



TESIS DOCTORAL

“Caracterización de un Mortero Polimérico con resina de poliéster insaturado y árido de albero para su aplicación en construcción”

Realizada por Carmen Galán Marín, bajo la dirección del Doctor D. Manuel Olivares Santiago.

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Universidad de Sevilla, 2001.

A Jose, a Carmen,
por el tiempo que nos vamos a dedicar

Agradecimientos

Por suerte hay muchas personas a las que debo agradecer la realización y conclusión de este trabajo:

A mi director de tesis, Manuel Olivares Santiago, cuya confianza, interés y apoyo en el trabajo realizado va más allá de las obligaciones exigibles a un Director de Tesis. Pese a las numerosas e importantes obligaciones académicas e institucionales que ha tenido en estos últimos años, siempre ha encontrado tiempo que dedicarme.

A todo el personal del laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Carlos Rivera, José Luis Rojas y Domingo Delgado, que se embarcaron conmigo en una experimentación con nuevos materiales que ha resultado ser novedosa por muchos otros motivos; gracias por su apoyo técnico y humano, gracias por las horas que hemos pasado juntos y por la paciencia que habéis demostrado conmigo todo este tiempo.

A los alumnos (algunos de ellos quizás ya arquitectos) que con su trabajo hicieron posible la fase más ardua de esta investigación: la fabricación de las probetas.

A Reyes Rodríguez no es suficiente con dedicarle un párrafo aparte, me siento en deuda con ella por sus valiosas aportaciones en este trabajo: su punto de vista y apoyo constante ha estado presente en toda la parte experimental de la investigación, desde la programación y dirección de los ensayos hasta las oportunas ideas y críticas surgidas a la vista de los datos obtenidos en los mismos.

También deseo expresar mi agradecimiento a Jesús Barrios, por sus valiosas aportaciones en el desarrollo de los trabajos. Este agradecimiento es extensivo a todos mis compañeros del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, y en especial a Jorge Roa y Fernando Villanueva, que me han descargado de mis tareas docentes durante la última fase de redacción de este documento.

A los investigadores del INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial de Oporto), Antonio Ferreira, Antonio Torres Marques, Cristina Ribeiro, y Casilda Tavares, cuya colaboración y medios han sido fundamentales para una parte de los ensayos experimentales.

A mi familia, que son la causa y el medio para que todo esto pueda llevarse a cabo.

Índice

I.	Estado de la cuestión	1
I.1.	Introducción	3
I.2.	Los ligantes, polímeros sintéticos.	5
I.3.	Los morteros poliméricos o de polímeros. Antecedentes	9
I.4.	Características generales de los PM.....	13
I.4.1.	El proceso de fraguado y endurecimiento en los PM.	16
I.4.2.	Variaciones dimensionales en los PM.	17
I.4.3.	Los morteros poliméricos o de polímeros. Usos estructurales y no estructurales	18
I.5.	Relativo a la fase ligante en los PM.....	21
I.5.1.	Fenoplastos (PF) y aminoplastos (MF, MP y UF).....	24
I.5.2.	Resinas furánicas (FA).....	26
I.5.3.	Resinas epoxi (EP).....	27
I.5.4.	Poliésteres no saturados (UP)	28
I.5.5.	Resinas de metacrilato de metilo (MMA).....	32
I.5.6.	Resinas vinil-éster o de ésteres vinílicos (VE)	34
I.5.7.	Otras resinas.....	35
I.5.8.	Resinas recicladas	37
I.5.9.	Adiciones y aditivos.....	37
I.6.	Relativo a la fase áridos en los PM	41
I.6.1.	El albero	42
I.6.2.	Contenido de humedad en los áridos	47
I.6.3.	Relación árido-ligante.....	49
I.7.	La fase refuerzos en los PM.....	51
II.	Objetivos y metodología.....	53
II.1.	Objetivos e hipótesis de la investigación	55
II.2.	Metodología de los ensayos de caracterización	59
II.3.	Elaboración de mezclas. Fabricación de las probetas	63
II.4.	Durabilidad.....	69

III.	Planteamiento experimental.....	77
III.1.	Elaboración del mortero	79
III.1.1.	La resina	79
III.1.2.	Los áridos	82
III.1.3.	El mortero. Dosificaciones	86
III.1.4.	Denominación de las probetas.....	89
III.1.5.	Fabricación de las probetas	90
III.1.6.	Curado y desencofrado	93
III.1.7.	Normativa y metodología de ensayos	96
III.2.	Propiedades mecánicas: Resistencia a compresión	99
III.2.1.	Introducción	99
III.2.2.	Metodología	100
III.2.3.	Resultados probetas cilíndricas	103
III.2.4.	Resultados probetas prismáticas.....	109
III.2.5.	Discusión de resultados	117
III.3.	Propiedades mecánicas: Resistencia a flexión.....	123
III.3.1.	Introducción	123
III.3.2.	Metodología	124
III.3.3.	Resultados probetas prismáticas.....	125
III.3.4.	Resultados probetas baldosas	134
III.3.5.	Discusión de resultados	135
III.4.	Propiedades mecánicas: Desgaste por abrasión.....	139
III.4.1.	Introducción	139
III.4.2.	Metodología	140
III.4.3.	Resultados	141
III.4.4.	Discusión de resultados	142
III.5.	Propiedades físicas: Densidad real y densidad aparente.	145
III.5.1.	Introducción	145
III.5.2.	Metodología	145
III.5.3.	Resultados	147
III.5.4.	Discusión de resultados	149
III.6.	Propiedades químicas: Resistencia a manchas y ataque de ácidos.....	153
III.6.1.	Introducción	153
III.6.2.	Metodología	154
III.6.3.	Resultados	160
III.6.4.	Discusión de resultados	162
III.7.	Estudio con ultrasonidos.....	165
III.7.1.	Introducción	165
III.7.2.	Metodología	166
III.7.3.	Resultados	170
III.7.4.	Discusión de resultados	178

III.8.	Comportamiento frente al agua: Absorción, succión y secado	181
III.8.1.	Introducción	181
III.8.2.	Absorción libre de agua por inmersión total a presión atmosférica. Metodología	183
III.8.3.	Succión de agua por capilaridad. Metodología.....	184
III.8.4.	Desorción de agua. Metodología	186
III.8.5.	Resultados Absorción	186
III.8.6.	Resultados Succión	191
III.8.7.	Resultados Secado	197
III.8.8.	Discusión de resultados.	199
III.9.	Comportamiento frente al fuego	203
III.9.1.	Introducción	203
III.9.2.	Metodología	204
III.9.3.	Resultados	211
III.9.4.	Discusión de resultados	212
IV.	Análisis de costo	215
IV.1.	Análisis de costo	217
V.	Conclusiones.....	219
V.1.	Conclusiones específicas.....	221
V.2.	Conclusiones generales	229
V.3.	Futuras líneas de investigación	233
VI.	Bibliografía.....	235
VI.1.	Referencias.....	237
VI.2.	Otra bibliografía consultada.....	251

I. ESTADO DE LA CUESTIÓN

I.1. INTRODUCCIÓN

La palabra polímero deriva de las palabras griegas *poli* que significa mucho, y *mero*, que significa parte. Esto es así porque las moléculas de polímeros están construidas a base de la repetición de pequeñas unidades químicas. Los polímeros también son llamados macromoléculas porque sus moléculas son mucho mayores que las de cualquier otro material. Hasta los años 20 del siglo pasado no fue conocida por los científicos y aceptada la estructura macromolecular de los polímeros. Estos se clasifican en materiales naturales y sintéticos. La madera, el asfalto, la piel, etc., son polímeros naturales, mientras que los plásticos, nylon, elástomeros, etc. son polímeros sintéticos.

La ciencia de los polímeros ha revolucionado muchos de los conceptos tradicionales de la ciencia de los materiales. Habitualmente, para un material natural se estudian en primer lugar su estructura y propiedades, modificando después su forma física para satisfacer unas determinadas necesidades. La ciencia de los polímeros hace posible cambiar la composición química de un material sintético para producir un material con las propiedades requeridas.

El uso y consumo de elementos constructivos que se fabrican con plásticos, parcial o totalmente, es creciente. Una de las aplicaciones de mayor interés es su utilización como componente en morteros y hormigones, que se denominan por ello hormigones y morteros polímeros o poliméricos, también conocidos como PC o PM, términos abreviados de su denominación técnica (*Polymer Concrete / Polymer Mortar*) en lengua inglesa.

De un especial mortero polímero, donde se utiliza como ligante una resina de poliéster insaturado para conglomerar un árido preparado con arena de la roca albero de Alcalá de Guadaira (Sevilla) se va a tratar en este trabajo.

I.2. LOS LIGANTES, POLÍMEROS SINTÉTICOS.

Desde hace siglos se conocen sustancias naturales con estructura polímera, utilizándose muchas de éstas como ligantes o aglomerantes. En la Biblia, por ejemplo, se cita el empleo del betún en la construcción de la Torre de Babel. El ámbar era conocido de los antiguos griegos y el *mastic* de goma era conocido por los romanos.

En la naturaleza, aparte de polímeros orgánicos naturales como los citados, existen otros, como los que forman parte de las estructuras y esqueletos de plantas y animales, como es el caso de la celulosa en las maderas, y las cadenas polímeras de aminoácidos del ADN.

Pero también, en las estructuras básicas de muchas rocas, y especialmente en las formadas con silicatos, aparecen formaciones minerales con grandes moléculas de sustancias inorgánicas, que son realmente polímeros.

Desde mediados del S. XIX, con el desarrollo de las Ciencias Químicas, se valoran las singulares propiedades de los polímeros naturales y se acuñan los términos de coloide y coloidal, para denominar a estos tipos de materiales y a los polímeros orgánicos que comienzan a sintetizarse, diferenciando un “nuevo estado” de la materia junto a los clásicos de gas, líquido y sólido.

En estos años se inventa también un nuevo material de construcción: el cemento portland. Los componentes del clínker de cemento portland, como se descubre posteriormente, se forman con unos silicatos y ferroaluminatos cálcicos artificiales, que al reaccionar con agua a temperatura ambiente, originan unos hidratos inorgánicos con unas estructuras polímeras: silicatos y aluminatos de cal hidratados.

Los primeros polímeros sintéticos de naturaleza orgánica se denominaron “plásticos”, y aunque fueron numerosos los que se descubren o inventan en la misma época que el cemento portland, y casi todos antes del siglo XX, quedan como materiales de laboratorio más tiempo que el conglomerante portland. Tendrá que pasar casi medio siglo para que estos materiales sintéticos se produzcan y consuman industrialmente.

Hasta los años 40 apenas hay disponibles “materiales plásticos” en el mercado, ya que sólo están industrializados y comercializados algunos compuestos fenólicos tipo “baquelita”, con características de duroplastos, y algunos termoplastos como el “plexiglás”, PVC, PE y PS. Sin embargo, fuera de instalaciones especiales, estos “nuevos materiales” presentan ciertas dificultades para su preparación y moldeo, ya que exigen la aplicación de altas presiones y temperaturas, condiciones difíciles de conseguir fuera de instalaciones industriales o de laboratorios especializados.

En concreto, se puede decir que es a partir de 1945 cuando comienzan a fabricarse industrialmente estos “nuevos materiales plásticos”, en producciones crecientes (Bilurbina, 1990). Dentro de la construcción comienza también el uso y desarrollo del consumo de “plásticos”, tanto como materiales nuevos individualizados o como mejoras de otros materiales de construcción ya convencionales.

