®G2).

M: Superplastificante a base de melaminas (Sikamix 3300®).

L: Emulsión adhesiva sintética de estireno-butadieno (Sika® Latex).

F1: Fibras de polipropileno (Fibermesh®).

F2: Fibras de polipropileno (SikaCim®).

FC: Fibras de celulosa (recicladas).

Tanto la caracterización de los aditivos como la de las fibras empleadas en este estudio, se describen en los Apartados 5.1.4 y 5.1.5.

9.4 Metodología

Para conocer el comportamiento de los diferentes materiales de yeso con residuos poliméricos y elegir los más adecuados según su aplicación,

se han realizado previamente tres procesos de selección, con el objetivo de determinar las composiciones que mejor se adaptan al revestimiento de paredes y/o techos, y a su posible aplicación en la fabricación de elementos prefabricados.

Las dosificaciones empleadas, sobre el peso del yeso, fueron de 0,4 y 0,8% en el caso de los aditivos (M) y (V), y de 2, 4 y 6% en el caso del (L)

En cuanto a las fibras, los porcentajes de dosificación utilizados fueron de 1 y 2% para las (F1) y (F2), y de 1 y 3% para las fibras (FC), todos ellos sobre el peso del yeso.

9.4.1 Primera fase de selección

En esta fase se ha analizado el resultado de agregar aditivos y fibras, por separado, a las mezclas, estudiando su porcentaje más adecuado. Para ello, se ha realizado una batería de pruebas iniciales sobre las dosificaciones Y0,5PW, Y1PW y Y2PW. Los ensayos consistieron en la determinación de las resistencias mecánicas a 7 días a flexión y compresión, la obtención de la dureza superficial Shore C y el cálculo de la densidad aparente seca. Los resultados han permitido realizar una selección del aditivo y fibra más convenientes, así como determinar la dosificación idónea de los mismos.

9.4.2 Segunda fase de selección

En esta fase se ha estudiado la compatibilidad de mezclas ternarias yeso-aditivo-fibra, de los componentes y proporciones seleccionados en la fase anterior. Para ello, se han determinado las resistencias mecánicas a 7 días a flexión y compresión, la determinación de la dureza

superficial Shore C y la determinación de la densidad aparente en este tipo de mezclas.

Las mezclas que resultan de esta segunda etapa de selección se aplican en la fabricación de probetas de fórmula mejorada.

9.4.3 Tercera fase de diseño de fórmulas mejoradas

En esta fase se han seleccionado las mezclas aditivadas obtenidas de las etapas anteriores y se han analizado de acuerdo a los ensayos de caracterización, para comprobar que todas ellas cumplen las exigencias establecidas en la Norma UNE-EN 13279-1:2009. Así mismo, se ha realizado la comparativa de las mezclas obtenidas con aditivos y fibras respecto a las mezclas de referencia.

9.5 Resultados y discusión

9.5.1 Resultados de la primera fase de selección

Mezclas con poliuretano

En la Tabla 9.1 se indican los resultados de los ensayos iniciales realizados a la dosificación Y0,5PW con los diferentes tipos de aditivos. El mejor comportamiento se observa en mezclas que incorporan aditivo Sikamix (M) con dosificación del 0,4% sobre el peso del yeso con una mejora del 7% en la dureza superficial Shore C, un aumento de la resistencia mecánica a flexión a 7 días del 37% y un incremento de la resistencia a compresión a 7 días del 27%, respecto de la dosificación Y0,5PW sin aditivos. Esto se corresponde con los resultados de densidad aparente seca que muestran un aumento de hasta el 10%, que indica

que las probetas son más compactas y por lo tanto más resistentes mecánicamente. Los copolímeros basados en melaminas pueden mejorar significativamente la microestructura porosa de los yesos hidratados, reduciendo la porosidad¹³⁴. Otros autores observaron esta mejora del rendimiento en mezclas de yeso debido a que reducen la relación agua/yeso y, por lo tanto, disminuyen el volumen total de poros y el diámetro medio de poro, lo que da lugar a una estructura interna más compacta¹³⁵.

Los resultados obtenidos con el resto de aditivos Viscocrete (V) y Latex (L), empeoran respecto de la dosificación sin aditivos, obteniéndose una calidad menor de la matriz de yeso. Por lo tanto, el aditivo Sikamix es, *a priori*, el aditivo idóneo para mejorar las mezclas de yeso aligerado con poliuretano.

Y0,5PW				
Tipo de aditivo	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Aditivo	86,36	3,40	8,87	1258
M_{0,4%}	92,36	4,66	11,27	1384
V_{0,4%}	84,73	3,02	6,92	1263
L_{2%}	85,17	3,49	7,66	1232
L_{4%}	72,03	2,13	4,42	1082
L_{6%}	73,65	2,63	5,11	1125

Tabla 9. 1. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y0,5PW con aditivos Sikamix (M), Viscocrete (V) y Latex (L)

¹³⁴ Fu L.F, Deng Z.L, Zhang Y, Lin H, Zheng B.C, Yang Z.Q, Yu J.G. Study of dispersing effects of polycarboxylate superplasticizers on gypsum particles. Jianzhu Cailiao Xuebao/J Build Mater (2010), 13(5), 589-594.

¹³⁵ Guan B, Ye Q, Zhang J, Lou W, Wu Z. Interaction between α -calcium sulfate hemihydrate and superplasticizer from the point of adsorption characteristics, hydration and hardening process. Cem Concr Res (2010), 40(2), 253-259.

En la Figura 9.5 se muestra la imagen de la microscopía del aditivo Sikamix con el poliuretano PW. Se observa que las partículas de poímero del aditivo se sitúan sobre el poliuretano generando una red de unión entre ellas.



Figura 9. 5. Imagen SEM del poliuretano blanco con aditivo Sikamix y probetas de poliuretano con aditivos

A medida que la sustitución de yeso por poliuretano es mayor, las mejoras conseguidas por el aditivo son sensiblemente menores (Tabla 9.2). La presencia de polímero puede afectar a la compatibilidad yeso-aditivo, ya que los aditivos pueden interactuar no sólo con las partículas de sulfato cálcico hidratado sino también con las adiciones poliméricas. La utilización de adiciones de residuos poliméricos puede modificar el efecto fluidificante de los aditivos sobre las pastas, debido a que se producen reacciones paralelas a las de hidratación del yeso, pudiendo estas adiciones absorber parte del aditivo. Sin embargo, hoy en día, son pocos los trabajos que han estudiado la compatibilidad entre

yeso con residuos de polímeros y aditivos basados en carboxilatos y melaminas¹³⁶.

Y1PW				
Tipo de aditivo	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Aditivo	76,69	2,41	5,92	1114
M_{0,4%}	83,13	3,27	6,85	1178

Tabla 9. 2. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y1PW con aditivo Sikamix (M) al 0,4%

En la Tabla 9.3 se muestra el efecto del Sikamix en concentraciones del 0,4 y el 0,8%, observándose un mejor comportamiento en dosificaciones al 0,8% con incrementos del 14% en la dureza superficial Shore C, del 38% en la resistencia a flexión y del 6% en la resistencia a compresión, respecto a la dosificación al 0,4%.

Y2PW				
Tipo de aditivo	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Aditivo	45,59	0,90	2,14	879
M_{0,4%}	48,47	0,93	2,29	913
M_{0,8%}	55,47	1,28	2,59	921

Tabla 9. 3. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y2PW con aditivo Sikamix (M) al 0,4% y al 0,8%

Con el objetivo de evitar la rotura frágil del material, se han incluido fibras de diferente naturaleza en la composición de las mezclas. Los resultados obtenidos con dos tipos fibras de polipropileno (F1 y F2) y

¹³⁶ Alonso, M.M. Comportamiento y compatibilidad de cementos y aditivos superplastificantes basados en carboxilatos. Efecto de la naturaleza de los cementos y estructura de los aditivos. Tesis Doctoral (2011). Madrid.

dos dosificaciones diferentes, se indican en la Tabla 9.4, para mezclas tipo Y0,5PW.

Y0,5PW				
Tipo de fibra	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Fibra	86,36	3,40	8,87	1258
F1 _{1%}	80,26	3,81	6,21	1148
F1 _{2%}	71,21	3,69	3,71	1061
F2 _{1%}	81,23	2,73	6,01	1192
F2 _{2%}	78,27	3,05	4,25	1128

Tabla 9. 4. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y0,5PW con fibras SikaCim (F1) y Fibermesh (F2), al 1 y al 2%

En todos los casos, se observa que la inclusión de fibras en la matriz de yeso con poliuretano produce una reducción de la dureza superficial y una disminución de la resistencia a compresión, que se hace más evidente cuanto mayor es la dosificación de fibra.

Por otro lado, la adición de fibra tipo F1 mejora la resistencia a flexión de las mezclas hasta en un 12% en probetas con un 1% de fibra sobre el peso del yeso, y del 9% si la dosificación es del 2%. En la muestra Y0,5PW la incorporación de fibra tipo F2 presenta un peor comportamiento que la adición de fibra F1, debido probablemente a que las fibras tipo F2 poseen una geometría más longitudinal y de mayor diámetro que las fibras F1. Ese efecto puede ser explicado debido a una falta de homogeneidad en la dispersión de las fibras en la matriz del conglomerante, que pueden aparecer formando acumulaciones que

producen un incremento en los poros de la matriz¹³⁷. Esto se justifica también en la visualización de la imagen del microscopio de la Figura 9.6.

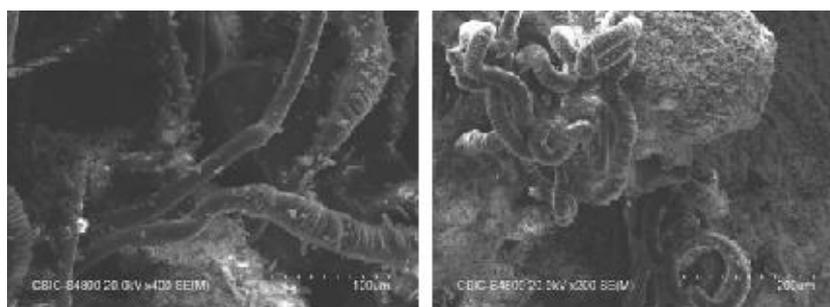


Figura 9. 6. FSEM de la muestra Y2PW+1% F2

En cuanto a las mezclas Y2PW, se comprueba que la fibra de celulosa FC no es capaz de inducir ninguna mejora en los resultados de los ensayos iniciales (Tabla 9.5). La explicación se debe a que este tipo de fibra no se dispersa de forma homogénea en la matriz del conglomerante, dando lugar a matrices porosas, de baja densidad y poco compactas, experimentando una falta de adherencia entre las fibras y la matriz del conglomerante (Figura 9.7)¹³⁸.

Y2PW				
Tipo de fibra	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Fibra	45,59	0,90	2,14	879
FC _{1%}	34,45	0,81	1,32	810
FC _{3%}	29,12	0,58	0,88	727

Tabla 9. 5. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y2PW con fibra de celulosa (FC), al 1 y al 3%

¹³⁷ Del Río Merino M, Comino P. Dispersability degree influence of glass fibre E in the mechanical behaviour and workability of plaster. Mater Constr (2001), 51(261), 33-44.

¹³⁸ Khenfer M.M, Morlier P.P. Cellulose fibres reinforced plaster. Mater Structur (1999), 32, 52-58.

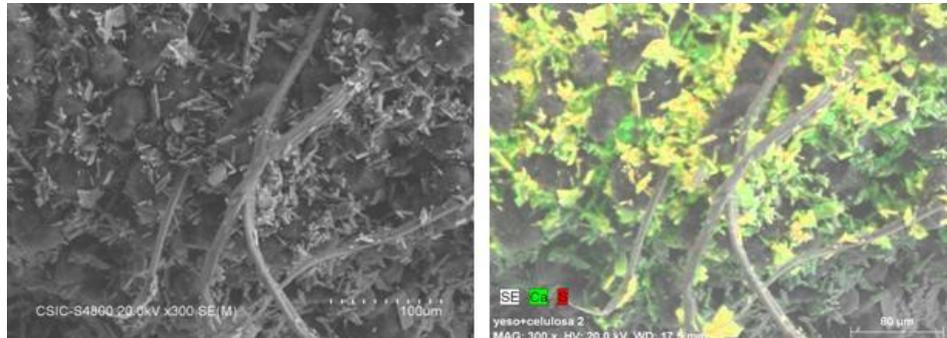


Figura 9. 7. FSEM de la muestra Y2PA+1% FC

Por lo tanto, la fibra de polipropileno SikaCim (F1) dosificada al 1% es la más adecuada para incluir en las mezclas de yeso aligerado con poliuretano, con el objetivo de evitar su rotura frágil. En la Figura 9.8 se visualiza el FSEM de la matriz yeso-YW en la que se aprecian las fibras F1 atravesando la matriz. La Figura 9.9 muestra dos imágenes en detalle de la interfase yeso-fibra F1.