Ya desde las primeras investigaciones se aprecian las múltiples posibilidades constructivas de estos materiales, aunque aun hay que esperar algunos años para encontrar proyectos como los de los arquitectos S. Bunton y T.W. Kennedy los cuales, para la *Building Plastic Research Corporation* de Glasgow presentan propuestas de uso de paneles en los que se emplean plásticos sintéticos para construcciones rápidas en tipos flexibles de viviendas tras la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, hasta 1955 no se puede decir que los arquitectos admitan más decididamente las posibilidades arquitectónicas de los plásticos, cuando un equipo formado por Schein y otros, idean una vivienda en la que se emplearon “materiales plásticos”, basada en el desarrollo de una concha de caracol, que permitían la ampliación de la misma, es decir, que podía crecer a la vez que la familia ocupante, (Quarmby, 1974).

En aquellos años había que resolver muchos problemas técnicos, además de los puramente arquitectónicos y proyectuales. Todavía los plásticos no estaban totalmente aceptados en la industria y en la ingeniería, por lo que no es de extrañar que para la mayoría de los arquitectos de la época resultase muy difícil imaginar viviendas estables de plástico. Las únicas aplicaciones a base de plásticos reforzados con fibras (FRP, del

inglés *Fiber Reinforced Plastic*) conocidas hasta entonces eran unos prototipos de pequeñas embarcaciones. En definitiva, se trataba de los primeros composites, aunque no se denominasen así todavía.

Llama la atención la coincidencia en las distintas realizaciones constructivas pioneras tanto para morteros y hormigones como para composites. En ambos casos son siempre embarcaciones: la barca de Lambot de ferrocemento, los navíos de hormigón proyectado y las citadas embarcaciones de FRP.

I.3. LOS MORTEROS POLIMÉRICOS O DE POLÍMEROS. ANTECEDENTES

Entre los años 1950 y 1960 se empiezan a preparar y a utilizar industrialmente como materiales de construcción los primeros morteros y hormigones con diversos polímeros sintéticos, de naturaleza orgánica.

En la antigua URSS, se inicia la preparación y utilización de hormigones y morteros polímeros, atendiendo a las recomendaciones de un informe redactado en el NHZhB, (Davydov, 1958) uno de los Institutos de la Academia Soviética de Construcción y Arquitectura. A partir de la publicación del citado informe, en la URSS se aprecia un claro desarrollo de los morteros y hormigones con polímeros, aunque especialmente como material anti-abrasión y anticorrosión en obras de ingeniería, como presas para defensa contra avalanchas de nieve y otras obras hidráulicas. En ellas los hormigones a base de resinas furánicas llegaron a sustituir, con ventajas técnicas y económicas, a placas protectoras de acero que era preciso renovar con mayor frecuencia.

Disponiendo ya de resultados de algunos trabajos sobre varios aspectos de hormigones y morteros de polímeros, se edita una publicación (Gostroi, 1970) donde se dan a conocer los resultados de diversas investigaciones sobre hormigones polímeros, la mayoría de ellos preparados con resinas furánicas como ligantes básicos.

De manera casi simultánea, en el resto del mundo también se conocen, e incluso se utilizan industrialmente, hormigones y morteros con polímeros, aunque no en grandes volúmenes. Así, a mediados de los años 60, en Francia y en los EE.UU. ya se empieza a disponer de resultados sobre hormigones y morteros poliméricos a partir de trabajos pioneros, que despiertan un alto interés y provocan la primera Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayos de Materiales (RILEM, 1967), sobre el empleo de resinas sintéticas en Construcción.

A partir de 1967, en EE.UU. el BNL (*Brookhaven National Laboratory*) en asociación con el USBR (*United States Bureau of Reclamation*) patrocina un equipo de investigadores para realizar un proyecto de varios años de duración. En estos trabajos,

(Sreinberg, 1968-1970; Dikeou 1971-1972), además de ensayar y comprobar la eficacia de diversos procesos técnicos de aplicación de resinas sintéticas polímeras en la mejora de los hormigones convencionales, se preparan y ensayan hormigones no convencionales.

Como consecuencia del desarrollo de los estudios e investigaciones y tecnologías de preparación y utilización de hormigones y morteros con materiales polímeros sintéticos, en el *American Concrete Institute*, (ACI) en 1971, se constituye el Comité 548, “*Polymers in Concrete*” y se celebran diversas reuniones sobre estos temas: (ACI, 1972-1973). Con los primeros acuerdos y trabajos del Comité 548 se edita la ACI SP-40 (1974), donde el hormigón (o mortero) de polímero PC (o PM) se define como “el material que se prepara mezclando un monómero o resina con un árido, y polimerizando o curando la mezcla después de puesta en obra o moldeada”.

Ya en 1970, en España (Arredondo, 1974), investigadores del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, en colaboración con el Instituto del Plástico y Caucho iniciaron trabajos sobre el uso de plásticos para mejorar la calidad de los hormigones mediante su impregnación con resinas.

En los países desarrollados a partir de esta fecha se acrecienta definitivamente un gran interés por la aplicación de las resinas sintéticas en la mejora y ejecución de morteros y hormigones, con tres metodologías básicas que definen unos “nuevos hormigones”:

- hormigones impregnados con polímero, PIC (*Polymer Impregnated Concrete*)
- hormigones de cemento y polímero PCC (*Polymers And Cement Concrete*), y
- hormigones aglomerados sólo con polímero, sin cemento. PC (*Polymer Concrete*)

El Primer Congreso Internacional sobre los Polímeros en el Hormigón ICPC (*International Congress of Polymers in Concrete*) se celebra en Gran Bretaña en 1975, realizándose una revisión del desarrollo alcanzado por los morteros y hormigones de polímeros hasta aquella fecha (Dikeou, 1975), realizándose el mismo congreso

posteriormente, con periodicidad trienal. Asimismo son numerosas las Reuniones, Simposios y Jornadas técnicas relacionadas con la aplicación en Construcción de las resinas sintéticas, que siempre incluyen alguna sección específica para tratar de los morteros y hormigones polímeros más específicamente, una relación casi completa de los cuales se recoge en la bibliografía (C.C.I., 1967-1995).

A partir de mediados los años 70, cuando se comprueban las posibilidades de aplicaciones constructivas de las resinas sintéticas en la preparación de hormigones y morteros poliméricos, se comienzan a escribir y editar obras de mayor o menor extensión sobre el tema junto a obras descriptivas muy generalistas sobre los plásticos y sus aplicaciones constructivas. En estas publicaciones se desarrolla el conocimiento sobre los PC, bien conjuntamente con los PIC y PCC, (ACI, 1974/1981), o más específicamente sobre los PC y sus aplicaciones más concretas (Mikhailov, 1992).

Sucesivamente, además de las ponencias y comunicaciones antes comentadas en Congresos, Simposios y parecidas Reuniones Técnicas, no dejan de aparecer artículos y textos sobre aspectos concretos de los hormigones polímeros, y algunos recogiendo aspectos concretos de la aplicabilidad de estos PC en construcción (Ohama, 1980-1987, Fowler, 1981, Aguado, 1984, Dikeou 1987).

Existen además textos editados que tratan de los plásticos, algunos con una parte importante sobre los duroplastos (Bilurbina, 1990), o en las que sólo se trata de las aplicaciones de los polímeros como materiales de construcción y con fines estructurales (Hollaway, 1993). Otras obras se refieren exclusivamente a algunos de los distintos tipos de duroplastos utilizables para fabricar PM, sean las resinas fenólicas y aminofenólicas (Gould, 1959; Vale, 1964), furánicas, (Delmonte, 1969), las epoxis, (ACI, 1968; Fernández Cánovas, 1981), o sobre los poliésteres no saturados, (Lawrence, 1960; Boeing, 1967).

En varios departamentos de la Universidad de Sevilla se trabaja en la actualidad sobre los morteros polímeros y como consecuencia de ello, el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la E.T.S.I.I., ("Materiales compuestos 95", 1995) y el

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la E.T.S.A., (“Arquimacom’96”, 1996, Arquimacom’98, 1998 y CCC-2001), han organizados reuniones nacionales e internacionales donde se ha tratado de forma parcial o exclusivamente sobre la temática de los materiales compuestos en la Construcción Arquitectónica, incluyendo dentro de estos materiales a los morteros poliméricos.

Así mismo, en la bibliografía más reciente se cuenta, dentro de textos sobre composites, con capítulos que tratan exclusivamente de hormigones y morteros polímeros con la suficiente extensión y el necesario rigor (Martineaux, 1987; Feldman, 1989; Gay, 1991; Hollaway, 1993).

I.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PM.

Las distintas metodologías de aplicación de resinas sintéticas para preparar morteros u hormigones no convencionales se clasifican siguiendo las tres tipologías anteriormente citadas, que originan tres clases de morteros u hormigones:

- El hormigón (mortero) de portland impregnado con un polímero, abreviadamente PIC (*Polymer Impregnated Concrete*), en España también conocidos como HIP (Hormigón impregnado con Polímero).
- El hormigón (mortero) de cemento y polímero, PCC (*Polymer Cement Concrete*), también denominado HCP (Hormigón de cemento y polímero).
- El hormigón o mortero sin cemento, sólo con polímero y áridos, PC (*Polymer Concrete*), también denominado en España HP (Hormigón de polímero).

En la redacción de este trabajo se utilizan las siglas PC y PM para distinguir entre hormigón polímero y mortero polímero, respectivamente. Se suele admitir que entre mortero y hormigón, aparte de los costes, no hay diferenciación en sus características técnicas importantes, aparte de los límites del tamaño máximo de sus áridos (TMA), con una zona fronteriza del intervalo 5 - 10 mm.

Los morteros poliméricos, como es el caso de la presente investigación, son materiales compuestos o composites, realizados mediante la mezcla de un árido mineral y un polímero que actúa como ligante. No contienen cemento y la resina es el único ligante. De hecho las propiedades del composite están muy determinadas por el tipo de monómero utilizado.

Entre las fases constituyentes de los PM se pueden contar una fase ligante o conglomerante, que suele ser una resina sintética de tipo duroplasto. Esta resina, tras polimerizar/endurecer a temperaturas ordinarias, no muy altas, constituye la fase matriz del compuesto PM. Esta fase, que rara vez ocupa un volumen superior al 20%, engloba a una segunda fase de mayor volumen, que actúa a manera de esqueleto estructural

resistente y que en los PM y PC se forma con materiales áridos granulados. Junto a las dos fases indicadas, puede estar presente una tercera fase de refuerzo, constituida con fibras, mallas o barras, metálicas u orgánicas.

Con este criterio de material compuesto se pueden entender igualmente los morteros convencionales de portland, considerando como fase al mortero portland que engloba la fase de áridos gruesos.

A partir de los resultados de diversas investigaciones y ensayos, utilizando algunos datos bibliográficos (Moshchanskii,1971), se han confeccionado las Tablas I y II, en las que se comparan las características de algunos PC con las de un hormigón portland convencional HM-35.

Propiedades y características	Resinas PF	Resinas FA	Resinas UP	Resinas EP	Hormigón HM-35
Densidad en kg/m ³	2200	2000	2100	2100	2350
Compresión en MPa	49-58.8	50	78-157	78-118	35
Retracción lineal %	----	0,5	1,5	0,2	0,01
Porosidad %	10	10	10	10	20
Dilatación lineal: °C x10 ⁶	30	30	30	30	30
Termoestabilidad < °C	160	180	100	120	210

TABLA I: Comparación entre las características físicas y mecánicas de algunos morteros poliméricos y un Hormigón HM-35.

Resistencias químicas relativas (Máximas 10 / Nulas 0)	Resinas PF	Resinas FA	Resinas UP	Resinas EP	Hormigón HM-35
A la intemperie	4	4	5	6	10
En agua	8	7	6	8	10
Frente a los álcalis	2	8	2	10	9
Frente a los ácidos	8	10	8	6	1
Costes relativos	4-5	5-6	9-10	15-16	1

TABLA II: Comparación entre las resistencias químicas de algunos morteros poliméricos y un hormigón HM-35.

El éxito de los PM radica principalmente en los valores de sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. En comparación con los morteros y hormigones de cemento, los PC y PM tienen muchas ventajas (Chawalwala, 1996):

- Alta resistencia a los ataques químicos
- Buenas propiedades mecánicas
- Excelente adherencia a otros hormigones
- Rápido curado
- Alta resistencia a la abrasión y al impacto

Sin embargo algunos autores (Moshchanskii *et al.*, 1971) también han señalado inconvenientes registrados en sus preparaciones de PC con resinas puras sin aditivos y adiciones correctoras, entre los que cabe señalar:

- Una alta deformabilidad en los PC, con valores elevados de retracción, *creep* (fluencia lenta) y cambios volumétricos con las variaciones de la temperatura.
- En algunos casos, una fragilidad relativamente alta.
- No muy altas resistencias frente a la intemperie y los ambientes oxidantes en las formulaciones de resinas fenólicas y furánicas (PF y FA).
- No demasiada resistencia frente a los álcalis, en los morteros con resinas fenólicas y de poliésteres no saturados, (PF y UP).
- Pequeño intervalo de posibilidad de colorido cuando se utilizan resinas fenólicas o furánicas (PF y FA) que originan PC de colores oscuros, casi negros.
- Los costes de los PC resultan relativamente altos: de 4 a 16 veces el de un hormigón convencional

No obstante lo señalado, hay que decir que en el transcurso de los últimos treinta años, el desarrollo del uso de PC y PM ha sido notorio. Actualmente, dentro del mundo de la construcción, quedan pocos escépticos que se resistan a admitir a los PC y PM como unos materiales de construcción con sus propias y excelentes características.

1.4.1. El proceso de fraguado y endurecimiento en los PM.

La mayoría de los materiales duroplastos o termoestables comercializados lo son en fórmulas con dos componentes, monómeros o prepolímeros, generalmente en forma de pasta o líquido muy viscoso. Mediante la combinación de esos componentes se inician y completan los procesos de polimerización que originan las estructuras rígidas, reticuladas, entrecruzadas, características de los mismos.

La combinación de los componentes básicos de los polímeros se inicia con la ayuda de alguna aportación energética, calor, radiación, etc. y/o mediante activadores químicos, empezando así el proceso de polimerización. Conforme van aumentando el número de monómeros que se unen, y agrandándose también el tamaño de las moléculas polímeras, crece el valor de la viscosidad y de la consistencia de la mezcla, incrementándose su redícula, hasta alcanzar unos valores de resistencias mecánicas bastante altos.

En la tecnología de los PM en particular, por analogía con el proceso de hidratación de los morteros y hormigones portland convencionales, las primeras horas del proceso de polimerización se considera su “tiempo de fraguado”, denominándose endurecimiento al tiempo que transcurre desde que se alcanza un cierto valor de consistencia (tiempo final de fraguado) hasta el final del propio proceso de polimerización (Hellerich, 1992).

Numerosos autores han estudiado la influencia de los sistemas de curado, principalmente las condiciones de humedad y duración del mismo. Así por ejemplo, se ha determinado que, para varias formulaciones ensayadas de un hormigón polímero, con matriz de resina de poliéster no saturado (UP) y con carga de carbonato cálcico (1:1 en peso), cuya fase de árido estaba constituida con áridos gruesos de machaqueo (10-20 mm) y con arena silíceo, se alcanzaba a la semana de edad unas resistencias mecánicas de 93,3 MPa a la compresión y 9,8 MPa a tracción (Ohama, 1973). Aunque no parecía influir significativamente la humedad mantenida durante su curado y endurecimiento, sí se registró una clara influencia de la temperatura y duración del curado. Concretamente, con un curado de 17 horas a 70° C, las resistencias medidas eran mucho más altas que con el curado normal a 20° C. En estos trabajos, lo que sí se apreció claramente fue la

negativa influencia de la humedad de los áridos, que debe quedar por debajo del 0,1 %. Y, entre otras observaciones, también se apreció su excelente comportamiento a temperaturas por encima de las máximas ambientales, no alterándose las características de las muestras ensayadas tras mantenerlas, durante dos meses, en una estufa a 100 °C.

A partir de 1990 van apareciendo algunos estudios de carácter más científico, (Sandrolini, 1992; Yeon, 1992; Uriev, 1992), que profundizan en los factores de influencia relacionados con las características de los PC y PM, a través de estudios sobre la microestructura de estos materiales compuestos.

Se ha comprobado experimentalmente el efecto de la composición de diversas mezclas de poliéster no saturado (De la Caba, 1995), a temperatura de 80 °C, sobre la duración del curado y de su endurecimiento, así como el efecto de algunos aditivos polímeros en estado líquido.

También se han realizado ensayos de larga duración para determinar la influencia de algunos ambientes y soluciones acuosas agresivas sobre las características de los PC, especialmente en ambientes muy húmedos y por el contacto con soluciones ácidas o alcalinas (Potapov, 1997). De acuerdo con esos resultados experimentales parece que los PM poseen una estabilidad química superior a la de otros materiales de construcción convencionales, como los hormigones portland normales.

1.4.2. Variaciones dimensionales en los PM.

Tanto los PM recién fabricados como aquellos cuyo endurecimiento ha terminado registran alguna variación en su volumen (positiva o negativa), esto es, sufren retracción o expansión. Esto también sucede en otros materiales de construcción moldeables, como los cerámicos, o morteros y hormigones portland, por ejemplo. También, y como todos los materiales, los “plásticos” se dilatan al aumentar la temperatura y se contraen al disminuir aquella. Pero además, en los PM, como también en los hormigones portland,

se producen unas deformaciones típicas originadas por un fenómeno de *creep* o fluencia lenta de los materiales sólidos antes citado.

Se conocen estudios experimentales sobre medidas del *creep* en PC bajo cargas muy altas (Yashin, 1963), mantenidas durante cierto tiempo, habiéndose advertido (Howdyshell, 1972; Lott, 1973), que se produce la rotura en probetas prismáticas de PC cuando la carga permanente es superior al 50 % de su máxima resistencia mecánica, medida con cargas instantáneas. E igualmente, se comprueba en ensayos de 1000 horas de duración, que las probetas prismáticas resistían todo ese tiempo sin problemas de roturas aunque se mantuviesen bajo una carga permanente siempre que el valor de dicha carga fuera inferior al 25% de su resistencia a rotura.

En la práctica constructiva los valores de fluencia lenta o *creep* que puede soportarse, dado los altos valores de resistencia mecánica en formulaciones de morteros PM, son mucho más altos que los exigidos para condiciones de trabajo o servicio no excepcionales, lo que hace poco probable que sea necesario soportar cargas de más del 20% de las resistencias máximas. En todo caso, la solución no resulta difícil, ya que suele bastar con la inclusión en la dosificación de un pequeño porcentaje de fibras, como una tercera fase de refuerzo. Así, se tendría realmente no un PM, sino un FPM o mortero polímero con fibras.

1.4.3. Los morteros poliméricos o de polímeros. Usos estructurales y no estructurales

Los morteros poliméricos hoy en día están siendo cada vez más utilizados en aplicaciones estructurales en construcción e ingeniería civil (Rodríguez-Maribona *et al.* 1996). De hecho, tienen ya un uso muy extendido en reparación y recubrimiento o protección de estructuras existentes, pero además sus excelentes características mecánicas (especialmente flexión) suponen importantes ventajas frente al uso de

hormigón tradicional cuando se pretende aumentar cargas, luces, o disminuir secciones y peso propio.

En nuestro país se han desarrollado investigaciones recientes relativas a sus posibles aplicaciones estructurales, metodología de cálculo, etc., sin olvidar sus posibilidades de aplicación debidas a sus características decorativas (San José 1996).

Los hormigones y morteros polímeros han sido siempre apreciados por sus posibilidades estéticas. Ya en sus primeras aplicaciones en los años 50 se denominó mármol sintético (Chawalwala 1996). Pero también existen en la actualidad patentes de aplicación, como las italianas A006/B/1117346-1986 y A0010/B/1242778-1994, sobre procedimientos de vibro-compactación para la fabricación de placas y losetas de granito o mármol troceado ligado con material polímero.

Para otras aplicaciones tales como la fabricación de elementos prefabricados, columnas, mobiliario urbano, etc. se han desarrollado investigaciones (Larrauri 1996) que incluyen el uso del rotomoldeo o moldeo rotacional, técnica habitualmente utilizada para transformación de materiales plásticos. Estas investigaciones se han llevado a cabo en el centro tecnológico Gaiker de Vizcaya, consiguiendo elaborar piezas con hormigón polímero y aspecto marmóreo, totalmente huecas y de pequeños espesores, tanto con curado en caliente como en frío. Además el curado en frío permite utilizar moldes no metálicos, mucho más económicos, con lo que es posible realizar series muy bajas de producción o incluso piezas únicas.

En Japón estos materiales se han utilizado desde hace tiempo en el campo de la construcción (Dikeou, 1975, Ohama 1973) para producir tuberías, conductos de cableado, pilotes, aplacados decorativos, baldosas, canalizaciones y una gran variedad de paneles.

En Alemania (Koblischek 1975) se realizan gran numero de elementos prefabricados: bordillos, aplacados, sanitarios, elementos de decoración y jardinería, funerarios, piezas

para escaleras, etc. con tres tipos de resina principalmente: epoxi, poliéster y metilmetacrilato.

En España se conocen diversas casas comerciales que ofrecen productos para aplacados y revestimientos a base de áridos conglomerados con resina de poliéster: Mármol Compac, con áridos de mármol, polvo de carbonato cálcico y resina de poliéster Quarella, (que tiene dos gamas de productos, unos que contienen áridos de mármol y otros con cuarzo/granito), Silestone, con áridos de sílice y cuarzo, Privilege, también con áridos de cuarzo y granito. Todas estas patentes realizan sus productos (según sus especificaciones técnicas) con vibrocompactación al vacío para llenado de los moldes y posteriormente curado en hornos a 80-85 °C.

También en España se han estudiado mezclas de áridos de pizarra con resina de poliéster con idea de reutilizar el material sobrante de canteras debido al propio procesado (corte y pulido) de la roca natural (Rodríguez *et al.* 1995). Los resultados obtenidos en dichas investigaciones concluyen que el material es apto para revestimientos de interior y objetos decorativos.

De hecho, se conoce bibliografía donde se comentan (Aigrot 1975) los estudios llevados a cabo para implantar plantas de fabricación de este material, pizarra “artificial”, en Francia. Dichos estudios han sido llevado a cabo por investigadores del *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* de París, y tras su conclusión y perfeccionamiento del proceso de producción se han instalado varias plantas de fabricación de este material para su utilización en cubiertas.

En la actualidad uno de los usos más comerciales del hormigón polímero se encuentra en la gama de instalaciones y sus elementos prefabricados tales como depósitos, canalizaciones, etc., como es el caso de los productos fabricados en España por la empresa Ulma.

I.5. RELATIVO A LA FASE LIGANTE EN LOS PM.

Dentro del mundo industrial, así como para los no profesionales, a los polímeros sintéticos se les denomina de forma genérica “materiales plásticos” o simplemente “plásticos” por la facilidad de moldeo y conformación de los mismos. Sin embargo, la denominación de plástico puede resultar poco precisa. En las resinas sintéticas, la morfología y disposición de las cadenas polímeras puede variar bastante, y justamente esas distintas disposiciones, así como la manera en la que quedan unidas sus cadenas polímeras sirve para diferenciar los tres tipos básicos de “plásticos”, a saber: termoplastos, duroplastos y elastoplastos.

Todos los materiales “plásticos” se originan mediante un proceso que se denomina polimerización, que esencialmente consiste en agrupar muchos monómeros idénticos o distintos para formar lo que los químicos denominan macromoléculas.