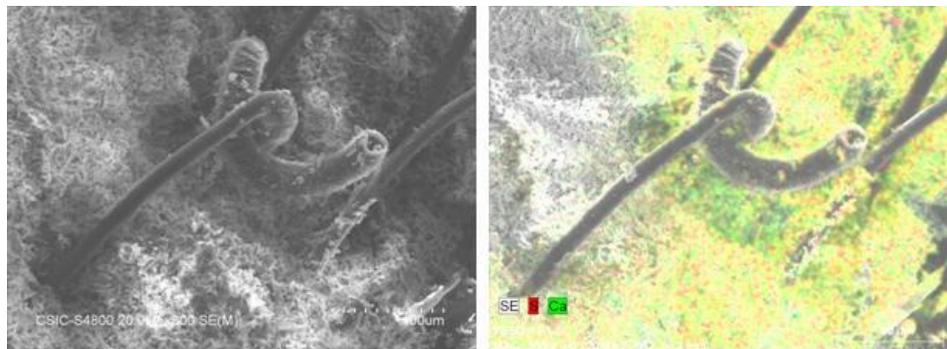


Figura 9. 8. FSEM de la muestra Y2PW+1% F1

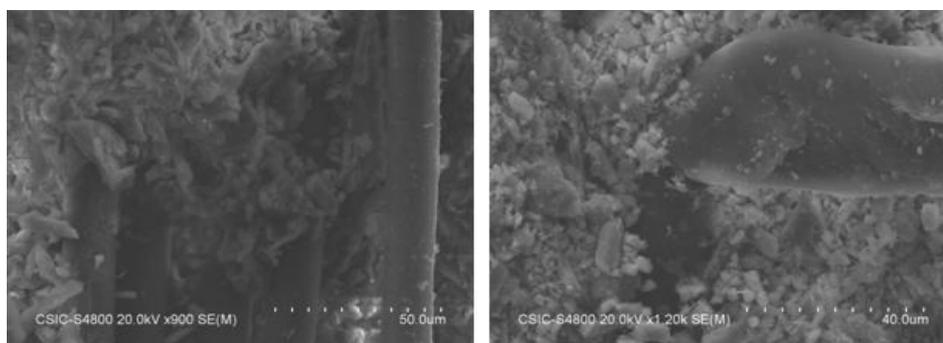


Figura 9. 9. FSEM de la interfase yeso-fibra en la muestra Y2PW+1% F1

Mezclas con poliamida

Para evaluar estos resultados en mezclas que incorporan poliamida se han realizado los ensayos iniciales con el aditivo Sikamix (M) al 0,8% y con la fibra de polipropileno SikaCim (F1) al 1% en mezclas Y3PA. De acuerdo con los resultados representados en las Tablas 9.6 y 9.7, se observa un comportamiento más desfavorable con este tipo de residuo polimérico en comparación con el obtenido en las mezclas con poliuretano. Por este motivo, y debido al buen comportamiento reológico que presentan las mezclas de yeso con poliamida aditivadas con Viscocrete (V) al 0,8 % (Capítulo VIII), se ha optado por incluir este aditivo en este tipo de muestras.

Y3PA				
Tipo de aditivo	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Aditivo	70,87	0,71	2,27	829
M _{0,8%}	65,70	0,48	1,35	814

Tabla 9. 6. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y3PA con aditivo Sikamix (M) al 0,8%

Y3PA				
Tipo de fibra	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Sin Fibra	70,87	0,71	2,27	829
F1_{1%}	67,69	0,72	2,01	833
FC_{1%}	63,83	0,49	1,07	804
FC_{3%}	62,80	0,66	1,32	782

Tabla 9. 7. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y3PA con fibra de polipropileno (F1) al 1% y con fibra de celulosa (FC), al 1 y al 3%

9.5.2 Resultados de la segunda fase de selección

Las Tablas 9.8, 9.9 y 9.10, muestran los resultados seleccionados obtenidos para las mezclas Y0,5PG, Y0,5PW y Y0,5PA dosificadas con la composición de aditivos y fibras obtenida en la fase anterior. Los datos indican que con mezclas ternarias del tipo yeso+aditivo+fibra se consigue una importante mejora de la resistencia a flexión, superando a la de compuestos binarios tipo conglomerante+aditivo o conglomerante+fibra, comprobándose una relación sinérgica entre los aditivos y la fibra de polipropileno. Este hecho puede ser explicado teniendo en cuenta que las fibras se dispersan mejor en presencia del aditivo¹³⁹. En cuanto a la resistencia a compresión, los resultados muestran una disminución de la misma respecto de las dosificaciones conglomerante+aditivo o conglomerante+fibra. No obstante, estos valores siguen siendo superiores a los de los compuestos sin aditar,

¹³⁹ Dalmay P, Smith A, Chotard T, Sahay-Turner P, Gloaguen V, Krausz P. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: Influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. J Mater Sci (2010), 45, 793-803.

por lo que se puede concluir que la combinación de aditivos y fibras supone una buena alternativa para conseguir mezclas mejoradas.

Y0,5PG				
Combinación	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m³)
Solo fibra	82,40	3,71	9,45	1323
M_{0,8%} + F1_{1%}	85,70	3,87	12,31	1394

Tabla 9. 8. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y0,5PG con aditivo M al 0,8% y con fibra F1 al 1%

Y0,5PW				
Combinación	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m³)
Solo fibra	86,36	3,40	8,87	1258
M_{0,4%} + F1_{1%}	81,62	6,26	7,41	1082

Tabla 9. 9. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y0,5PW con aditivo M al 0,8% y con fibra F1 al 1%

Y0,5PA				
Combinación	Dureza superficial (Shore C)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Densidad aparente (Kg/m³)
Solo fibra	88,43	3,45	8,39	1190
V_{0,8%} + F1_{1%}	89,43	3,59	9,23	1242

Tabla 9. 10. Ensayos iniciales a 7 días en mezclas Y0,5PA con aditivo V al 0,8% y con fibra F1 al 1%

9.5.3 Resultados de la tercera fase de selección

En este apartado se han caracterizado con mayor detalle las mezclas más adecuadas seleccionadas en las dos fases de selección anteriores. Las muestras elegidas se resumen en la Tabla 9.11 y están clasificadas en función de la aplicación que se le quiera dar al material.

Mezclas mejoradas			
Uso	Tipo de Mezcla	Aplicación/exigencia térmica	
MEZCLAS PARA ELEMENTOS PREFABRICADOS	Y0,5PG+M _{0,8%} +F1 _{1%}	Mezclas utilizadas como material para elementos prefabricados	
	Y0,5PW+M _{0,8%} +F1 _{1%}		
	Y0,5PA+V _{0,8%} +F1 _{1%}		
	MEZCLAS PARA ELEMENTOS PREFABRICADOS	Y1PG+M _{0,8%} +F1 _{1%}	Mezclas utilizadas como material para elementos prefabricados con alta exigencia de aislamiento térmico
		Y1PW+M _{0,8%} +F1 _{1%}	
		Y1PA+V _{0,8%} +F1 _{1%}	
	MEZCLAS PARA ELEMENTOS PREFABRICADOS	Y2PG+M _{0,8%} +F1 _{1%}	Mezclas utilizadas como material para elementos prefabricados con muy alta exigencia de aislamiento térmico
		Y2PW+M _{0,8%} +F1 _{1%}	
		Y2PA+V _{0,8%} +F1 _{1%}	
MEZCLAS PARA REVESTIMIENTOS	Y1PG+M _{0,8%}	Mezclas utilizadas como material para revestimientos con alta exigencia de aislamiento térmico	
	Y1PW+M _{0,8%}		
	Y1PA+V _{0,8%}		

Tabla 9. 11. Mezclas mejoradas en función de su aplicación

La experimentación realizada ha confirmado las posibilidades de aplicación de esas mezclas como guarnecido en revestimiento de paredes y/o techos y su aplicación como material para elementos prefabricados.

9.5.4 Mezclas utilizadas como material para elementos prefabricados

9.5.4.1 Relación $a/(Y+\text{polímero})$

La influencia de los aditivos y fibras en la relación agua/yeso+polímero de las mezclas es muy baja, y puede observarse en las gráficas de la Figura 9.10. Así en las mezclas tipo YPG la relación $a/(Y+PG)$ disminuye aproximadamente un 5%, en la YPW se aprecia una ligera bajada en la relación $a/(y+PW)$ del 15%. En cuanto a las muestras YPA el descenso de

la relación $a/(Y+PA)$ se cuantifica en un 7,5%. El aditivo ejerce una influencia en la relación $a/(Y+polímero)$, disminuyendo su valor, y la fibra ejerce el efecto contrario, lo que podría explicar la compensación entre ambos componentes.

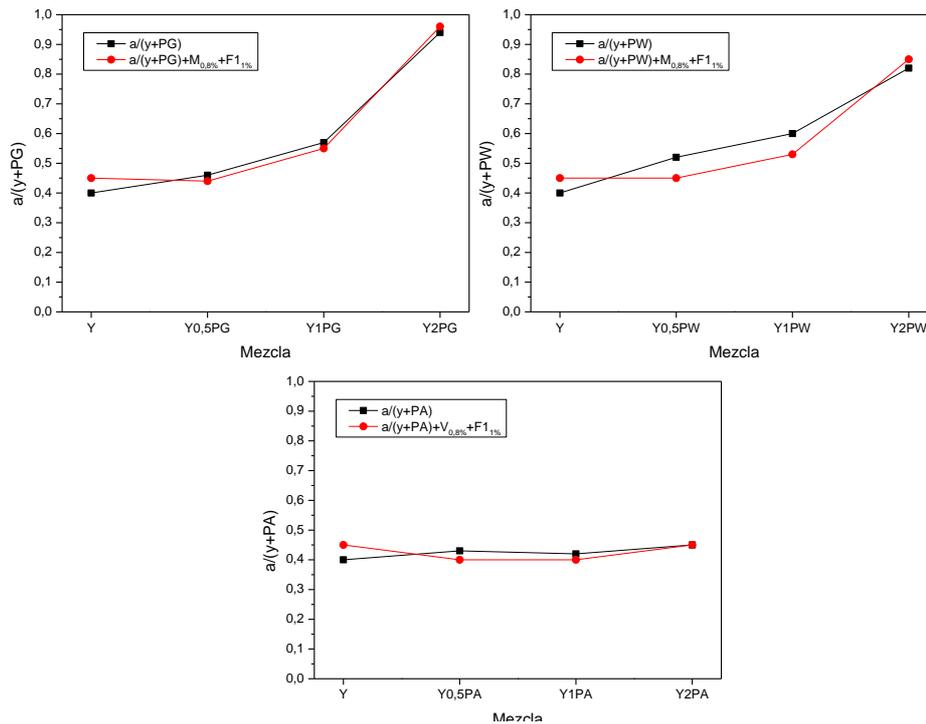


Figura 9. 10. Comparativa de la relación agua/(yeso+polímero) entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.4.2 Tiempo de fraguado

La Figura 9.11 muestra los tiempos de principio de fraguado de las mezclas mejoradas con fibras y aditivos. El cambio más significativo se muestra en las mezclas tipo YPA, en las que el tiempo de fraguado se ve incrementado aproximadamente un 38% respecto a las mezclas sin aditivos.