En el proceso de polimerización son posibles tres variantes según la formación de las cadenas básicas macromoleculares: poliadición, policondensación y polimerización propiamente dicha. Se originan por *poliadición* cuando se produce una previa reacción química entre sustancias diferentes, que origina como producto de reacción un monómero de alto peso molecular. *Policondensación* es una reacción previa parecida, pero que obliga a eliminar productos no monoméricos, generalmente moléculas de agua líquida. Y finalmente, como tercera variante se cuenta con la *polimerización* propiamente dicha, la variante más frecuente y donde las cadenas formadas se componen con moléculas de monómeros, que quedan unidos por fuertes enlaces covalentes, sin necesidad de reacción química convencional.

Luego de formadas las cadenas polímeras lineales, con o sin ramificaciones, se pueden unir entre sí mediante enlaces tipo Van der Waals, o puentes de hidrógeno, que se rompen y recomponen con cierta facilidad (simplemente al elevar o disminuir la temperatura) con el consiguiente aumento de la moldeabilidad de los polímeros sólidos. En estos casos se forman los denominados termoplastos, termoplastómeros o termoplásticos.

Los tipos denominados duroplastos, duroplastómeros, termoendurecibles y los elastoplastos, elastómeros, elastoplásticos o cauchos sintéticos, se originan por reticulado de las cadenas ramificadas, mediante fuertes enlaces covalentes, difíciles de recomponer si se rompen. Pero así como los duroplastos son rígidos y frágiles, los elastómeros presentan por el contrario una característica elasticidad mecánica tipo caucho, con alargamientos recuperables de hasta el 600 %.

Cuando se manejan materiales que contienen resinas del tipo de los duroplastos conviene tener en cuenta entre otros aspectos, las características de materiales frágiles (riesgo de rotura por colapso) de la mayoría de las formulaciones de duroplastos puros, cualidad que se corrige técnica e incluso económicamente con la adición de cargas de diferente naturaleza, que contribuyen disminuir la fragilidad, aumentando la tenacidad y la ductilidad en los PM de duroplastos.

De estos tres tipos básicos, se conocen y comercializan decenas de plásticos diferentes (Hellerich, 1992). Pero además, para un mismo tipo o clase entre numerosos “plásticos” disponibles se advierten diferencias y muy apreciables entre unas mismas clases de propiedades.

Los primeros estudios e investigaciones sobre los PM destacan sobre sus demás características sus resistencias mecánicas y químicas. Por otra parte, esas primeras formulaciones en gran parte eran mezclas de resinas con cargas diversas, algunas de las cuales además de abaratar el coste de los PM, contribuían a mejorar ciertas características.

A mediados de los 60 (Bares, 1967), se comenzó a estudiar cómo las dosis de cargas y áridos influían significativamente sobre las deformaciones producidas en los PM, bajo cargas mecánicas de compresión y tracción especialmente. Sus conclusiones se basaron en ensayos sobre probetas de PM hechas con distintas formulaciones de duroplastos: fenólicos (FP), resinas epoxi (EP), poliésteres no saturados (UP) y resinas furánicas (FA).

De hecho hay muchos tipos de matrices poliméricas para formular los PM. De una manera muy general se pueden clasificar tal y como aparecen en la Tabla III.

Matrices poliméricas		
Termoestables:	Termoplásticas:	Elastómeros:
Poliéster insaturado (UP)	Polipropileno (PP)	Poliuretano (PU)
Vinilester (VE)	Poliésteres saturados (PET-PBT)	Siliconas (SI)
Epoxi (EP)	Policarbonato (PC)	
Fenólicas (PF)	Poliacetato	
Polyimidas (PI)	Poliamida (PA)	
	Poliéter-Éter Ketona (PEEK)	
	Polisulfonato (PSUL)	

TABLA III: Matrices utilizadas para la fabricación de morteros poliméricos.

Teóricamente, con casi cualquier tipo de resina sintética sean de tipo termoplasto, duroplasto o elastómero, se podrían preparar morteros poliméricos. Sin embargo, en la industria de la construcción, por razones técnicas y económicas, se prefieren sólo unas pocas formulaciones de polímeros duroplastos. Las resinas orgánicas duroplásticas elegidas han de poderse polimerizar (fraguar y endurecer) a temperatura ambiente, aunque los procesos puedan acelerarse o regularse mediante la ayuda del calor, por radiación y/o por la acción de sustancias activadoras/reguladoras de la polimerización. En la práctica constructiva de las obras, las resinas utilizadas se disponen en un estado de líquido o pasta más o menos viscoso y consistente.

Junto a las resinas fenólicas y melamínicas (PF, MF, MP y UF) que fueron los primeros duroplastos en utilizarse, se consumen también otros materiales duroplastos, resinas de furano y acetona (FA), así como poliésteres no saturados o insaturados (UP), resinas epóxicas (EP) y algunas formulaciones de poliuretano reticulado (PUR). Y recientemente ya se preparan incluso algunos PC, con formulaciones de resinas termoplásticas, que pueden rigidizarse con cierta facilidad, especialmente las de naturaleza acrílica.

En la actualidad, con referencia a aplicaciones en edificación, se justifican las preferencias de dosificaciones a base de resinas de tipo poliésteres no saturados UP por su precio, gran transparencia y posibilidad de colorear, especialmente si el PM hecho con ellas ha de quedar visto.

Resina	Resistencia a tracción (MPa)	Resistencia a Flexión (MPa)	Módulo elástico (GPa)
Vinil éster	14.3-90.0	59.4-152.0	3.10-3.20
Poliéster	13.8-69.0	40.0-135.0	1.00-3.45
Epoxi	10.35-13.8	92.5-101.4	3.45-4.00
Metacrilato	5.5-8.5	82.0-118.0	2.50-3.40

TABLA IV: Características de diversas resinas utilizadas para la fabricación de morteros poliméricos, (Chawalwala 1996)

Las resinas epoxi, de características superiores a las demás en ciertos casos, (Tabla IV, Chawalwala, 1996) resultan de mayor precio, mientras que las resinas fenólicas, muy utilizadas en usos de ingeniería civil, aunque sean algo más baratas, no suelen utilizarse en arquitectura ya que originan PM coloreados con tonalidades más o menos oscuras. Algo parecido sucede con las resinas furánicas, las primeras resinas utilizadas para preparar PC, pero que no siempre están disponibles en el mercado español.

A continuación analizaremos los aspectos más importantes de las resinas termoestables que se utilizan más frecuentemente para componer PM.

1.5.1. Fenoplastos (PF) y aminoplastos (MF, MP y UF).

Las resinas fenólicas (PF) (Gould, 1959) se consideran como los primeros duroplastos que se fabrican industrialmente y bajo la marca “baquelita” fueron sinónimos de materiales plásticos. En realidad son polímeros reticulados de forma tridimensional muy compacta, algunas de cuyas características se indican en la Tabla V.

Densidad (g/cc)	Tracción (N/mm ²) DIN 53455	Dureza (N/mm ²) DIN 53456	Dilatación 20-80°C	Deformación por calor (°C) DIN 53461	Retracción (%) DIN 53464
(1,3-2,0)	(15-30)	(160-400)	(1-6 x 10 ⁻⁵)	(130-200)	(0.2-1.2)

(Los valores se refieren a mezclas de resina y carga)

TABLA V: Intervalos de valores para algunas características de los fenoplastos.

Las resinas fenólicas se preparan por policondensación de fenol y formaldehído. Estas resinas encabezan una gran familia de duroplastos, los fenoplastos, en la que se integran las fenólicas (FP) y otras resinas producidas por uniones de melamina y urea con fenoles y formol (MP), (MF) y (UF). La mayoría de los fenoplastos, que se utilizan como masas de moldeo, se comercializan o preparan con diverso porcentajes de cargas (del 25 al 60%), cuya naturaleza influye en las características finales del material. Se utilizan como cargas materiales vegetales, como algodón y celulosa, minerales en forma de polvo o filler o también fibras, micas, residuos de explotaciones de canteras, asbestos, o incluso fibras y tejidos industriales.

Los fenoplastos puros que poseen módulos elásticos relativamente altos originan compuestos, rígidos, duros y frágiles. De color inicial de amarillo claro a pardo, oscurecen con el tiempo. Resistentes a muchos disolventes orgánicos, resisten peor a los ácidos y álcalis.

De características parecidas son las resinas con base de urea y amina, así como melaminas policondesadas con fenol y formaldehído (MP), (MF) y (UF), que se prefieren en bastantes casos por la posibilidad de formulaciones incoloras y de colores claros, puesto que admiten coloraciones diversas.

Como principal inconveniente para usarlas en la preparación de morteros polímeros en obra aparece la necesidad de temperaturas y presiones relativamente altas para conseguir buenos resultados en los procesos de polimerización.

Su uso es muy adecuado en construcción debido a las altas temperaturas que pueden llegar a soportar, además tienen la ventaja de que cuando arden lo hacen sin emitir gases tóxicos.

Las principales propiedades de los PM realizados a base de resinas fenólicas son las siguientes:

- Buena resistencia a temperaturas elevadas.
- Muy buena resistencia al fuego.
- Resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia al ataque químico y de forma especial al de los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas, como epoxi, urea-formol, etc.
- Estabilidad dimensional.

1.5.2. Resinas furánicas (FA).

Las resinas furánicas (FA) (Delmonte, 1969) forman otra gran familia de duroplastos, con diferentes formulaciones. Son duroplastos de color oscuro, casi negro, lo que limita su aplicación en PM que van a quedar vistos. Presentan altas resistencias mecánicas y buen poder de penetración en materiales porosos.

Densidad (g/cc)	Tracción (N/mm ²) DIN 53455	Dureza (N/mm ²) DIN 53456	Dilatación 20-80°C	Deformación por calor (°C) DIN 53461	Retracción (%) DIN 53464
1,0-1,2 (1,5-2,5)	(9-20)	-----	(3-6 x 10 ⁻⁵)	(179-200)	-----

(Los valores entre paréntesis son de mezclas de resina y carga)

TABLA VI: Intervalos de valores para algunas características de resinas furánicas.

Su utilización ha sido muy amplia en la antigua URSS, pero en el resto del mundo no es corriente la fabricación y el uso de resinas furánicas, quizás por la agresividad química

de algunas materias intermedias durante el proceso de preparación. No obstante en la actualidad algunas resinas furánicas se comercializan como resinas epoxídicas. (EP). En la Tabla VI se indican valores de algunas características de estas resinas.

1.5.3. Resinas epoxi (EP).

Las resinas epoxi (EP) son duroplastos, disponibles bajo numerosas marcas y variedades comerciales, que se utilizan para preparar los PM (Fernández Cánovas, 1990). Con este tipo de resinas se conocen un gran número de formulaciones con excelentes características, como resinas de colada, base de adhesivos y otras aplicaciones técnicas, en estado puro, con diferentes cargas y en forma de PM.

Estas resinas, sin cargas, aunque resultan transparentes inicialmente, acaban tomando unos tonos claros inestables, por lo que solo se usan con colores oscuros. Con altas resistencias mecánicas presentan, incluso sin cargas, una tenacidad aceptable, una excelente dureza y estimables resistencias al impacto y a la abrasión, características que explican el gran consumo de estas resinas. En la Tabla VII se indican intervalos de valores de algunas de sus características.

Densidad (g/cc)	Tracción (N/mm ²) DIN 53455	Dureza (N/mm ²) DIN 53456	Dilatación 20-80°C	Deformación por calor (°C) DIN 53461	Retracción (%) DIN 53464
1,17-1,25 (1,7-2,1)	35-50 (70-100)	(120-230)	7-9 x 10 ⁻⁵ (2-7 x 10 ⁻⁵)	60-110 (110-150)	(0,1-0,5)

(Los valores entre paréntesis son de mezclas de resina y carga)

TABLA VII: : Intervalos de valores para algunas características de las resinas epoxi.

Son las resinas de mayor precio, pero también la de mejores propiedades. Presentan una gran capacidad para adherirse a la mayoría de las superficies. Son completamente diferentes de las resinas de poliéster y exigen una preparación mucho más estricta durante su uso. Mientras que en las resinas de poliéster el porcentaje de catalizador no

es excesivamente importante, variando con el mismo la velocidad de la reacción, con las resinas epoxi es necesario el uso de balanzas de precisión para la dosificación del catalizador, siendo necesario cambiar el tipo del mismo cuando quiera variarse la velocidad de reacción. Son más seguras al no ser tan inflamables y más tenaces al tener una alta capacidad de alargamiento. Las principales propiedades de los PM realizados a base de resinas epoxi son las siguientes:

- Excelentes propiedades del compuesto en general.
- Baja retracción durante el curado.
- Buen comportamiento a temperaturas elevadas, hasta 180 °C.
- Buena resistencia y estabilidad ante los agentes químicos y disolventes.
- Ausencia de volátiles durante el curado.
- Muy buenas propiedades eléctricas.
- Buena adhesión a casi todas las fibras.
- Largo tiempo de curado.
- Coste relativamente alto.

1.5.4. Poliésteres no saturados (UP)

Los poliésteres no saturados (UP) son duroplastos que, comercializados como resinas de moldeo no resultan excesivamente caros. El reticulado de estas resinas se produce por copolimerización de un poliéster con estireno (Lawrence, 1960). Entre los poliésteres insaturados se encuentran también las resinas de ftalato de dialilo (DAF).

Se comercializan como resinas de colada (reactivas), masas de moldeo (masas reactivas) o como preimpregnados. La reticulación se efectúa por polimerización sin liberarse ningún producto.

En estado de pureza, sin cargas, las resinas UP son materiales incoloros, casi transparentes o con tonos claros, más o menos amarillentos. Pueden colorearse en

muchos tonos translúcidos y opacos. En la Tabla VIII se indican intervalos de valores de algunas de sus características.

Con excelentes resistencias mecánicas, las resinas UP presentan también cierta retracción y *creep*, que suele corregirse con una pequeña adición de fibras a sus mezclas.

Densidad (g/cc)	Tracción (N/mm ²) DIN 53455	Dureza (N/mm ²) DIN 53456	Dilatación 20-80°C	Deformación por calor (°C) DIN 53461	Retracción (%) DIN 53464
1,17-1,26 (1,6-2,5)	6-80 (60-100)	----- (120-230)	7-9x10 ⁻⁵ (2-7x10 ⁻⁵)	55 – 90	1,8 - 2,4 (0,3-0,8)

(Los valores entre paréntesis son de mezclas de resina y carga)

TABLA VIII: Intervalos de valores para algunas características de las resinas de poliéster.

Son las resinas más utilizadas hoy en día. Su obtención industrial da lugar a un compuesto sólido que hay que disolver para obtener la fluidez suficiente, por lo que se suministra disuelta en estireno, que va a participar en la reticulación. Suele venir mezclada con un acelerador que ayuda al catalizador a descomponerse y comience así la reacción química de reticulación.

Existen en el mercado innumerables marcas, como nombres comerciales citaremos algunos ejemplos solamente del tipo de resinas de colada, (Hellerich *et al.* 1989) que serán las utilizadas en esta investigación: Alpolit (Hoechst), Gabraster (Eni), Norsodyne (Rhone), Palatal (BASF), Polisier (Siersa), Polylite (Reichhold), Rütapal (Bakelite), Stratyl (Rhone), Vestopal (Hüls), G-103 E (Neste Chemicals), Distitrón (Alusuisse), Norpol (Reichhold), Aropol (Ashland Chemical).

Hay muchos tipos de resinas de poliéster comercializadas (Tabla IX) para muy diferentes clases de aplicaciones, pudiéndose conseguir PM con distintas características e incluso con una alta resistencia a los rayos UV y a la humedad, con mayor resistencia química, con una más alta resistencia al impacto, con resistencia a altas temperaturas

(hasta 140° C), etc. El uso de distintas clases de catalizadores y aceleradores aumenta las posibilidades de aplicaciones de estas resinas (Tabla X).

TIPOS	APLICACIONES
Ortoftálicas	Semirígidas: barcos, estratificados industriales, placas onduladas. Rígidas: barnices, preimpregnados.
Isoftálicas	Gel coats, depósitos, ingeniería química...
Tereftálicas	Ingeniería química, estratificados con alta resistencia química.
Tetrahidroftálicas	Barnices, depósitos de alimentos, cubas.
Bisfenólicas	Aplicaciones anticorrosiva, alta resistencia química.
Resinas ac. Tetracloroftálico	Comportamiento al fuego mejorado.
Resinas del ac. Het	Resistencia al fuego, anticorrosión.
Resinas al MMA	Estratificados para el transporte, placas, cúpulas.

TABLA IX: Tipos de resinas de poliéster más utilizadas y sus aplicaciones.

En cuanto a la transformación de las resinas de colada, las resinas se suministran habitualmente disueltas en estireno, en estado viscoso. La norma de producción indica que se mezcle el catalizador con la resina y en caso necesario se añade acelerante. Las mezclas deben transformarse en un intervalo de tiempo limitado denominado *pot life* o tiempo abierto. Para estas resinas existen tres posibilidades de curado (Hellerich *et al.*, 1989):

- Curado en frío: a temperatura ambiente, una vez transcurrido el tiempo abierto los poliésteres lineales y el estireno gelifican y curan, es decir se reticulan por

copolimeración exotérmica y contraen su volumen. El curado se completa después con 4 a 5 horas a 80 °C o bien 1 a 2 semanas a temperatura ambiente.

- Curado en caliente: a temperaturas de 80 a 120 °C, la reticulación de la mezcla reactiva es más rápida y uniforme, es decir no se requiere ningún curado posterior.
- Resinas UP de curado UV: por ejemplo Palapreg LHZ (BASF), reticulan sin endurecedor debido a la radiación UV (lámparas especiales, tubos fluorescentes). Las ventajas están en el tiempo abierto prácticamente ilimitado (sin influencia del UV); no se cometen errores de mezcla ni dosificación; y las partes de la resina que hayan goteado pueden recuperarse.

CATALIZADOR	ACELERADOR	DURACION CATALIZ.	TIEMPO DEL GEL	TIEMPO ENDUREC.	CAMPOS DE APLICACION
Peróxido de metil-etil cetona	Naftenato de cobalto	Corto	Medio	Lento	Gel coats Contacto a mano Proyección Inyección Rotación
Peróxido de acetil-acetona	Naftenato de cobalto	Medio	Medio	Rápido	Moldeo contacto Proyección Inyección Prensa en frío
Peróxido de ciclohexanona	Naftenato de cobalto	Medio	Medio	Progresivo	Barnices Mastics Placas onduladas
Peróxido de benzoilo	Dimetilnilina	Largo	Medio	Medio a rápido	Mastics Moldeo contacto Inyección Prensa en frío
Peróxido de benzoilo	Dietil-anilina	Largo	Largo	Largo	Mastic Moldeo contacto Inyección Prensa en frío

TABLA X: Catalizadores y aceleradores utilizados con las resinas poliéster.

Son muchos los autores que recogen experimentaciones con curado de estas resinas a temperatura ambiente y postcurado a altas temperaturas. Así, Jorquera (1996), realiza investigaciones comparando probetas con curado a temperatura ambiente durante varios

días y otras acondicionadas durante tres horas a 100 °C. Concluye afirmando que la resistencia a flexión, a temperatura ambiente y a los tres días de curado alcanza un 87% del valor de la resistencia que se obtendrá a los tres meses. Sin embargo, este valor máximo corresponde al 80% de la resistencia alcanzada al realizar un postcurado a 100°C durante tres horas. En cualquier caso, para ensayos a largo plazo (tres meses) los resultados de resistencia son similares.

Los PM realizados con las resinas de poliéster presentan las siguientes propiedades:

- Baja viscosidad, buena trabajabilidad.
- Tiempo de curado rápido.
- Alta contracción durante el curado.
- Gran rango de características debido a los diferentes tipos de resinas de poliéster que pueden conseguirse.
- Posibilidades de curado tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.
- Puede conseguirse una aceptable resistencia al fuego.
- Magnífica relación calidad/precio.
- Buenas propiedades del PM, aunque inferiores a los conseguidos con algunas otras resinas.

1.5.5. Resinas de metacrilato de metilo (MMA)

El metacrilato de metilo (MMA) es un monómero ampliamente extendido y estudiado, cuya polimerización da como resultado el polímero termoplástico, polimetacrilato de metilo, que es, desde el punto de vista comercial, el más importante del grupo de los acrílicos. Las importantes características de resistencia al impacto y transparencia de este polímero le convierten en un buen sustituto del vidrio en determinadas aplicaciones, así como útil en decoración, objetos de alumbrado, placas de propaganda, etc. Sin embargo, lo que se denomina “resina de metacrilato de metilo” lo constituye básicamente una mezcla de este monómero con otro multifuncional que copolimeriza con el primero para dar una estructura reticulada.

El uso general de la resina así concebida está mucho menos extendido, aunque en el campo particular de los hormigones con polímero se viene utilizando como resina de impregnación de los PIC y como matriz de los PC usados como material de construcción de prototipos de bancada de máquinas-herramienta. Existen incluso patentes que hacen uso de este material pero se carece de experiencia para alto volumen de producción y larga vida en servicio de las estructuras prefabricadas.

Al igual que las resinas de poliéster, estas resinas desarrollan excesivo calor durante el proceso de curado, con importantes cambios de temperatura a causa de tensiones internas, lo que puede originar posteriormente deformaciones en las piezas fabricadas e incluso fisuras en el peor de los casos.

La adhesión de estas resinas a los áridos (cargas) con altas resistencias a la tracción es buena, utilizándose generalmente con áridos que contienen un alto porcentaje silíceo (SiO_2).

La facilidad con que los monómeros acrílicos polimerizan entre sí ha conducido a un conjunto de composiciones, con frecuencia de naturaleza no conocida, que son de utilidad como adhesivos, materiales de moldeo, resinas para moldeo por colada, resinas para recubrimientos y otras aplicaciones.

Los poli(metacrilatos de metilo) del mercado son el PMMA de colada, normalmente de peso molecular elevado (semifabricado) y las masas de moldeo de PMMA, normalmente de peso molecular más bajo, que se puede inyectar y extruir. Existen además copolímeros con un 80 % como mínimo de metacrilato de metilo (MMA). Los copolímeros que contienen hasta un 50 % de acrilonitrilo (AMMA) tienen mejor resistencia química y mecánica, sobre todo tenacidad, pero sólo se comercializan como semifabricados. Otros copolímeros se fabrican a partir de MMA, butadeno y estireno (MBS), caracterizándose por su gran resistencia al impacto y transparencia elevada.

En la industria de la construcción se utilizan comúnmente para fabricar numerosos elementos, como son: techos acristalados, claraboyas, planchas segmentadas dobles y

triples para cubiertas de invernadero, instalaciones sanitarias (como bañeras y platos de ducha), acristalado de duchas, celdas sanitarias; botones de grifería, muebles y piezas de mobiliario, tuberías transparentes, etc.

Los PM realizados con las resinas de metacilato de metilo (MMA) responden a las siguientes propiedades:

- Los materiales de moldeo modificados con ésteres de ácido acrílico poseen una buena resistencia a la intemperie.
- Color: transparencia cristalina con brillo superficial elevado.
- Se pueden colorear en cualquier color, tanto en transparente como en opaco.
- Son duros y rígidos, pero frágiles. Buena resistencia a la tracción, compresión y flexión.
- Poca capacidad de deformación (a excepción de la compresión).
- Buena resistencia al rayado.
- Las superficies de corte se pueden pulir.
- La temperatura de uso máxima es de 70 °C; en tipos especiales (caloríficos) puede llegar hasta 100°C.
- Arde con chisporroteo y llama brillante, casi no deja residuo y no gotea.
- Resistente a hidrocarburos alifáticos, disolventes no polares, ácidos y álcalis en solución acuosa; grasas; alcohol en concentraciones inferiores al 30 %. Buena resistencia a la luz, envejecimiento e intemperie.