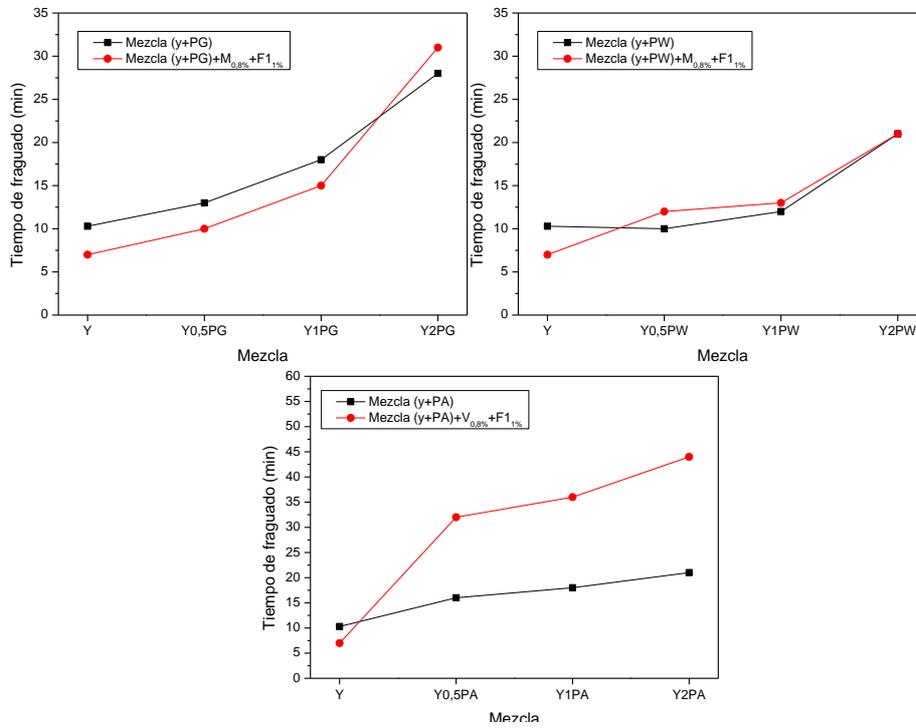


Figura 9. 11. Comparativa del tiempo de fraguado entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.4.3 Densidad aparente seca

En los gráficos que muestra la Figura 9.12, se puede observar que los valores de densidad de las mezclas que incluyen aditivos y fibras, son mayores que las que no incluyen estos elementos en su composición, lo que induce a pensar que su porosidad es menor y, por lo tanto, la estructura es más compacta y más densa. En todos los casos se valoran incrementos de la densidad aparente seca entre el 5 y el 10%.

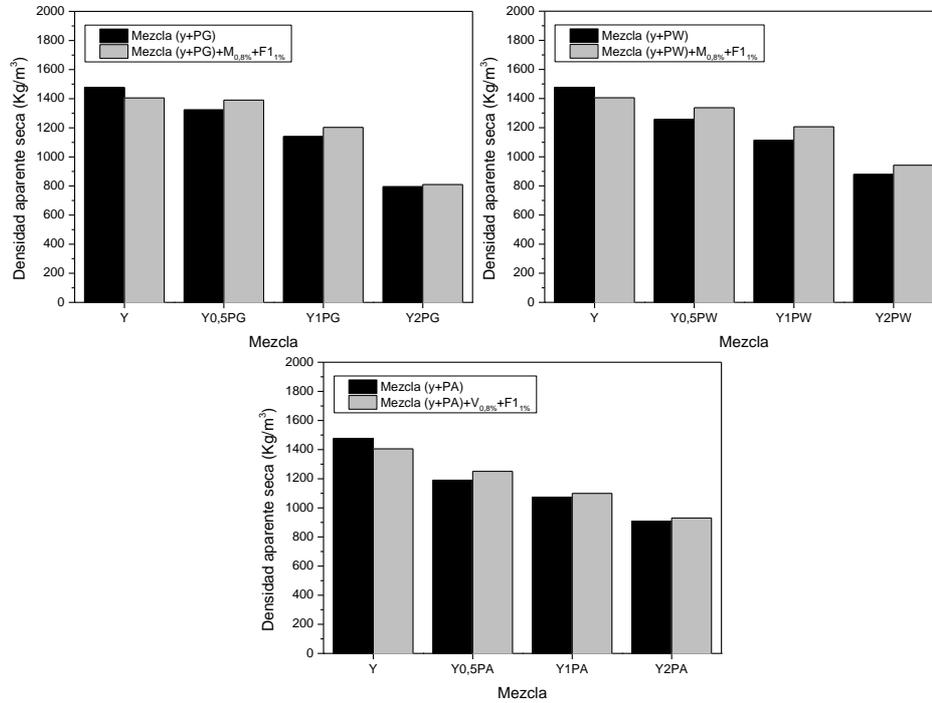


Figura 9. 12. Comparativa de la densidad aparente seca entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.4.4 Dureza superficial Shore C

La Figura 9.13 muestra los valores de dureza superficial Shore C de las mezclas mejoradas con fibras y aditivos. No se observa variación significativa de los valores de dureza superficial de las mezclas con aditivos y fibras tipo YPW y YPA, respecto a las que no los incluyen en su composición. En mezclas tipo YPG se observa un incremento de la dureza de aproximadamente el 15%.

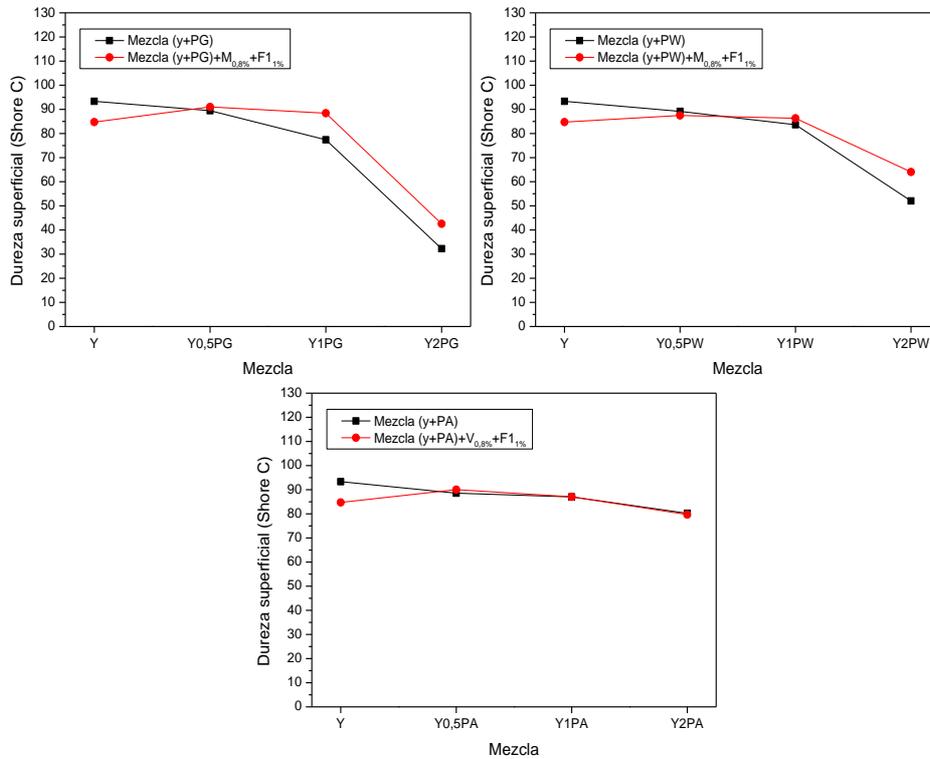


Figura 9. 13. Comparativa de la dureza superficial Shore C entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.4.5 Resistencia a flexión

Los resultados recogidos en la Figura 9.14, señalan en todos los casos un aumento de los valores de resistencia a flexión respecto a las mezclas sin aditivos ni fibras.

Igualmente, se comprueba que todas las muestras mejoradas con aditivos y fibras cumplen con la norma UNE-EN-13279-1:2009, ya que se supera el valor de resistencia mínima a flexión exigido de 1,0 MPa.

Además de los valores de rotura expuestos en las gráficas, hay que considerar la forma de rotura de las probetas (Figura 9.15), en las que se

aprecia que las fibras proporcionan una unión solidaria de la matriz del yeso-polímero que impiden el colapso de la misma.

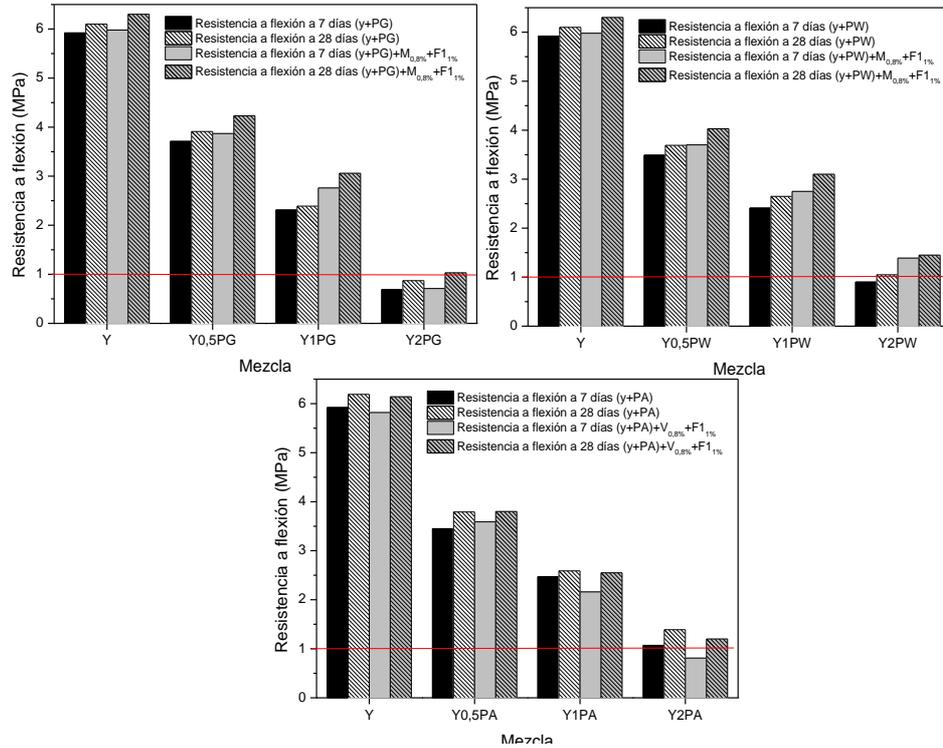


Figura 9. 14. Comparativa de resistencia a flexión a 7 y 28 días entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos



Figura 9. 15. Rotura de probeta Y2PW con aditivo ($M_{0,8\%}$) y fibra ($F1_{1\%}$)

9.5.4.6 Resistencia a compresión

A la vista de los resultados mostrados en la Figura 9.16, se observa que en todos los casos en los que se incorporan aditivos y fibras, aumentan los valores de resistencia a compresión respecto a las mezclas sin aditivos y fibras.

Igualmente, se observa que todas las mezclas mejoradas con aditivos y fibras, cumplen con la norma UNE-EN 13279-1:2009, ya que superan los valores exigidos de 2,0 MPa de resistencia mínima a compresión.

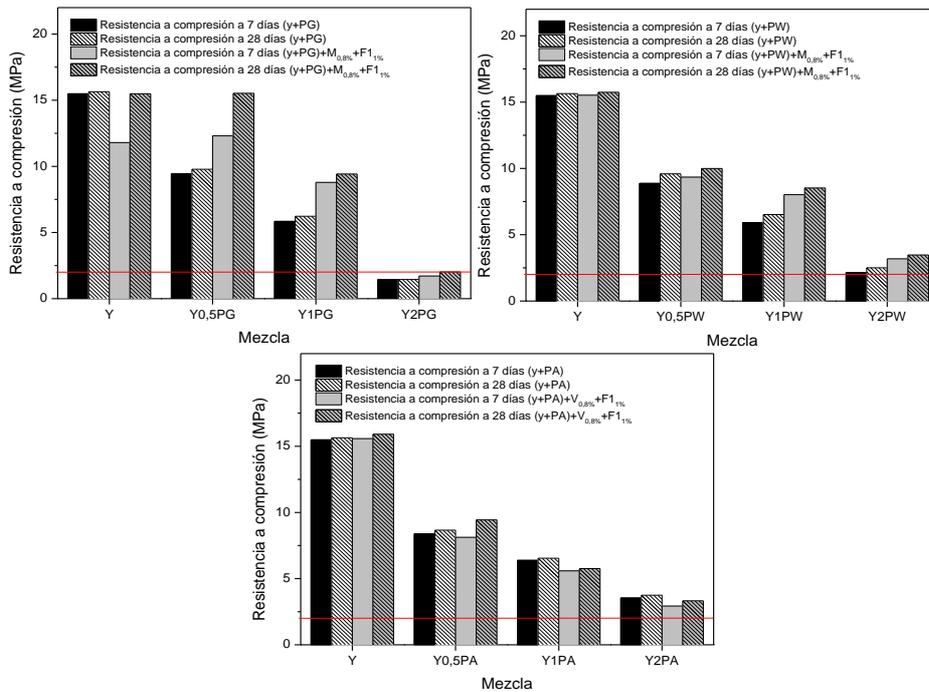


Figura 9. 16. Comparativa de resistencia a flexión a 7 y 28 días entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.4.7 Adherencia

La Figura 9.17 muestra los valores de adherencia de las mezclas optimizadas con fibras y aditivos. En todos los casos se observan valores

mayores de adherencia de las mezclas con aditivos y fibras tipo YPG YPW y YPA, respecto a las que no los incluyen en su composición, de manera que mezclas Y0,5PG y Y1PW experimentan un incremento de la adherencia del 70,73% y del 53,65% respectivamente; las muestras Y1PG y Y1PW un aumento de la adherencia de 63,16% y el 42,86% respectivamente, y las mezclas Y2PG y Y2PW del 62,50% y el 33,33%, respectivamente. En cuanto a las dosificaciones de yeso con poliamida, se observan grandes incrementos de la adherencia, que llegan a alcanzar hasta el triple de su valor de referencia, en el caso de la mezcla Y1PA. La fuerza de adhesión total del compuesto es debida por un lado a la unión de los enlaces secundarios, por las fuerzas polares de tipo electrostático que puedan establecerse entre la matriz y los agregados poliméricos, y por otro, a los entrecruzamientos mecánicos entre las fibras, producidos por el rozamiento o enlace físico derivado de las irregularidades en las superficies de contacto.