1.5.6. Resinas vinil-éster o de ésteres vinílicos (VE)

Su manejo, aspecto y olor es similar a las de poliéster al venir también disueltas en estireno. Su contracción durante la reticulación es menor, originando menos huecos y por tanto aumentando todas las propiedades, tanto mecánicas como de resistencia química y durabilidad. Con el gel-coat que se deriva de esta resina se están garantizando cascos de embarcaciones durante 30 años, sin problemas de ataque de agua.

Las principales propiedades de los PM realizados a base de resinas viniléster son las siguientes:

- Buenas cualidades mecánicas y de forma particular excelente resistencia a la fatiga.
- Excelente fluidez o baja viscosidad, lo que facilita su impregnabilidad y moldeo.
- Resistencia a la corrosión incluso en agua caliente.
- Estabilidad contra agentes químicos y disolventes.
- Tiempo de curado rápido.

1.5.7. Otras resinas

Recientemente se han comenzado a utilizar resinas de poliuretano reticulados y otras resinas de naturaleza acrílica, transparentes para los PM.

Los poliuretanos (PUR) son productos preparados por poliadición entre isocianatos y alcoholes polifuncionales. Con formulaciones de PUR se fabrican “plásticos” de tipo termoplasto, duroplasto y elastoplasto, con posibilidad de espumados en los dos últimos tipos. Los PUR duroplastos se comercializan como resinas de colada, con excelentes características y estabilidad hasta cerca de los 200° C. La densidad de los PUR, sin cargas, oscila entre 1,11-1,19 g/cm³, con una dureza Shore, luego de reticulados de 80-95 y resistencias a tracción entre 50-75 MPa y un coeficiente de dilatación térmica de 5-9 x 10⁻⁶.

Las formulaciones acrílicas, que se empiezan a utilizar para PM, aunque sean termoplásticas llegan a endurecer y adquirir rigidez bastante como para resultar unos materiales ligantes duros y resistentes. La densidad de estas formulaciones, sin carga, varía de 1,17-1,28 kg/cm³ y sus coeficientes de dilatación lineal varían de 2,7-3,0 x 10⁻⁶. Las características y propiedades del PM van a depender mucho del tipo de matriz utilizada. En la Tabla XI se dan algunos datos comparativos de diferentes matrices poliméricas, tanto termoestables como termoplásticas.

Caracterización de un mortero polimérico con resina U.P. y Albero para su aplicación en construcción

MATRICES	TERMOESTABLES					TERMOPLÁSTICOS			
PROPIEDADES	POLIÉSTER INSATURADO (UP)	RESINA EPOXI (EP)	FENOPLASTOS (PF)	RESINA VINILÉSTER (VE)	POLYIMIDA (PI)	POLIPROPILENO (PP)	POLIAMIDA (PA)	POLIÉTER ETER CETONA (PEEK)	POLIÉTER-SULFONA (PES)
Densidad (g/cm ³)	1.17-1.26	1.17-1.25	1.25-1.3	1.17-1.25	1.27-1.42	0.9-0.91	1.01-1.19	132	137
Alargamiento a rotura (%)	<3	35588	<3	3.5-7	610	>600	200-250	50	40-80
Fluencia	Muy baja					Posible, perpendicular a la dirección fibras y fibras cortas			
Temperatura de moldeo (°C)	T.Amb. a 180	T.Amb. a 170	150 a 190	T.Amb a 175	aprox. 350	170 a 300	210 a 290	380 a 400	340 a 380
Temperatura (°C) reblandecimiento	80-160	80-130	100-150	100-150	260-500	110	80-120	250	200
Resistencia a deform. térm.(°C)	55-90	60-110	150	55-85	250	48-65	50-110	140	138
Cualidades de flujo a temper. trabajo	Muy buenas (fluidos)				Dependiente Sistema	Problemas impregnación de las fibras según las piezas			
Calor de reacción	Reacción exotérmica con mayor desarrollo térmico según la pieza					Sin reacción exotérmica			
Contracción fraguado (%)	6-10 1.8-2.4	35432	0.5-1.5	0.1-1	0.5-0.7	1.3-3	35432	0.1-1.4	0.5-0.7
Contracciones desiguales	Contracción compensable por adición de partículas termoplásticas				0.1-0.2% s/refuerzo	Contracción reducible por adición de cargas			
Contracción posterior (%)	Para masas de moldeo casi nula					Prácticamente nula			
	<3	Nula	< 0.4	Nula					
Tiempo de almacenaje (meses)	<6 sin aire/luz	6-12 según presentación	<6 sin hum. a T.Amb	<6 a T.Amb	Ilimitada	Ilimitada a temperatura ambiente			
Resistente a	Agua Sol.acuosas Fuel Gasolina	Alcohol Gasolina Benzol A. minerales Grasas	Agua Aceites Grasas Gasolina Benzol Alcohol	37% HCL Diox. cloro Agua mar Alquitrán	Eter Ésteres Á. Disuelt. Alcoholes Queroseno	Ac. Débiles Lejías Alcohol alg. aceites	Gasolina Aceite Grasa alg. Alcoh. Cetonas Ésteres	Lubric. Ac. Hidraul. alg. Deterg.	Ac. Diluido Lejías Gasolina Aceite Grasas Alcohol
No resistente a	Agua hirv. Ácidos Lejía Benzol Alcohol Toluol	Agua hirv. Ésteres Álcalis Cetonas Acetona.	Ácidos y Álcalis concentr.	SO ₄ H ₂ (75%) Agua hirv. NaOCl (6%) NaOH (15%)	Álcalis conc. soluc. amoniacaes Humedad Agua hirv.	Medios muy oxidantes corrosión por gasolina y benzol	Ác.mineral Álc. Fuerte Fenoles Ác.fórmico	Sulfúr.conc Nítrico Se corroe en piezas resist. de avión	Éster-Cetona Alcohol Órgano-clorados o aromáticos
Inflamabilidad	No autoexting	Dificilm. inflamable Arde	Dificilm. inflamable No funde	No autoexting.	Repelente a la llama No funde	Combustible Funde en hilos	Parcialm Autoexting. forma hilos	Autoexting Baja emis. humos	Dif. Inflam Parcialm. Autoexting
Reparación	Sobrelaminación y encolado					Ablandar y reconformar, soldar, encolar			

TABLA XI: Propiedades de las matrices poliméricas

1.5.8. Resinas recicladas

En la actualidad, para preparar los PM se prefiere usar resinas UP. Sin embargo, el desarrollo y futuro de este tipo de resina queda bastante condicionado por problemas ecológicos a causa del estireno preciso para la copolimerización de las UP comerciales.

Son esperanzadores algunos estudios recientes (Rebeiz *et al.*, 1992), sobre la posibilidad de usar resinas UP fabricadas por reciclado de politereftalato de etileno (PET), resultado del reciclado de envases plásticos.

1.5.9. Adiciones y aditivos

Tanto por razones económicas, pero también por comprobadas razones técnicas, pocas veces la fase ligante de los PM se compone exclusivamente con una resina sintética pura. Las adiciones o cargas, que también se denominan “extensores”, pueden tener naturaleza orgánica o inorgánica, manejándose más frecuentemente como sólidos finos, cuya morfología suele ser particulada, esferillas o polvo fino, pero también como fibras o tejidos. Con el empleo de estas cargas se procura además del abaratamiento del producto, mejoras muy interesantes, como por ejemplo la disminución de la fragilidad (Ramos, 1988).

En el caso de los morteros PM, conviene señalar que siempre se debe distinguir además de entre adiciones y aditivos, entre adiciones y áridos. Estos últimos, aparte de utilizarse en proporciones muy superiores a las adiciones, tienen distinta función, como es la de componer la segunda fase componente del PM, que se engloba como esqueleto resistente dentro de la fase ligante.

Un tipo de adición muy recomendable es el carbonato cálcico finamente molido o micronizado, así como la dolomía (carbonato doble de calcio y magnesio), o algunos silicatos (caolines, feldspatos, talco). Otras adiciones que se comercializan son las preparadas a base de sílice, sea cristalina o amorfa (el humo de sílice, por ejemplo).

Se pueden emplear algunas adiciones ignífugas a base de alúmina hidratada, óxido de antimonio, boratos de cinc y algunas otras sustancias de naturaleza orgánica, generalmente patentadas, que cuando se mezclan en baja proporción se consideran aditivos. Finalmente, también se comercializan cargas o extensores, fabricados artificialmente, mediante la formación de pequeñas esferillas de vidrio, así como en algún caso se cuenta con la adición de cemento portland.

Cualquiera que sea la adición, son convenientes ensayos previos para conocer, junto a las dosis más convenientes, los efectos producidos, y controlar debidamente su función (Mascia, 1974), así como comprobar previamente su compatibilidad con los componentes del ligante, además de su influencia sobre el aspecto final del PM, si ha de quedar visto.

En general, las adiciones se mezclan con la resina en proporciones superiores al 5%. Los aditivos se añaden siempre en proporciones bajas, siempre inferiores al 5%, habitualmente en estado líquido, para controlar y modificar el proceso de polimerizado.

Los más utilizados en la preparación de morteros PM son los siguientes:

- **Pigmentos:** Son sustancias orgánicas o inorgánicas, que se añaden para colorear algunos morteros polímeros. Deben ser estables y compatibles con los polímeros básicos, así como frente al calor, hasta la mayor temperatura que se prevea alcanzar en el proceso de polimerización y durante el tiempo de servicio del material.
- **Estabilizantes o estabilizadores:** se añaden para aumentar las resistencias de los PC frente a radiaciones diversas, y especialmente frente a la inevitable radiación de rayos ultravioletas UV.
- **Ignífugos o retardadores de la combustión o llama:** se usan para disminuir la inevitable inflamabilidad de los polímeros, debido a su naturaleza orgánica. Estos aditivos se preparan a base de ciertas sales y óxidos metálicos.

- ***Aditivos acopladores:*** Sustancias que se añaden para asegurar/reforzar la adherencia entre polímero y extensores, y entre polímero y los granos de los áridos en los PM. Se fabrican a base de silanos o titanatos diversos.
- ***Aditivos antirretracción:*** Generalmente productos patentados, para reducir la retracción en los PM.
- ***Aditivos plastificantes y lubricantes:*** Su aplicación conlleva una mejora de la “moldeabilidad”, distinguiendo entre los de acción endógena y los de acción exógena. Los primeros, denominados plastificantes, reducen la viscosidad, aumentando la fluidez del polímero. Los exógenos, por otro lado, actúan llegando a la superficie externa de la masa del mortero PM, facilitando tanto su moldeo como evitando que se adhiera a las paredes de los moldes, se usan ceras diversas y estearatos cálcicos.
- ***Desmoldeadores, o sustancias desmoldantes:*** Aditivos que facilitan el desmoldeo de las piezas ya endurecidas evitando que se peguen a las paredes de los moldes.

I.6. RELATIVO A LA FASE ÁRIDOS EN LOS PM

Por razones técnicas y de costes, en la preparación de los PM interesan dosificaciones con el máximo volumen de árido y la mayor compacidad posible. Se tratará de conseguir el mayor ahorro de polímero, sin merma de su acción ligante o conglomerante. En los PM, como en los morteros portland convencionales, los áridos bien dosificados y con adecuada granulometría ayudan a conseguir una baja porosidad/permeabilidad, y además originan PM de menor retracción y mayor tenacidad/ductilidad. Para la dosificación y uso de los PM se vienen utilizando áridos de muy distinta naturaleza, además de los de tipo convencional, calizos y silíceos, prefiriéndose los de machaqueo en los de tamaño superior a los 5-10 mm. y utilizando preferentemente arenas silíceas de río como árido fino.