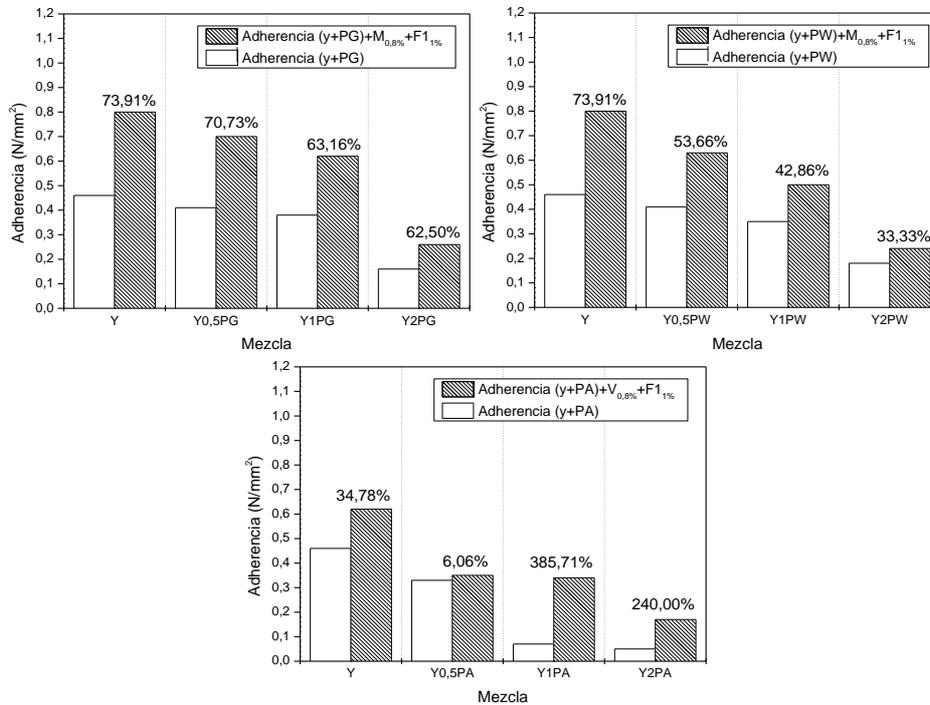


Figura 9. 17. Comparativa de adherencia entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

Analizando los datos de adherencia conjuntamente con el tipo de rotura producida, se comprueba que para las mezclas con bajos contenidos de poliuretano, Figuras 9.18 y 9.19: (a) y (b), se alcanzan los mayores incrementos de adherencia con un tipo de rotura por adhesión. A medida que aumenta la cantidad de polímero en la mezcla, el incremento de adherencia es menor, con un tipo de rotura por cohesión (Figuras 9.18 y 9.19: (c)). Esto se debe a que los contenidos de poliuretano reducen la calidad de la matriz de conglomerante total, aunque en menor medida que en probetas que no han incluido el aditivo y la fibra en su fabricación.

En todas las dosificaciones con poliamida se produce un incremento de la adherencia. En el gráfico de la Figura 9.20 se observa que la adherencia de la mezcla de referencia con aditivos y fibras aumenta en menor medida, ya que el yeso absorbe peor el aditivo (V) que el (M). Sin embargo, el comportamiento mejora con el contenido de poliamida en la composición final.



Figura 9. 18. Tipos de rotura de las mezclas con aditivos y fibras (a):Y0,5PG; (b):Y1PG; (c):Y2PG

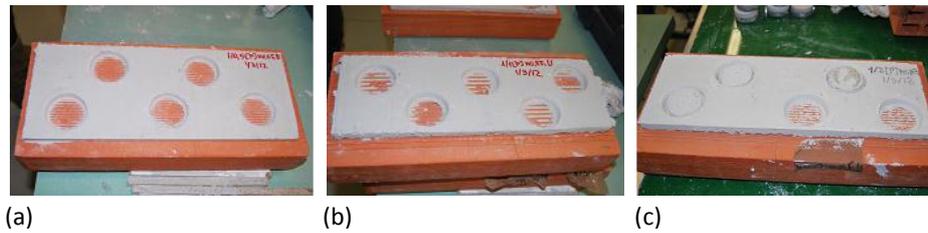


Figura 9. 19. Tipos de rotura de las mezclas con aditivos y fibras(a):Y0,5PW; (b):Y1PW; (c):Y2PW



Figura 9. 20. Tipos de rotura de las mezclas con aditivos y fibras(a):Y0,5PA; (b):Y1PA; (c):Y2PA

9.5.4.8 Absorción por capilaridad

Al estudiar los resultados recogidos en la Figura 9.21, se comprueba que en todos los casos de yeso-polímero que incluyen aditivos y fibras en la

dosificación, disminuyen los valores de absorción por capilaridad respecto a las mezclas sin aditivos y fibras. El hecho de incorporar aditivo ha permitido mejorar en medida de lo posible, la matriz de conglomerante yeso-polímero, reduciendo su porosidad capilar y en consecuencia su capilaridad.

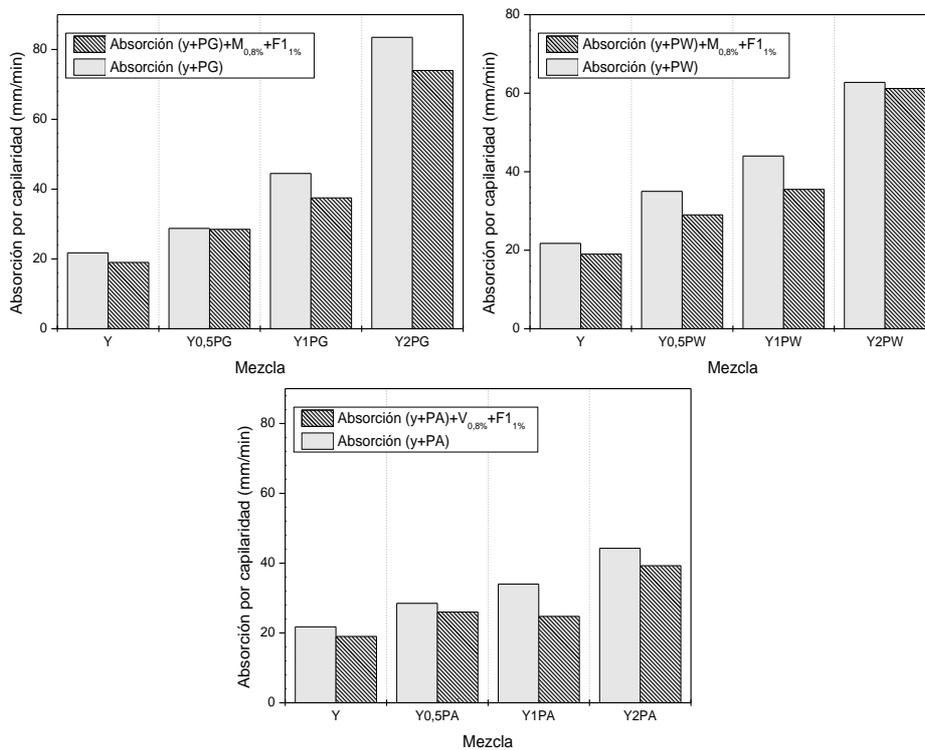


Figura 9. 21. Comparativa de la absorción por capilaridad entre las mezclas YPG, YPW y YPA en presencia y ausencia de fibras y aditivos

9.5.5 Mezclas utilizadas como material para revestimientos de paramentos

En la Tabla 9.12 se recoge un resumen con los resultados de las propiedades de las mezclas de yeso-polímero sin adiciones, en comparativa con las mezclas con aditivo, todas ellas seleccionadas como

dosificaciones mejoradas de posible uso en paramentos interiores como revestimiento.

Se incluye, además, las imágenes de microscopía FSEM de las tres dosificaciones optimizadas (Figuras 9.22 y 9.23).

Propiedades	Y1PG	Y1PG _{M0,8%}	Y1PW	Y1PW _{M0,8%}	Y1PA	Y1PA _{V0,8%}
Relación a/(Y+PU)	0,60	0,53	0,57	0,55	0,42	0,35
Tiempo de fraguado (min)	12	9	18	10	18	75
Densidad aparente (Kg/m ²)	1114	1209	1140	1165	1074	1110
Resistencia a flexión a 28 días (MPa)	2,41	3,67	2,31	2,67	2,47	1,73
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	5,92	8,94	5,84	6,77	6,38	5,09
Dureza superficial a 28 días (Shore C)	76,69	89,97	76,58	83,47	86,59	88,10
Adherencia (N/mm ²)	0,35	0,41	0,38	0,54	0,07	0,09
Permeabilidad al vapor de agua (Kg/m·s·Pa, 10 ⁻¹¹)	1,794	1,996	2,342	2,388	1,393	8,932
Absorción por capilaridad (mm/min)	44,50	33,75	44,00	36,50	34,00	20,75
Conductividad térmica (W/m·k)	0,262 6	0,2726	0,270 1	0,2791	0,241 9	0,2499

Tabla 9. 12. Resumen comparativo de las propiedades de las mezclas mejoradas para revestimiento de paredes o techos con aditivos respecto a las que no tienen aditivo

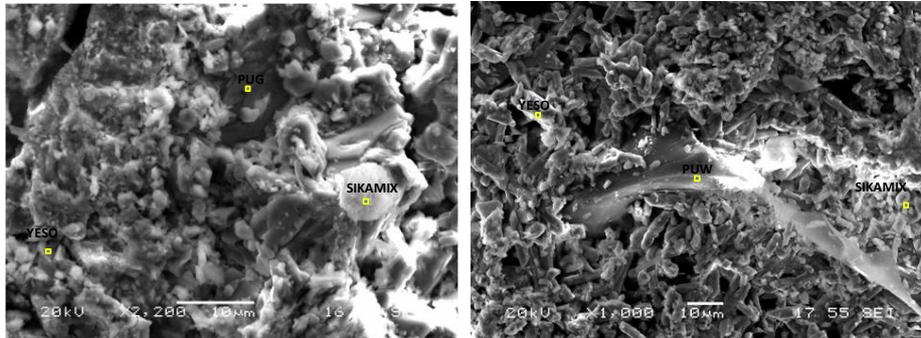


Figura 9. 22. SEM de las muestras Y1PG_{M0,8%} y Y1PW_{M0,8%}

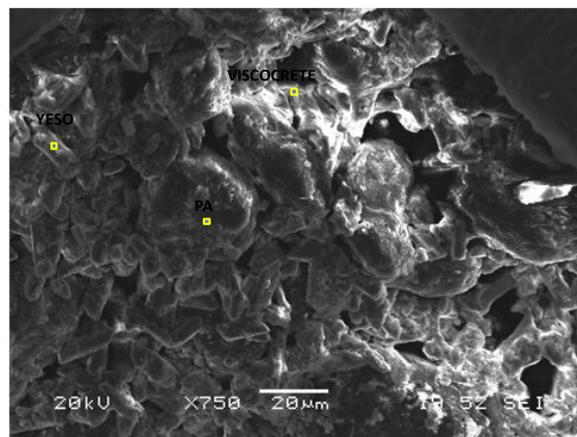


Figura 9. 23. SEM de la muestra Y1PA_{V0,8%}

9.6 Conclusiones

Los resultados revelan que el aditivo que mejor se comporta en combinación con las mezclas de yeso con poliuretano es el superfluidificante a base de melaminas Sikamix, en dosificación del 0,8% sobre el peso del yeso, mientras que el aditivo más adecuado en combinación con las mezclas de yeso con poliamida es el superfluidificante basado en policarboxilatos Viscocrete, con dosificaciones del 0,8% sobre el peso del yeso.