Por razones técnicas, en las aplicaciones más frecuentes de los PM para elementos constructivos de poco espesor, el tamaño máximo de árido (TMA), que en los hormigones PC no suele ser superior a los 15-20 mm., queda por debajo de los 2-3 mm.

Más importante parece, según la bibliografía consultada, las recomendaciones de limpieza y total falta de humedad en las arenas de los PM, pues como se ha comprobado experimentalmente (Ohama, 1973), la humedad en los áridos, por encima del 0,1%, influye negativamente sobre las resistencias mecánicas de los PM de poliésteres, y previsiblemente también en las de los PC, en general.

También se han investigado, como en este trabajo, las posibilidades de utilizar áridos diferentes a los calizos o silíceos convencionales. Se conocen otras investigaciones donde se han empleado como adiciones, pero también como áridos, residuos y subproductos industriales, pizarras (Rodríguez, 1995), y otros restos procedentes de deshechos y restos de canteras (como en esta investigación), escorias de altos hornos, cenizas volantes e incluso áridos ligeros cerámicos. Así mismo, y a veces patentándolas, se han fabricado losas de PM en los que se consumieron como áridos materiales de deshecho.

En el apartado siguiente se incluye una descripción algo más extensa de las características del árido que se empleará en nuestra investigación.

1.6.1. El albero

En el diccionario de la R.A.E. el término *albero*, que deriva del latino *albar*, significa terreno albarizo, o lo que es lo mismo terreno de color blanquecino. Sin embargo, en la mayoría de Andalucía, se entiende por *albero* tanto este tipo de roca anteriormente comentado, como un tipo de pavimento característico y también como un color típico, el color amarillo-rojizo de la propia roca. Su utilización más conocida hoy en día es como material granular (Figura 1) en el suelo de las casetas, el acerado y paseos peatonales de la feria de Abril de Sevilla, así como en el pavimento del ruedo de las plazas de toros.



Figura 1. El albero y su utilización como material granular en la actualidad

Esta roca se localiza dentro de una reducida comarca sevillana denominada Los Alcores, en donde sus afloramientos y canteras a cielo abierto se vienen explotando como material de construcción desde tiempo inmemorial.

En la Vega de Carmona, una zona de cierta extensión de la Provincia de Sevilla, entre los cauces de los afluentes de la margen izquierda del Guadalquivir, ríos Corbones y Guadaira y desde el municipio de la ciudad de Carmona al de la villa de Dos Hermanas, se sitúa una franja conocida como los Alcores. Constituye una franja no muy extensa, pero muy claramente caracterizada, con unos 30 kilómetros de longitud y una anchura que varía de dos kilómetros en su inicio a unos siete al final. En la comarca se distinguen una serie de colinas o collados, que le dan su nombre y que descienden suavemente desde la cota de 250 m. en Carmona hasta menos de la de 50 m. en Alcalá de Guadaira.

La formación geológica que origina Los Alcores, exclusiva y peculiar, se ha formado por depósitos de calizas fosilíferas y detríticas del Mioceno, que se conglomeran como calcoarenitas de origen orgánico, y que tienen un claro origen marítimo, de antiguos mares muy agitados pero con poca profundidad.

El albero es una roca de color amarillo-rojizo muy característica. Según González Díez (1986), la litología de esta roca albero es de “calcoarenitas alteradas superficialmente por la presencia de más de un tipo de óxido de hierro y restos fósiles muy fragmentados”. La roca albero se compone con un mayor porcentaje de calcita, mezclada con un menor porcentaje de cuarcitas y aunque en general aparece exenta prácticamente de materiales arcillosos, contiene minerales ferríticos, en diferentes grados de oxidación.

Como roca, el albero se encuentra con distintos grados de compacidad y resistencias mecánicas, pero siempre con un color amarillento, muy característico, “amarillo albero”. La masa rocosa que aflora en bancos de potencia superior a los 30 metros en las cercanías de Alcalá de Guadaira, se ha explotado y se sigue explotando en canteras a cielo abierto.

El albero se ha utilizado a lo largo de la historia para fabricar mampuestos y sillares, (González Vila, 1980) (Figura 2). Posteriormente sirvió para fabricar una excelente cal y en tiempos actuales el albero se consume para fabricar cementos portland de características especiales, resistentes a los sulfatos.

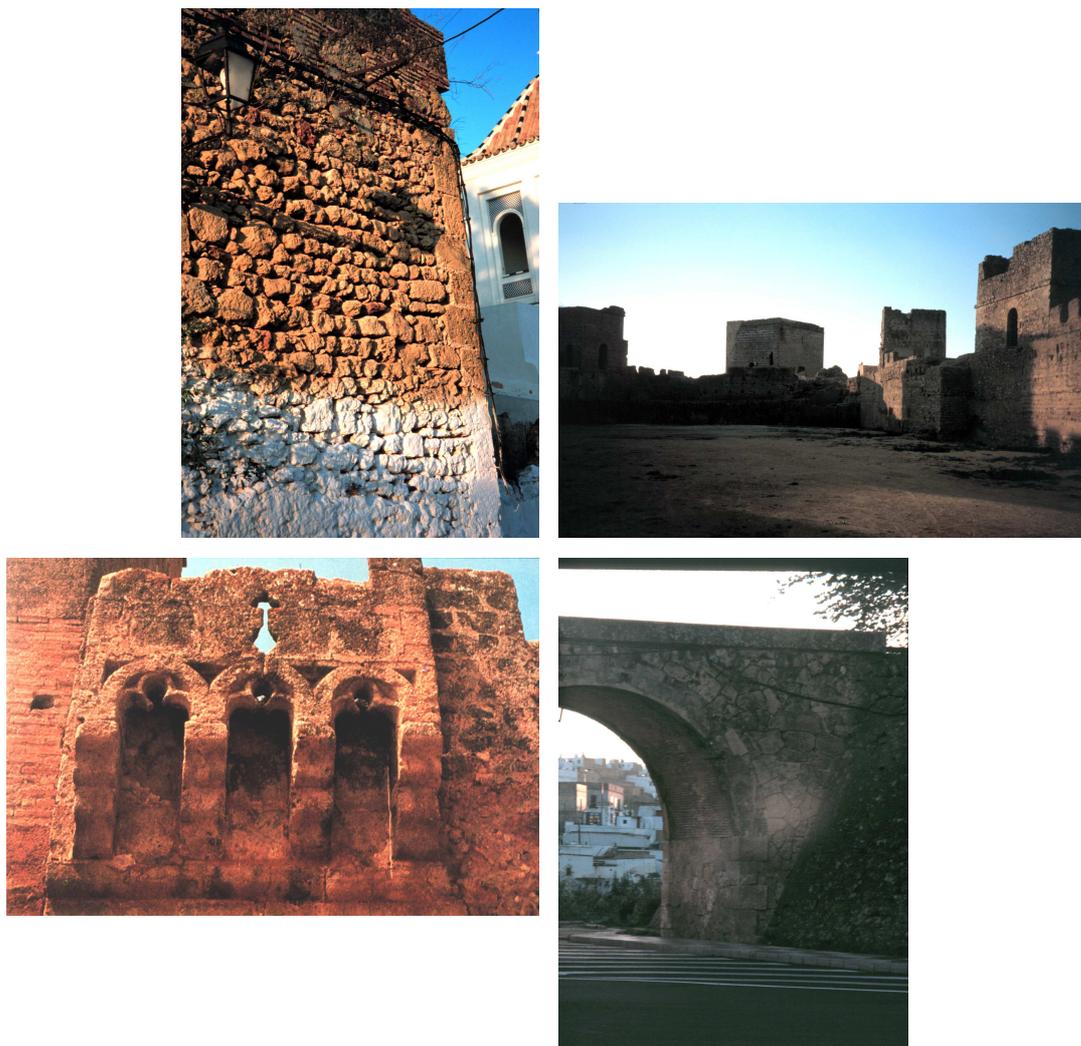


Figura 2. Utilización del albero en forma de sillares y mampuestos: castillo y puente romano en Alcalá de Guadaira (Sevilla)

El albero comercializado también se utiliza hoy en día como árido para morteros y hormigones convencionales de cal y cemento (Alejandre, 1997), aunque acaso su uso y mayor consumo sea el de material de sub-base, de préstamo y relleno y capa final de rodadura en suelos y pavimentos económicos y durables, con gran capacidad drenante.

Denominación Comercial	Tamaños
Albero en rama	“Todo uno” (sin clasificar)
Granzas de Albero	de 15 a 60 mm
Albero sub-base	de 0 a 60 mm
Albero cernido	de 0 a 5 mm
Albero molido	de 0 a 2 mm

TABLA XII: Tamaños comerciales del albero cernido

En la actualidad, salvo en alguna restauración, no se utilizan sillares o mampuestos de albero, aunque sí, como se ha indicado en rama, en granza, triturado o cernido. E igualmente, más por su composición química que por sus características litológicas, como materia prima cementicia, con escaso contenido en alúmina (Barrios, 1975).

Componentes Nombre y fórmula	Zonas altas		Zonas medias		Zonas bajas	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
SiO ₂	11,6	8,5	15,6	14,8	15,6	11,2
Al ₂ O ₃	1,7	0,8	0,9	0,7	0,5	0,3
Fe ₂ O ₃	1,4	0,8	1,7	1,4	1,9	1,4
CaO	50,1	47,7	45,7	45,1	51,0	47,5
Pérdida por calcinación (100 °C)	39,5	37,5	36,4	36,0	41,1	38,6
Carbonato cálcico	86,8	84,7	81,3	80,0	88,3	83,5

TABLA XIII: Composición química de la roca albero



Figura 3. Algunos ejemplos de utilización del albero como color en la arquitectura popular sevillana

En la mayoría de la zona productora, luego de arrancado y triturado el “albero en rama” el material se clasifica en diferentes tamaños como los que se indican en la Tabla XII.

Con los resultados obtenidos acerca de la composición del albero explotable sobre muestras tomadas en distintas partes de los afloramientos (Prieto, 1963), es posible afirmar que la roca albero es bastante homogénea, como se ve en la Tabla XIII.

No obstante, sin desmentir la real homogeneidad de la roca albero en el yacimiento, en el albero comercial, triturado o cernido, se detectan claras diferencias en su composición, según el tamaño de los granos analizados lo que se pone de manifiesto mediante análisis químicos convencionales (Barrios, 1975), o mediante análisis difractométrico con Rayos X (DRX), según se expresa en la tabla XIV.

De acuerdo con los resultados de diversos ensayos, el valor de la densidad en la roca albero se puede fijar dentro del intervalo comprendido entre 1.930 y 1.950 kg/m³, con un peso específico de 2,65 Ton/m³ y un grado de absorción de agua del 0,3 %.

COMPONENTES	Fracción < 2 mm	Fracción > mm	Conjunto
Sílice (SiO ₂)	18,9 - 24,3	9,5 - 9,9	12,6 - 13,6
Alúmina (Al ₂ O ₃)	1,0 - 1,2	0,8 - 1,0	0,8 - 1,0
Oxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	1,6 - 2,2	1,8 - 2,2	1,7 - 2,3
Cal (CaO)	40,4 - 42,2	47,5 - 48,9	45,4 - 47,0
Oxido magnésico (MgO)	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6	0,4 - 0,6
Pérdida por calcinación (100°C)	32,5 - 34,7	37,9 - 39,7	26,3 - 38,3

TABLA XIV: Composición química del albero triturado o cernido

1.6.2. Contenido de humedad en los áridos

Ya hemos comentado anteriormente como algunos autores han comprobado experimentalmente (Ohama, 1973), que si el contenido de humedad en los áridos de los PM, queda por encima del 0,1% influye negativamente sobre las resistencias mecánicas de los PM de poliésteres. Todos los ensayos se realizaron con áridos silíceos.