Ambos aditivos consiguen incrementos en la dureza superficial Shore C, mejoras de las resistencias mecánicas a flexión y a compresión, reducciones en las relaciones agua/yeso+polímero, disminuciones en la densidad aparente seca, aumento de la adherencia y reducciones en la absorción por capilaridad

La mejora que producen ambos aditivos en sus respectivas mezclas se basa en un descenso de la porosidad debido a la reducción en la relación agua/conglomerante, inducida por el aditivo. El mayor efecto dispersante se logra con los aditivos de polímeros de cadena lateral corta, de bajo peso molecular. Los copolímeros basados en melaminas y en policarboxilatos pueden mejorar significativamente la microestructura porosa de los yesos hidratados, reduciendo la porosidad y consiguiéndose matrices más compactas y más resistentes.

A medida que la sustitución de yeso por polímero es mayor, las mejoras conseguidas por el aditivo son sensiblemente menores. Esto puede deberse a que la presencia de polímero puede afectar a la compatibilidad yeso-aditivo, ya que los aditivos pueden interaccionar no solo con las partículas de sulfato cálcico hidratado, sino también con los residuos poliméricos.

Se ha comprobado que las fibras de polipropileno SikaCim inducen a la eliminación de rotura frágil por flexión en todas las mezclas. Una vez fisurado el material, no se produce el desprendimiento, lo que las convierte en adecuadas para la fabricación de mezclas cuyo uso sea para elementos prefabricados a base de yeso-polímero.

Se han resumido las posibles dosificaciones finales más adecuadas para aplicar clasificadas según el uso que se las vaya a dar, todas ellas con buenas prestaciones y acordes a la normativa en vigor.

Capítulo X: Estudio económico

10 Estudio económico

10.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es realizar un estudio que justifique la viabilidad económica de los diferentes productos desarrollados en esta Tesis Doctoral, entendiendo como tales, aquellos que cumplen con la normativa UNE-EN 13279-1:2009.

En primer lugar se ha realizado el **estudio analítico de costes** de cada una de las mezclas seleccionadas, con una introducción orientada a la relación coste-eficiencia y con un análisis cuantitativo basado en costes. Después, se ha completado el estudio con la exposición de **otros aspectos cualitativos** que impactan en el coste-eficiencia de las diferentes alternativas.

Por último, con el objetivo de no dar respuesta únicamente al estudio económico basado en el estudio analítico de los costes, se han tenido en cuenta dos aspectos cualitativos que se integran en el coste efectivo del material, que completarán la visión de la puesta en mercado de los productos finales. Por una parte, se ha considerado el beneficio medioambiental que implica el reaprovechamiento de los residuos, y por otra, se ha estimado la disponibilidad del desecho generado, para poner en valor el montante total del residuo producido en respuesta a una potencial demanda del mercado.

10.2 Estudio analítico de costes

El estudio analítico de costes se ha centrado en valorar de forma comparativa el coste de traslado a obra de los materiales necesarios para el desarrollo de una pared de 1m^2 .

No se ha tenido en cuenta el coste de la puesta en obra del material, ya que se ha supuesto que es el mismo coste en todos los materiales, reciclados o no. Por tanto, en el cálculo, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Coste del material: Este coste principalmente viene establecido por el tipo de mezcla, aligerante incluido, y proporciones de los mismos. Resulta importante indicar que en el caso de los materiales estudiados, los residuos utilizados como aligerante suponen un problema de gestión medioambiental y, por lo tanto, son materias primas que pueden obtenerse sin ningún coste asociado.
- Coste de transformación: Únicamente existe en el caso de los poliuretanos, ya que este residuo viene en planchas y para ser utilizado ha de ser triturado previamente. La poliamida se ofrece en polvo, por lo que no es necesario incluir el coste de transformación del producto.
- Coste de transporte: Para el yeso se considera un coste medio del kg de material ya en obra, mientras que en el caso de los aligerantes procedentes de residuo, sí se tiene en cuenta el transporte desde la planta donde se genera hasta la obra.

10.2.1 Detalle de las mezclas objeto del estudio

A continuación se enumeran las muestras que son objeto del estudio analítico de costes:

- Pared de yeso de 1m². Pared de yeso no aligerado que se toma de muestra de referencia para entender cómo el aligeramiento facilita el abaratamiento del coste de la muestra. Se estudia la dosificación (Y).
- Pared de yeso aligerado con perlita de 1m². Producto de mercado comercializado bajo el nombre de Perlinor®. Es un producto de yeso aligerado considerado tanto por sus características técnicas como por el hecho de suponer un ahorro en comparación con una pared de yeso no aligerada. La selección de Perlinor como yeso aligerado para su comparativa con los materiales con residuos estudiados en este trabajo, ha permitido disponer de un yeso lo suficientemente aligerado, como para que el estudio realizado permita comprobar la viabilidad económica de las propuestas de nuevos materiales reciclados.
- Pared de yeso aligerada con poliuretano blanco de 1m². Se consideran las mezclas 1/1 y 1/2 (Y1W, Y2PW).
- Pared de yeso aligerada con poliuretano gris de 1m². Se evalúan las mezclas 1/1 y 1/2 (Y1G, Y2PG).
- Pared de Yeso aligerada con poliamida de 1m². Se estudian las mezclas 1/1 y 1/2 (Y1PA, Y2PA).

10.2.2 Modelo de cálculo de costes de transformación

Como se ha comentado en el apartado de introducción, los costes de transformación se centran únicamente en el caso de los residuos utilizados de poliuretano tanto gris como blanco. Este coste se limita al triturado del residuo, de forma que pueda ser utilizado como aligerante en las paredes de yeso cuyas mezclas se han identificado en el apartado anterior.

Las hipótesis de partida son las siguientes:

- La planta de triturado se encuentra en el lugar donde se genera el residuo.
- Se estima el coste real de triturado en base al coste de la máquina y capacidad de producción.
- El resto de gastos de la planta de transformación se han establecido bajo una hipótesis de planta de transformación industrial¹⁴⁰.

10.2.2.1 *Costes de alquiler de la maquinaria de triturado*

Se han consultado diferentes empresas de alquiler para realizar una estimación del alquiler de una máquina de triturado con un rendimiento medio de molturación de este tipo de materiales de 0,8 Tn / hora, obteniendo un valor medio anual estimado de 9.324 €/año, incluyendo las labores de mantenimiento anuales necesarias.

¹⁴⁰ SOGAMA. Empresa gallega de gestión de residuos y plantas de transformación. 2011.

10.2.2.2 Costes de personal del proceso de triturado

En cuanto a recursos humanos, se ha dimensionado la mano de obra teniendo en cuenta la cualificación y los costes del empleado asociados a la empresa a fecha de mayo de 2012, en los que se incluye un coste de seguridad social del 32% a partir de la segunda anualidad.

Para mantener un turno de trabajo de forma anual, teniendo en cuenta vacaciones y posibles bajas laborales, se ha estimado un coste por puesto de trabajo de 28.800 €.

10.2.2.3 Otros gastos asociados a la planta de triturado

Se ha realizado una estimación del coste de triturado y para el resto de gastos asociados a la instalación se han tomado como referencia los producidos en una planta de transferencia facilitados por SOGAMA. En su hipótesis, el resto de gastos asciende a unos 60 €/m²/mes.

10.2.2.4 Resumen del modelo de transformación

A continuación se muestra una tabla que resume todos los costes de transformación, donde el parámetro más relevante es el coste de triturado por tonelada de material.

Costes de transformación	
Costes alquiler maquinaria	
Coste alquiler trituradora año	9.324,00 €
Coste alquiler trituradora mes	777,00 €
Tn trituradas mes	
Tn trituradas en 1 hora	0,80
Horas producción mes	352,00

Total Tn trituradas mes	281,60
Costes de personal maquinaria	
Personal salario anual	28.800,00 €
Personal salario mensual (12 pagas)	2.400,00 €
Personal medio mes	2
Gastos de instalaciones	
Coste con gastos m ² de instalaciones/ mes	60,00 €
Estimación m ² por máquina	45,00
Coste trituración/ Tn, mes	
Equipamiento	2,759 €
Personal	17,045 €
Gastos de instalaciones	9,588 €

Del cálculo se estima que el coste total de triturado de una Tn es de 29,393 € distribuidos tal y como muestra la Figura 10.1.

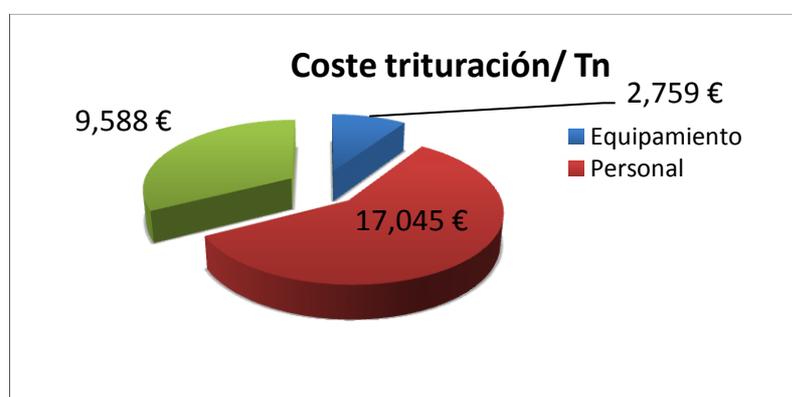


Figura 10. 1. Coste total de trituración por tonelada de residuo

La principal partida de coste asociado, con un 58% del coste total estimado, es el referido al personal asociado a la gestión del triturado del residuo. Esta persona sería la responsable del triturado y preparación del residuo para su transporte.

En cambio, el proceso de triturado como tal sólo supone un 9,39% del coste total, siendo el resto de los gastos los correspondientes a las instalaciones, incluyendo también los consumos energéticos del proceso, lo que supone un coste restante del 33%.

10.2.3 Modelo de cálculo de los costes de transporte

La baja densidad de los residuos y, en consecuencia, su elevado volumen, hace necesario considerar un estudio detallado del coste asociado al transporte del residuo hasta la obra.

Este estudio depende de la densidad de cada uno de los residuos. Por lo tanto, se ha establecido un cálculo de coste para cada material aligerante.

En todos los casos se han establecido las siguientes hipótesis de costes¹⁴¹:

- Camión utilizado para el transporte: Un camión tipo tráiler articulado de 108 m³ de capacidad.
- Kilometraje del camión: se parte de un coste de 1,8 €/km, que incluye:
 - Alquiler del vehículo, incluye vehículo, seguro y gastos de mantenimiento.
 - Costes asociados a consumo de combustible.
- Conductor del vehículo: 20 €/hora.

¹⁴¹ SOGAMA. Dato obtenido del estudio realizado sobre su propia flota de camiones, 2012.

- Velocidad media por hora de transporte: Se ha tomado un supuesto de 60 Km/hora.

Además, los costes de transporte se realizan teniendo en cuenta una distancia máxima dentro del territorio nacional. Se han identificado fuentes de residuo de poliuretano gris y blanco, así como de poliamida. De forma estimada, la distancia máxima entre puntos, y calculada por distancia entre capitales de provincia, es de 650 km. Al tratarse del único factor que depende de una variable, de forma adicional se ha realizado un estudio del punto de equilibrio en caso de tener que transportar el residuo, es decir, cuál sería la distancia a la que se debería encontrar el residuo para que el nuevo material fuese rentable.

10.2.3.1 Estudio de coste de transporte de los residuos

A continuación se detalla el modelo de cálculo de costes de transporte, tanto para 1 Km, como para una distancia de 650 Km.

Costes de transporte poliuretano gris	
Capacidad de transporte poliuretano gris	
Camión capacidad	108,00 m ³
Densidad poliuretano gris	68,00 Kg/m ³
Capacidad total de transporte	7.344,00 Kg/camión
Costes asociados al transporte	
Coste/km vehículo	1,80 €
Coste persona	20,00 €/hora
Distancia recorrida hora	60,00 km
Coste Total Km	2,13 €/Camión
Coste de transporte de 1 Tn por Km	0,2905 € Tn/Km
Coste transporte distancia máxima, 1 Tn	188,82 €

El transporte de 1 Tn de poliuretano gris tiene un coste de 0,2905 €/Km, mientras que para 650 km asciende a 188,82€.

A continuación se detalla el coste de transporte del poliuretano blanco.

Costes de transporte poliuretano blanco	
Capacidad de transporte poliuretano blanco	
Camión capacidad	108,00 m ³
Densidad Poliuretano Blanco	78,00 Kg/m ³
Capacidad Total de transporte	8424,00 Kg/camión
Costes asociados al transporte	
Coste/ km vehículo	1,80 €
Coste persona	20,00 €/hora
Distancia recorrida hora	60,00 km
Coste Total Km	2,13 €/Camión
Coste de transporte de 1 Tn por Km	0,2532 € Tn/Km
Coste transporte distancia máxima, 1 Tn	164,61 €

Como el poliuretano blanco tiene mayor densidad que el poliuretano gris, el coste del transporte en este caso disminuye hasta 0,253 €/Km y Tn transportada, mientras que si la distancia es de 650 Km, el coste asciende a 164,61 €.

De forma similar, se ha determinado el coste de transporte de los residuos de poliamida. Su densidad es mayor que la de los poliuretanos, por lo que la ventaja económica es en este caso mayor, siendo de 0,0366 €/Km y Tn y de 23,78 € por tonelada transportada a 650 Km.

Costes de transporte poliamida

Capacidad de transporte poliamida	
Camión capacidad	108,00 m ³
Densidad poliamida	540,00 Kg/m ³
Capacidad de transporte	58320 Kg
Costes asociados al transporte	
Coste/ km vehículo	1,80 €
Coste persona	20,00 €/hora
Distancia recorrida hora	60,00 km
Coste Total Km	2,13 €
Coste de transporte de 1 Tn por Km	0,0366 € Tn/Km
Coste transporte distancia máxima, 1 Tn	23,78 €

10.2.3.2 *Análisis comparativo del transporte y carga del residuo*

Por tanto, según los resultados obtenidos, y como conclusión a los apartados anteriores, se ha determinado que la densidad es el factor más importante que hace que el coste de transporte difiera sustancialmente entre los diferentes residuos:

- Densidad de la poliamida: 540 Kg/m³.
- Densidad del poliuretano blanco: 78 Kg/m³.
- Densidad del poliuretano gris: 68 Kg/m³.

Si se realiza una comparativa incluyendo los Kg de material que puede transportar un camión tipo de 108 m³, obtendremos como resultado la distribución de la Tabla 10.1.

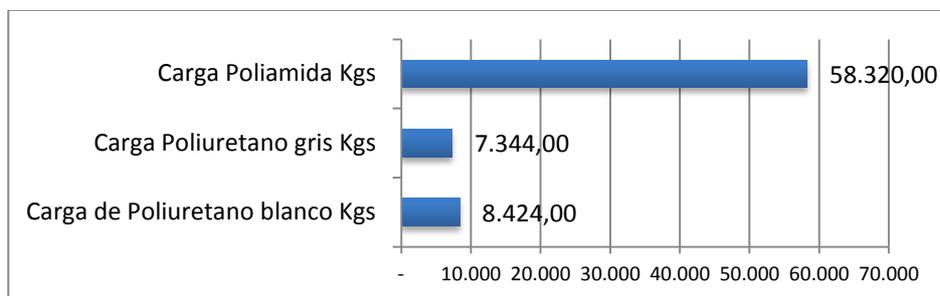


Tabla 10. 1. Comparativa de carga de los diferentes tipos de residuo en un camión de 103 m³

Puede observarse que un mismo camión podrá cargar 58.320 Kg de poliamida frente a 7.344 Kg de poliuretano gris. Este parámetro de carga es uno de los factores que mayor impacto tiene en el transporte, tal y como se puede comprobar en la gráfica de la Figura 10.2.

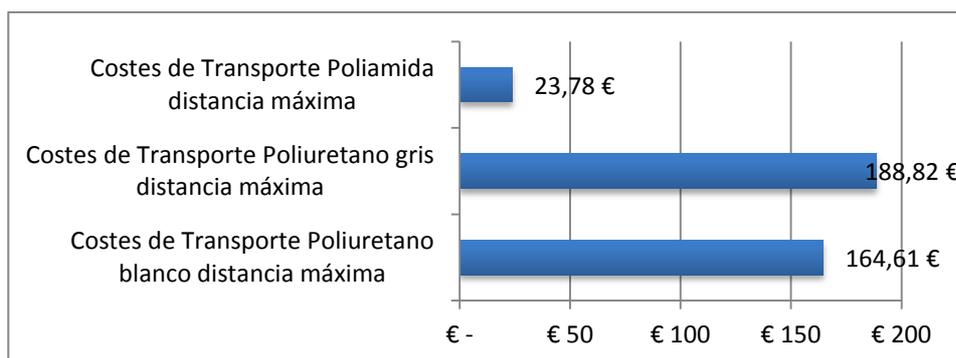


Figura 10. 2. Comparativa de coste de transporte de los diferentes tipos de residuo a una distancia máxima de 650 Km

Como se deduce del análisis del coste de transporte de 1 Tn en el desplazamiento máximo en España de 650 Km, se alcanza un coste de 23,78€ en el caso de la poliamida, frente a los 188,82 € del poliuretano gris.

10.2.4 Estudio analítico comparativo

10.2.4.1 Composición de las mezclas de estudio

En la Figura 10.3 se detallan las proporciones en Kg de las mezclas que definen el coste final de cada uno de los productos.

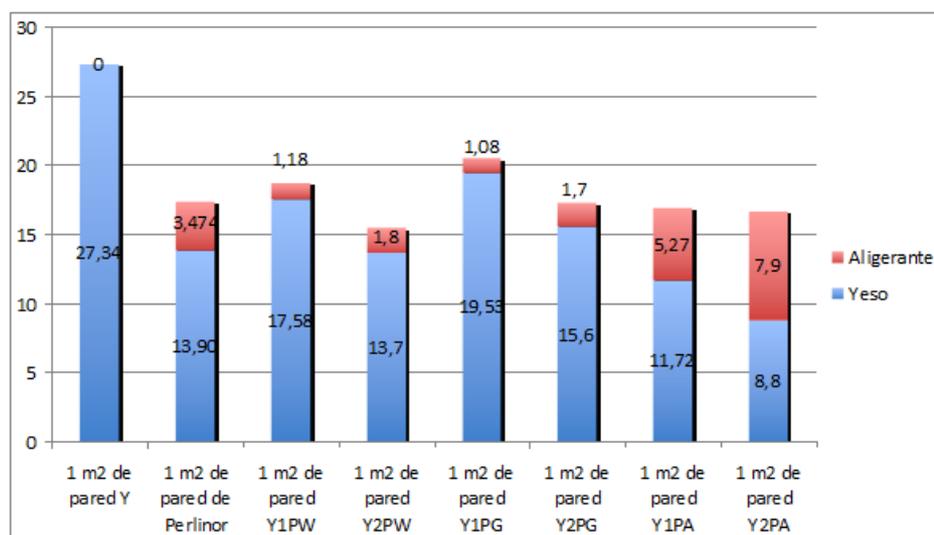


Figura 10. 3. Proporciones de material aligerante y de yeso de cada producto (Kg)

La distribución de los materiales que forman la dosificación tipo 1/1, son los que más cantidad de yeso aportan a la mezcla. El yeso ligero Perlínor contiene más yeso que las mezclas de poliamida y de poliuretano blanco 1/2 (Y2PA y Y2PW).

10.2.4.2 Análisis comparativo del coste de una pared de 1m²

Recogiendo la caracterización de las muestras del apartado anterior, así como el análisis de costes, tanto en la transformación como en el transporte de los diferentes residuos utilizados como aligerante, se obtiene el siguiente resultado comparativo de cada una de las muestras

(Tabla 10.2), donde se ha recogido el caso más desfavorable de aplicación en la Península Ibérica que contempla que el transporte sea a la distancia máxima, es decir, 650 Km.

	Total	Yeso	Aligerante
Coste pared Y	2,734 €	2,734 €	-
Coste pared Perlinor	2,258 €	1,390 €	0,869 €
Coste pared Y1PW	1,987 €	1,758 €	0,229 €
Coste pared Y2PW	1,719 €	1,370 €	0,349 €
Coste pared Y1PG	2,189 €	1,953 €	0,236 €
Coste pared Y2PG	1,931 €	1,560 €	0,371 €
Coste pared Y1PA	1,297 €	1,172 €	0,125 €
Coste pared Y2PA	1,068 €	0,880 €	0,188 €

Tabla 10. 2. Coste total de los materiales que componen cada producto

La gráfica de la Figura 10.4 representa los valores obtenidos anteriormente.

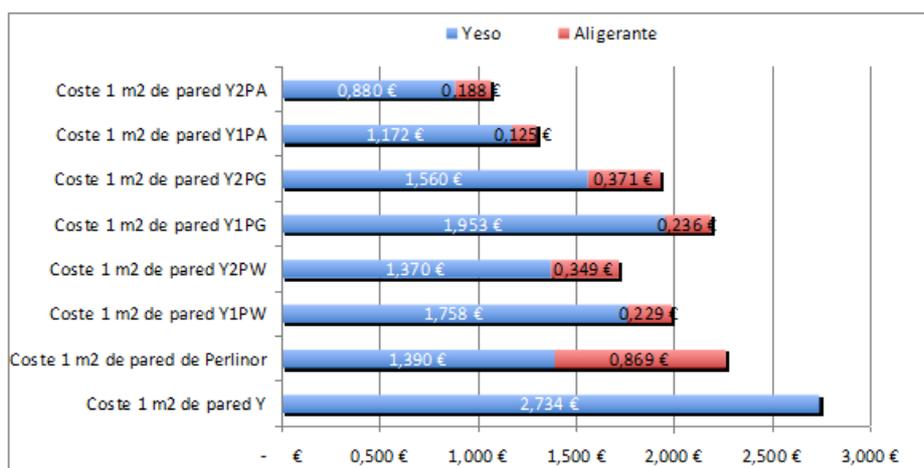


Figura 10. 4. Coste de fabricación de una pared de 1 m² para las diferentes mezclas

De los valores obtenidos se extrae como primera conclusión que el material de mayor coste es el yeso sin agregados, seguido del yeso Perlinor. A partir de la adición de los polímeros reciclados, el coste se reduce, siendo el más económico el composite fabricado con la relación de yeso/poliamida 1/2 (Y2PA). Aunque en un principio esta dosificación resulta la más económica de las elegidas para el estudio, a efectos prácticos se debería de tener en cuenta además las propiedades físicas y mecánicas. Es decir, resulta necesario alcanzar un equilibrio entre las ventajas económicas y los requerimientos del material para decidir, en cada caso, la mezcla óptima para su puesta en obra.

A continuación, se estima el comportamiento del material final en valor absoluto, trasladando este coste estimado por kilogramo de material (Figura 10.5).

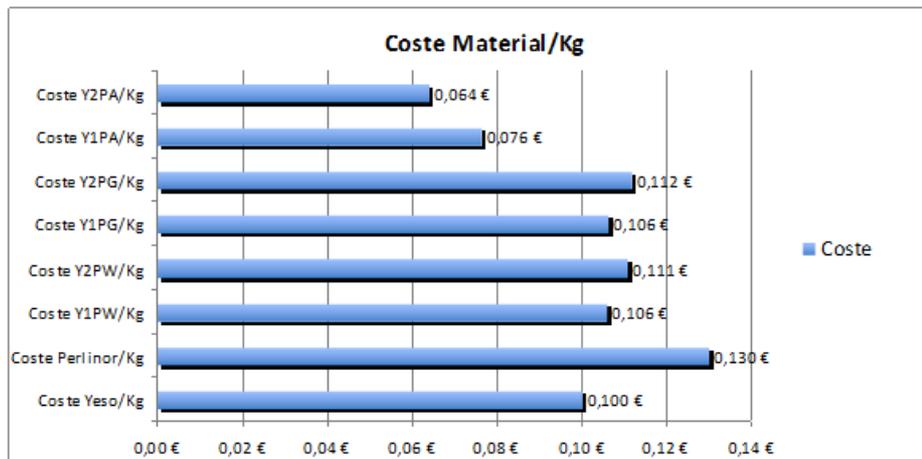


Figura 10. 5. Coste por Kg de mezcla final

10.2.4.3 *Detalle de la distribución del coste del aligerante*

En la Figura 10.6 se desglosa la distribución del coste del aligerante en la mezcla. Existen principalmente dos factores que influyen en este parámetro: la transformación o triturado y el transporte.

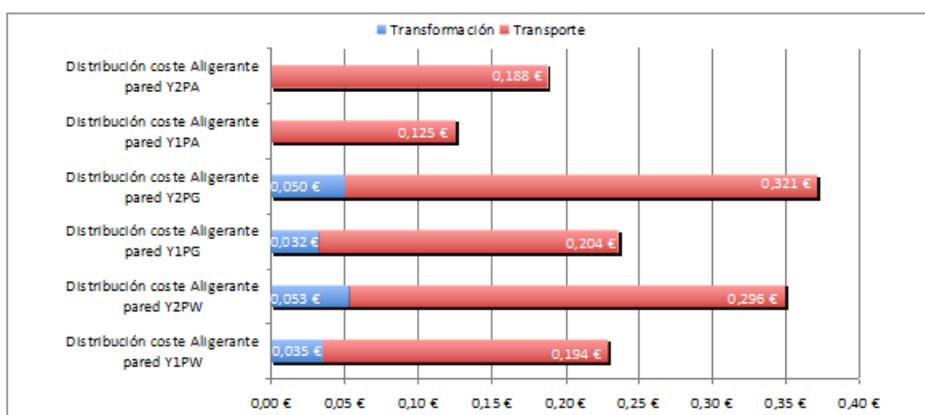


Figura 10. 6. Distribución del coste del aligerante para cada mezcla final

Como ya se ha indicado, la poliamida se encuentra como residuo en polvo y no es necesario realizar un triturado previo, por lo que no tiene coste de transformación, lo que abarata en gran medida el coste del aligerante y en consecuencia, las dosificaciones que incluyen este polímero.

Además, la poliamida tiene una densidad muy superior al poliuretano, por tanto los costes de transporte resultan más económicos que en el resto de mezclas, como se puede observar en el gráfico de la Figura 10.6.

10.2.4.4 *Cálculo del punto de equilibrio de cada material en base al transporte*

Debido a que el aspecto clave del estudio económico es el coste de transporte del aligerante, resulta importante encontrar el punto de equilibrio, que es el punto en el que el material reciclado deja de ser ventajoso a nivel estrictamente económico.

En la Tabla 10. se puede observar el punto de equilibrio de cada una de las mezclas:

	Pared de Perlinor	Pared de Yeso
Distancia pared Y1PW	1.557,469	3.150,020
Distancia pared Y2PW	1.832,205	2.876,210
Distancia pared Y1PG	871,322	2.388,253
Distancia pared Y2PG	1.312,468	2.276,165
Distancia pared Y1PA	5.634,015	8.102,690
Distancia pared Y2PA	4.768,837	6.415,661

Tabla 10. 3. Puntos de equilibrio de cada mezcla final

En el gráfico de la Figura 10.7 se pueden observar los modelos de distribución de coste en base al desplazamiento de cada una de las mezclas.

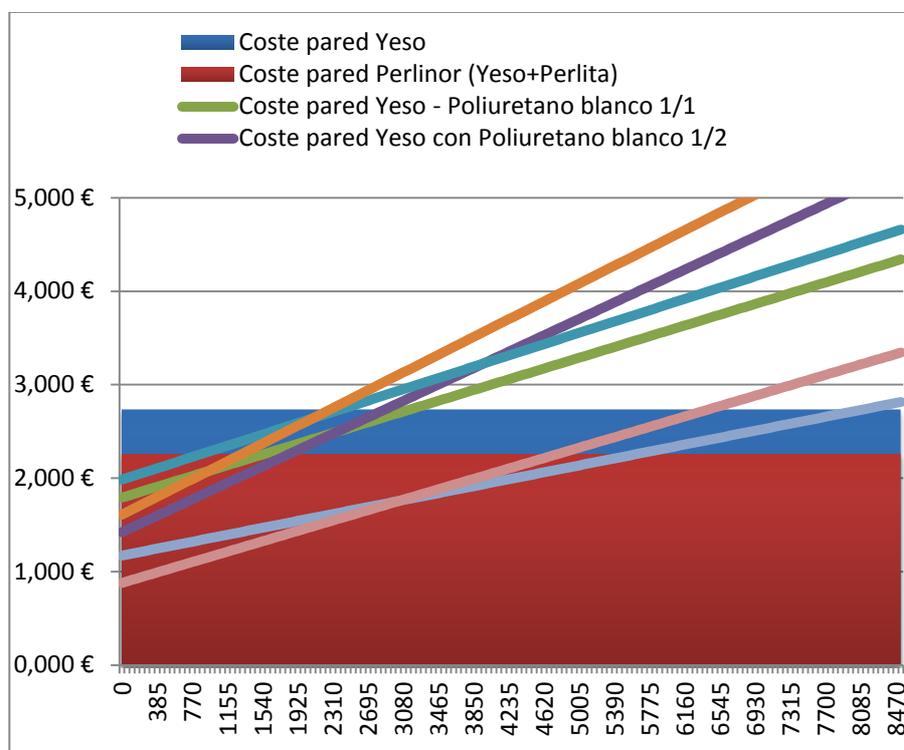


Figura 10. 7. Modelo de distribución en coste versus el desplazamiento de cada mezcla final

10.3 Valoración cualitativa

Tal y como se ha podido extraer de los resultados del estudio analítico, las propuestas de los compuestos reciclados estudiados son viables económicamente por sí solas, sin necesidad de calcular los parámetros enfocados al análisis coste-efectividad. No obstante, se ha completado el estudio con el análisis coste-efectividad, para tener en cuenta todas las variables.

10.3.1 Gestión del residuo

En este apartado, y aunque inicialmente y para simplificar, se ha indicado que los residuos se envían a vertedero, se ha considerado que

la gestión de estos residuos tiene un coste de transporte y de desecho del residuo. Por lo tanto, de forma adicional, se ha incluido este beneficio asociado al ahorro.

En la actualidad, el coste del residuo es asumido por las principales empresas generadoras del mismo, en el que se incluyen como sectores principales el de la automoción y construcción. Este coste de gestión es de aproximadamente 65 € por tonelada de residuo de poliuretano¹⁴² Si lo aplicamos a cada uno de los materiales, podríamos incluir un beneficio adicional.

Aunque los yesos aligerados con poliamida sean los más atractivos en cuanto a su precio final, el residuo de poliamida es un desecho que en la actualidad tiene diferentes opciones en el reciclaje por su alto valor añadido, por lo que su oferta y disponibilidad es muy inferior a los poliuretanos.

Tomando como referencia 1m² de pared, el ahorro estimado no sería inferior a 0,065 €/Kg. En la Tabla 10.8 de productos se muestra el ahorro adicional sobre el precio final de cada uno de los materiales.

1 m ² Yeso con poliuretano blanco 1/1	0,08 €
1 m ² Yeso con poliuretano blanco 1/2	0,12 €
1 m ² Yeso con poliuretano gris 1/1	0,07 €
1 m ² Yeso con poliuretano gris 1/2	0,11 €

Figura 10. 8. Ahorro adicional de cada mezcla final

Por el contrario, también habría que tener en cuenta una tasa de gestión de desecho del aligerante, en el caso de que la construcción,

¹⁴² Grupo Antolín, S.A. Datos de la gestión del residuo en vertedero.

donde se incluya el nuevo material, se demoliese o la pared fuese derribada. Si se atiende a tasas similares aplicadas en embalajes, el resultado no es significativo en el estudio del coste, y en el peor de los casos, sería similar al desecho del material en origen. Por lo tanto, su impacto final no debería ser negativo.

10.3.2 Beneficio medioambiental de los nuevos materiales

Los sectores potencialmente beneficiarios de los resultados de investigación obtenidos son el de la construcción y edificación, incluyendo a los fabricantes de yeso de construcción, escayolas y transformados de yeso.

Aunque la coyuntura económica actual podría indicar que en esta época de recesión el sector no puede asumir nuevas inversiones en I+D, se trata de un condicionante *a priori* favorable, ya que este tipo de empresas se ven obligadas a crecer en competitividad y en facilitar nuevos materiales de construcción más eficientes, que permitan diferenciarse por el valor añadido del producto. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que España es el segundo país europeo productor de yeso y por tanto, plantea la oportunidad para desarrollar comercialmente los resultados obtenidos.

En España se producen del orden de 7 millones de toneladas de yeso, de los cuales el 60% corresponde a la fabricación de productos con destino final al sector de la construcción. De la misma manera y aunque de forma estimada, ya que no existen datos reales publicados, se calcula que se generan aproximadamente más de 472.000 toneladas de residuo de espuma de polímero al año en España.

La investigación en nuevos materiales permitiría sustituir entre un 33% y un 80% de yeso por los residuos poliméricos, lo que supondría que en el mercado español se podría reutilizar casi el total del excedente de este tipo de compuestos.

En España, Iberyeso y Uralita-Platres Lafarge suman un 85% de la cuota de mercado. El 15% restante es asumido por la empresa burgalesa Yesos Albi. De acuerdo con los datos que se manejan en la actualidad, podría afirmarse que, potencialmente hasta el 6,3% de la producción podría ser sustituida por materiales de desecho.

Otro factor importante, y de fuerte impacto, vendría dado por la reducción de coste de fabricación del nuevo material, debido por un lado, al abaratamiento del coste de la materia prima, al poder sustituir un material que como recurso natural es limitado, por un residuo generado. Por otro lado, por la obtención de materiales más eficientes que mejoran las propiedades de los ya existentes.

Por estos motivos, la reutilización de los subproductos de la industria y su aprovechamiento en la obtención de otros bienes y servicios es una forma de contribuir activamente al desarrollo del crecimiento sostenible y respetuoso con el medio natural, lo que implica desarrollar políticas de apoyo e incentivo orientadas al reciclaje y reutilización de los residuos industriales, como el caso de los residuos poliméricos.

10.4 Conclusiones

Como resumen de este apartado del Estudio Coste-Efectividad de los nuevos materiales, podemos concluir que:

1. Los materiales aligerantes de residuo polimérico, para su uso en la Península Ibérica, son económicamente viables, ya que en el caso más desfavorable de desplazamiento, el material sigue siendo económicamente rentable.
2. Se ha determinado que las mezclas no son solo viables económicamente sino también a nivel de mercado, como producto comercial, ya que existe suficiente producción de residuos para cubrir una demanda sostenible y moderada de estos nuevos materiales.
3. El beneficio real del producto, basado en el análisis coste-efectividad, supera el beneficio económico estimado ya que, de forma adicional, los diferentes productos planteados abren la posibilidad de moderar el consumo de un recurso natural limitado como es el yeso, así como dar solución a un problema cada vez mayor como es la gestión de un material de difícil reciclado, como es el caso del poliuretano.

**Capítulo XI: Conclusiones
finales y líneas de investigación
de futuro.**

11 Conclusiones finales y líneas de investigación de futuro

11.1 Conclusiones finales

A continuación, se resumen las conclusiones finales que se pueden extraer del trabajo de investigación desarrollado, de acuerdo con los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral.

El procedimiento experimental desarrollado en este trabajo propone composiciones de yeso-polímero viables y con la posibilidad efectiva de su utilización como conglomerados en construcción. Los resultados han permitido extraer numerosas conclusiones específicas, que se detallan en los apartados siguientes.

En relación a las mezclas de yeso-poliuretano

1. Se ha llevado a cabo la fabricación y caracterización de yesos aligerados con buena calidad de una manera sencilla y acorde a la normativa vigente, a partir de la incorporación progresiva de dos poliuretanos espumados reciclados triturados. Como base de estos resultados, se puede establecer que la cantidad de espuma polimérica presente en la composición, es el factor más importante a la hora de explicar la variación en las propiedades de estos compuestos.

2. Acorde a este parámetro, se ha establecido que la cantidad de agua necesaria para una consistencia adecuada aumenta con el porcentaje de espuma de poliuretano añadida aunque, por otro lado, este incremento de agua favorece en gran medida el tiempo de trabajabilidad de las muestras. Es decir, no sólo lo mantiene, sino que mejora el tiempo que transcurre antes de llegar al principio de fraguado.
3. A pesar de que la inclusión de poliuretano significa una reducción progresiva y muy importante de la densidad, con un aumento en la porosidad que significa una disminución de resistencias importante, las dosificaciones Y2PW, Y1PW, Y0,5PW, Y1PG y Y0,5PG, cumplen el mínimo requerido por la norma, de 1,0 MPa de resistencia a flexión y 2,0 MPa a compresión.
4. En cuanto a la adherencia, si bien es cierto que numéricamente el valor disminuye con el porcentaje de polímero, el tipo de rotura es adecuado y siempre se produce por cohesión, por lo que habría que buscar una situación de compromiso entre la pérdida de adherencia y el porcentaje de adición de poliuretano.
5. La conductividad térmica se ve reducida hasta en un 66% frente a la del yeso referencia, lo que sugiere su empleo como material aislante térmico de uso en revestimientos y/o placas prefabricadas. Además, su comportamiento térmico frente a ensayos de TGA indica que la degradación del material sólo se produce a temperaturas elevadas, y que la inclusión de poliuretano no influye ni disminuye la resistencia al calor inicial del yeso.

6. En cuanto a los parámetros reológicos, un contenido cada vez mayor de poliuretano ejerce una fuerte interacción entre las partículas del material, lo que incrementa los valores de esfuerzo de cizalla umbral y la viscosidad plástica, ejerciendo un menor efecto fluidificante que se ve reflejado en los resultados de fluidez de la pasta.

En relación a las mezclas de yeso-poliamida

7. Se ha determinado que la incorporación de poliamida incrementa la relación agua/(yeso+PA) necesaria para obtener una buena trabajabilidad, lo que repercute en el tiempo de fraguado, que también aumenta.
8. Por otro lado, respecto de la suma total de materiales, la cantidad de agua añadida disminuye, lo que unido al hecho de que la poliamida se acomoda dentro de los huecos que existen entre los cristales de yeso, significa una reducción en la porosidad total del material. Por el contrario, la densidad disminuye debido a que se va sustituyendo yeso por un polímero de menos peso por unidad de volumen.
9. Existe una buena correlación entre la resistencia a flexión y a compresión, lo que nos da una idea de las cantidades de poliamida adecuadas que se podrían utilizar para cumplir con la normativa. Aunque las resistencias disminuyen con la inclusión de polímero, esto no repercute en la zona interfacial de transición entre la pasta de yeso y la poliamida, que muestra una buena compatibilidad.
10. Existe una relación directa entre la microestructura porosa y la permeabilidad al vapor de agua de las muestras, de tal manera que

la poliamida produce un aumento en el diámetro de poro, una reducción de los capilares grandes y un aumento de los capilares medianos que se traduce en un aumento de la permeabilidad al vapor de agua. En contraste, el efecto se invierte para las dosificaciones con gran cantidad de polímero, probablemente debido al efecto de llenado de las partículas de poliamida en los capilares interconectados que reducen el diámetro crítico de poro.

11. Se ha demostrado que un mayor contenido de poliamida mejora significativamente la resistencia térmica del material. Esta mejora está estrechamente ligada a la disminución de la densidad. Los valores obtenidos son comparables a los de otros materiales de construcción empleados con fines de aislamiento térmico.
12. Existe una buena correlación entre el parámetro de fluidez y el de viscosidad plástica que nos permite establecer una relación entre ambos parámetros. Un incremento cada vez mayor de poliamida induce a una mayor viscosidad, generando a su vez un menor esfuerzo de cizalla umbral.

En relación a las mezclas con aditivos

13. El aditivo que mejor se comporta en combinación con las mezclas de yeso con poliuretano es el superfluidificante a base de melaminas, Sikamix, mientras que el aditivo que se comporta de manera más adecuada en combinación con las mezclas de yeso con poliamida es el superfluidificante basado en policarboxilatos, Viscocrete.
14. Ambos aditivos consiguen aumentos en la dureza superficial Shore C, mejoras de las resistencias mecánicas, reducciones en las

relaciones agua/yeso+polímero, reducciones en la densidad aparente seca, un aumento de la adherencia y disminuciones de la absorción por capilaridad y de la permeabilidad al vapor de agua. Todas estas mejoras se basan en la reducción de la porosidad debido a la reducción en la relación agua/conglomerante que induce el aditivo.

15. Los aditivos superplastificantes influyen en los parámetros reológicos de las mezclas de yeso con residuo polimérico, reduciendo el esfuerzo de cizalla umbral y la viscosidad plástica y aumentando la fluidez de la pasta. A medida que la sustitución de yeso por polímero es mayor, el efecto del aditivo se ve reducido, debido a que se dificulta su absorción por parte de las partículas de polímero.

En relación al Estudio económico

16. El estudio económico realizado para comparar las ventajas competitivas de la utilización de residuos polimérico de poliuretano y poliamida en la fabricación de yesos aligerados ha resultado satisfactorio, mostrando en todos los casos estudiados, un precio más competitivo que el de los yesos aligerados con materiales tradicionales. El precio final del material es especialmente sensible al coste del transporte del residuo al lugar de consumo.

Por tanto, se ha logrado ofrecer un grupo de propuestas concretas para la reutilización de los residuos de poliuretano y poliamida evitando su abandono en el vertedero, aprovechando las propiedades ventajosas de estos materiales poliméricos cuando se incorporan a una matriz de yeso

para formar materiales compuestos. De esta manera, las dosificaciones de las mezclas que cumplen con los requerimientos mínimos exigidos en normativa son:

- a. Yeso-Poliuretano gris: Y0,5PG; Y1PG; Y2PG0,8M y Y2PG0,8M1F1.
- b. Yeso-Poliuretano blanco: Y0,5PW; Y1PW; Y2PW0,8M y Y2PW0,8M1F1.
- c. Yeso-Poliamida: Y0,5PA; Y1PA; Y2PA0,8V y Y2PA0,8V1F1.

11.2 Líneas de investigación de futuro

Como consecuencia de la investigación realizada y de las conclusiones obtenidas, se proponen las siguientes líneas de trabajo para proyectos futuros:

1. La investigación realizada ha tomado como referencia para el estudio un yeso de construcción B1. Sería conveniente estudiar el comportamiento y compatibilidad de los residuos de poliuretano y poliamida con otro tipo de yesos, como los yesos de uso directo y posterior procesado tipo A.
2. Este estudio se puede derivar a la utilización de otro tipo de residuos poliméricos para utilizarlas como agregado ligero en composiciones de yeso. Se propone la utilización de un residuo procedente de la industria del automóvil que incluye en su composición mezcla de materiales que forman el techo de un vehículo (fibra de vidrio, celulosa y espuma de poliuretano).

3. Una oportunidad de aplicación directa de las mezclas óptimas obtenidas en este trabajo de investigación sería la fabricación de materiales prefabricados utilizados en particiones a base de elementos de yeso/escayola.
4. Con el objetivo de optimizar las propiedades de mezclas que incluyan mayores proporciones de residuo en su composición, se plantea el empleo de otro tipo de aditivos o fibras de refuerzo diferentes a los que se han dosificado en esta Tesis Doctoral
5. Siguiendo el criterio por mejorar las propiedades de las mezclas, se propone el análisis del comportamiento de los residuos de poliuretano y de poliamida cuando se utilizan metodologías de recubrimiento para reforzar las mezclas, por ejemplo mediante inmersión y posterior polimerización en disoluciones de monómeros de naturaleza hidrofugante, como por ejemplo la inmersión en metilmetacrilato de metilo (MMA) y peróxido de benzoilo.
6. Una vía abierta a la investigación es el estudio en profundidad de nuevas características fundamentales que deben poseer los aligerados de yeso con polímeros en cuanto al comportamiento ante el fuego, con el objeto de conocer la influencia de los residuos de poliuretano y de poliamida en estas propiedades.
7. Por último, se propone la utilización de los residuos de polímeros como posibles cargas en la preparación de otros conglomerantes como son los morteros y hormigones aligerados, o de aglomerantes como los hormigones bituminosos o los pavimentos asfálticos fundidos.

Apéndice

Producción científica directamente relacionada con esta Tesis Doctoral

Artículos internacionales

Título: “Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes”

Revista: Construction & Building Materials

Autores: S. Gutiérrez-González, MM. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón

Estado: publicado; 38 (2013):407-412

Título: “Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties”

Revista: Construction & Building Materials

Autores: S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, MT. Blanco Varela, V. Calderón.

Estado: publicado; 34 (2012):179-185

Título: “Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes”

Revista: Construction & Building Materials

Autores: S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco, V. Calderón.

Estado: publicado; 28 (2012):653-658

Patentes de invención

Descripción de la invención: **“Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuo de poliamida en polvo”**

Inventores: Sara Gutiérrez González, Jesús Gadea Sáinz, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Carlos Junco Petrement, Lourdes Alameda Cuenca-Romero y Sara Serna Avendaño

Entidad depositaria: Universidad de Burgos

Nº Solicitud: **P201100886 (Agosto 2011)**

Informe de Estado de la Técnica (IET): favorable, con examen previo en proceso

Descripción de la invención: **“Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado”**

Inventores: Jesús Gadea Sáinz, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Sara Gutiérrez González, Javier Garabito López y Pablo Luis Campos de la Fuente

Entidad depositaria: Universidad de Burgos

Nº Solicitud: **P201001011 (Agosto 2010)**

Informe de Estado de la Técnica (IET): favorable

Proyectos de investigación

Título: **“Yesos aligerados con espumas rígidas de poliuretano reciclado”**

Acrónimo: YESA. MQM-20110220

Participantes: Verónica Calderón, Sara Gutiérrez-González, Jesús Gadea, Ángel Rodríguez

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

Año: 2011

Subvención concedida: 30.000 €

Congresos nacionales e internacionales

Título de la comunicación: **“Effect of the polyamide powder waste addition in mortar plaster blends and its influences in pore structure and thermal properties”**

Autores: S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón

Evento: ASPIC 2012. “7th Asian Symposium on Polymers in Concrete”

Entidad organizadora: Istanbul Technical University. Faculty of Civil Engineering

Lugar y fecha: Estambul, Turquía. Octubre, 2012

Título de la comunicación: **“Lightweight conglomerates made with recycled polymer foam”**

Autores: V. Calderón, J. Gadea, S. Gutiérrez-González, A. Rodríguez, A. Martín

Evento: Second International Conference on Recycling and Reuse of Materials

Entidad organizadora: Centre of Nanoscience & Nanotechnology Mahatma Gandhi Univerity

Lugar y fecha: Kottayam, Kerala (India). Agosto, 2011

Título de la comunicación: **“Obtención de materiales aligerados modificados con polímeros de estructura celular”**

Autores: Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez González, Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Yésica Pardo Delgado, Sara Serna Avendaño, Jesús Gadea Sáinz, Ángel Rodríguez Sáiz, Aitor Martín de la Fuente y Carlos Junco Petrement

Evento: XVI Jornadas Hispano-Francesas de Química Orgánica

Entidad organizadora: Universidad de Burgos

Lugar y fecha: Burgos (España). Junio, 2011

Producción científica indirectamente relacionada con esta Tesis Doctoral

Artículos internacionales

Título: **“Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam”**

Revista: Cement and Concrete Composites

Autores: C. Junco, J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón

Estado: publicado; 34 (2012):1174-1179

Patentes de invención

Descripción de la invención: **“Procedimiento de obtención de yeso de construcción con residuo de escorias blancas de horno cuchara”**

Inventores: Ángel Rodríguez Sáiz, Juan Manuel Manso Villalaín, Jesús Gadea Sáinz, Sara Gutiérrez González, Carlos Junco Petrement y Verónica Calderón Carpintero

Entidad depositaria: Universidad de Burgos

Nº Solicitud: **P201200092 (Febrero 2012)**

Informe de Estado de la Técnica (IET): *en revisión*

Descripción de la invención: **“Procedimiento de obtención de morteros aligerados con poliamida en polvo reciclada”**

Inventores: Jesús Gadea Sáinz, Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez González, Yésica Pardo Delgado, Ángel Rodríguez Sáiz y Aitor Martín de la Fuente

Entidad depositaria: Universidad de Burgos

Nº Solicitud: **P201100664 (Junio 2011)**

Informe de Estado de la Técnica (IET): favorable, con examen previo en proceso

Descripción de la invención: **”Procedimiento de obtención de hormigón bituminoso en caliente con residuos de poliuretano espumado”**

Inventores: Sara Gutiérrez González, Jesús Gadea Sáinz, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Aitor Martín de la Fuente y Pablo Luis Campos de la Fuente

Entidad depositaria: Universidad de Burgos

Nº Solicitud: **P201100023 (Enero 2011)**

Informe de Estado de la Técnica (IET): favorable

Proyectos de investigación

Título: **”Estudio de nuevos conglomerados de cemento, de altas prestaciones, mediante adición de espumas rígidas de poliuretano”**

Acrónimo: CONPOL

Participantes: Verónica Calderón, Sara Gutiérrez-González, Jesús Gadea, Ángel Rodríguez

Entidad financiadora: Ministerio de Economía y Competitividad. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

Año: 2010

Subvención concedida: 45.000 €