Otras investigaciones más recientes (Hsu 1984) pretenden también determinar y cuantificar el efecto de esta parámetro, utilizando dos tipos de áridos: silíceos y calizos. Entre sus conclusiones se establece que la resistencia de PC se reduce significativamente cuando los áridos contienen humedad, probablemente debido a que la presencia de agua reduce el enlace entre el polímero y el árido, puesto que los monómeros MMA (Methylmetacrilato) utilizados en el ensayo no son compatibles con el agua.

También se observa una reducción del 40 al 55% en la resistencia a compresión. Pero en el caso de los áridos calizos, con el mismo contenido de humedad que otros silíceos, el PC realizado con áridos calizos presenta una mejor resistencia. Se piensa que esto sea debido a que en el caso de áridos calizos, tendrían menos agua libre en la superficie que

los silíceos debido a su mayor porosidad. Es decir, que áridos con mayor porosidad tolerarían mayores contenidos de humedad sin disminuir su resistencia.

Así mismo, si la granulometría contiene mayor porcentaje de finos, la mayor proporción superficie-volumen permitiría que el árido absorbiera más cantidad de agua sin verse influida su resistencia. El estudio concluye indicando textualmente que “*cuanto menor sea el grado de absorción de agua de los áridos, mayor es la reducción de resistencia para el mismo contenido de humedad en el árido*”. (Figura 4).

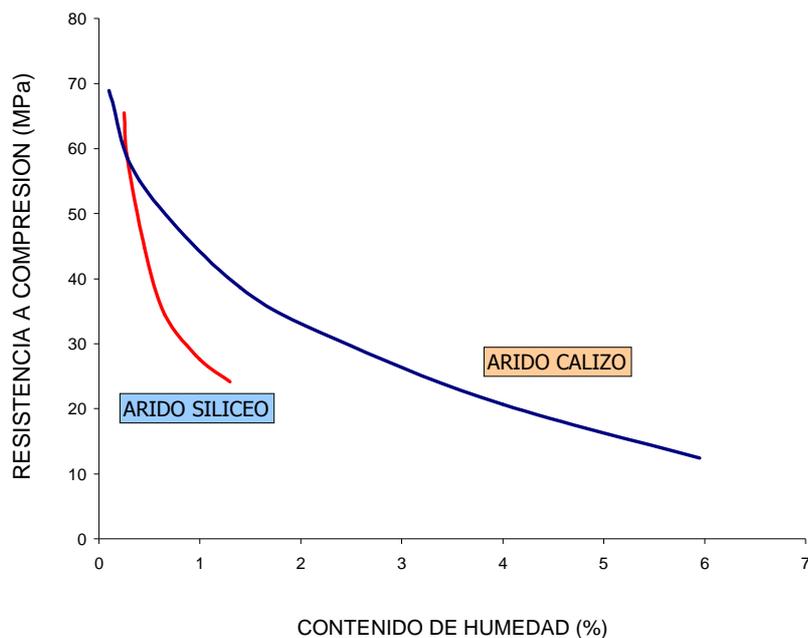


Figura 4. Efecto de la humedad en la resistencia de los morteros poliméricos a base de áridos silíceos o calizo. (Hsu 1984).

1.6.3. Relación árido-ligante

Desde hace más de 30 años se conoce cualitativa y cuantitativamente (Moshchanskii *et al.*, 1971), la influencia del valor de la relación árido/ligante en las características de los PM y PC. Y además, experimentalmente se comprueba que es posible encontrar un valor “óptimo” de esa relación para la mayor parte de las características de los PC.

Igualmente (Patuorev, 1971), está comprobada la influencia de la granulometría de los áridos. Así se conoce también la influencia positiva de áridos muy finos, en forma de polvo y tipo filler. Dicha influencia puede deberse a que las pequeñas partículas del filler, finamente dispersas, actúan como núcleos alrededor de los cuales se forma una estructura supermolecular de cadenas polímeras orientadas y más ordenadas. Es decir, que resinas y fillers acaban formando una monofase o conjunto monolítico que actúa como un único material ligante o conglomerante. Pero cuando el filler combinado con la resina es superior al 20% en peso, los valores de las resistencias mecánicas y de otras características disminuyen significativamente.

También se comprueba que para los morteros PM, conforme aumenta su peso específico aumentan sus resistencias. Todo lo dicho significa que, en cada caso, se puede establecer una relación resina-árido óptima, para la que se alcanzan los valores máximos de densidad, resistencias mecánicas y compacidad (inversa a la porosidad).

Dentro de las características mecánicas de los PM hay que tener en cuenta siempre que, en mayor o menor grado, estos materiales “plásticos” resultan con roturas frágiles. Con dosificaciones de poliéster y fillers silíceos se han medido resistencias a la compresión de 141 MPa, tras un corto periodo de curado (Bloss, 1970). Sin embargo, también se advirtió en las roturas de las probetas una fragilidad relativamente alta, que se consiguió reducir, mejorando la tenacidad y resistencias a tracción, mediante unos refuerzos de fibras, denominándose a este tipo de morteros y hormigones FPC, FPM, como se comentará en el siguiente apartado.

I.7. LA FASE REFUERZOS EN LOS PM

Por razones tecnológicas operativas y por cuestión de costes, en las aplicaciones constructivas más habituales de los PM, estos materiales sólo se utilizan en pequeños espesores, de menos de 10 mm., salvo casos muy excepcionales. Con estos espesores, si hay que armar el material evidentemente no podrán usarse armaduras de gran diámetro o longitud y por ello, la morfología más normal de los refuerzos en los PM es la fibrosa, fibras de sección circular o rectangular, de longitudes discretas, sueltas o unidas en mallas y telas. Como fibras pueden considerarse los alambres de poco diámetro. Este tipo de morteros se denominan bajo las siglas FPM (Morteros polímeros, armados con fibras). Con adecuadas dosificaciones de fibras se reduce la fragilidad de algunas resinas duroplásticas, así como su retracción y *creep* o fluencia lenta, lo que significa una menor posibilidad de fisuración.

Las fibras y mallas utilizables pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica (cerámica o metálica). Sobre fibras y sus características, así como de sus influencias en los compuestos hay una suficiente bibliografía, incluida en obras generales sobre materiales compuestos (Arzamasov, 1989), ponencias, artículos y obras especializadas (Hibrard, 1965; Happey, 1978; Pritchard, 1980; Antequera *et al.*, 1991), donde se estudian las fibras y sus aplicaciones como refuerzo de compuestos.

Aunque el empleo de los FPM no sea infrecuente, no suelen diseñarse demasiado hormigones polímeros armados, fundamentalmente por razones económicas – que no técnicas –. En esta investigación sólo se pretenden estudiar las características y algunas posibilidades de aplicación, con espesores pequeños, de un PM específico, sin armar, por lo que no se pretende incidir más sobre el tema de las armaduras, posible objeto de futuras investigaciones.

II. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

II.1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Como consecuencia de investigaciones iniciales llevadas a cabo en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I desde el año 1996, se realizaron algunas muestras con mezclas de resina de poliéster insaturado y áridos de albero de Alcalá de Guadaira, que además de presentar un agradable aspecto y estructura, parecían con alta dureza, buenas resistencias mecánicas y aceptable comportamiento frente a compuestos químicos agresivos.

En la elección de los componentes para el mortero polimérico, así como en el propio diseño para las dosificaciones ensayadas han primado unos criterios definidos previamente:

- Por una parte, el aprovechar como material un tipo de roca autóctona y, de alguna manera, emblemática de la zona para conseguir un nuevo material de construcción. Su color es muy utilizado en las pinturas de revestimientos de los edificios tradicionales andaluces, pero también la propia roca de albero es usada frecuentemente para resolver con eficacia y economía pavimentos granulares públicos y privados
- Los trabajos realizados con anterioridad en el Departamento resultaron muy prometedores y han despertado cierto interés en empresas con amplia experiencia en el campo de la industrialización y prefabricación de elementos constructivos de hormigón, con vistas a la comercialización de elementos realizados con este nuevo material.
- Por otra parte, el decidir el empleo de la roca albero en mezclas de coste aceptable, que se puedan emplear además en instalaciones o plantas productoras de elementos de construcción, basados en el consumo de áridos de albero, redundaría en un fomento en la riqueza y empleo de la zona.

Por todo ello, se decidió iniciar este trabajo, sistematizando debidamente la preparación y ensayos de muestras, con dosificaciones idóneas para conseguir un mortero polimérico utilizable para fabricar piezas de poco espesor, tanto para aplicar directamente, como para servir de revestimiento sobre otros conglomerantes convencionales (morteros portland, por ejemplo).

Como resultado se ha elaborado este nuevo material, que hemos denominado ***polialbero***, con un árido específico, muy utilizado tradicionalmente en la arquitectura sevillana.

Por lo tanto, la hipótesis principal de la investigación será determinar que el mortero polimérico de albero reúne características que permiten utilizarlo como material de revestimiento y para la fabricación de elementos constructivos de poco espesor, cuyo aspecto y acabado recuerde claramente el de la propia roca de albero. Posibles usos de este nuevo material serían elementos de revestimientos tales como solerías, aplacados, elementos y prefabricados moldeados tales como molduras, cornisas, recercados, etc.

Para ello será necesario plantear la siguiente sistematización de la investigación:

- Caracterización de este material para ser utilizable en revestimientos (solerías, aplacados) y elementos prefabricados moldeados
- Definición de las características de la mezcla a emplear
- Comparación entre dos de las resinas de poliéster insaturado más comunes en el mercado, resina ortoftálica y resina isoftálica, para determinar cual de ellas es la más idónea para este mortero polimérico *polialbero*.
- Determinar la metodología a seguir para controlar las características de este nuevo material, tanto los parámetros de fabricación de probetas, como los ensayos aplicables (destructivos y no destructivos), así como la validez e idoneidad de los mismos.

- Valoración de la influencia real de la humedad del árido en el mortero final, de forma que justifique la necesidad de su secado, con el consiguiente aumento de costes de producción.
- Valoración de la adecuación de la granulometría natural del árido tal y como sale de cantera para la preparación del mortero.
- Contraste de la variabilidad de dicha granulometría mediante la realización de muestras con albero procedentes de distintos acopios tomados de distintas zonas de la cantera y separados en el tiempo, y comprobación de la influencia de dicha variación en las características del mortero realizado.
- Utilización de moldes de diferentes materiales para determinar los más idóneos para la preparación del material.
- Contraste de resultados obtenidos mediante ensayos en probetas de distinto formato para determinar el mismo parámetro (por ejemplo flexión o compresión). Determinación del tipo de probeta más idóneo y suficiente para comprobar las propiedades del material en un futuro proceso de fabricación.
- Utilización de distintos métodos de curado: a temperatura y humedad ambientes (curado *en frío*) y curado en horno a 80° C (curado *en caliente*) para evaluar su influencia en las características del material resultante.
- Estudio del envejecimiento del material y su influencia en sus propiedades iniciales.
- Consecución, combinando los parámetros anteriores, de un material que pueda prepararse en obra (albero sin cernir, humedad natural, temperatura ambiente) además de en instalaciones industriales.

Todas las mezclas se han realizado con una resina duroplástica, concretamente a base de poliéster no saturado o insaturado. La elección de la resina de poliéster se basa en el propio análisis realizado a lo largo de todo el estado de la cuestión, ya que es la más utilizada actualmente por todos los investigadores y expertos en construcción, debido a su magnífica relación calidad/precio y a su durabilidad.

Además, se planteó desarrollar a la largo de la investigación la comparación entre las propiedades de distintas mezclas: una realizada con árido completamente seco (lo habitual en las experiencias anteriores conocidas por la bibliografía existente), frente a la mezcla realizada con el árido húmedo, con el grado de humedad que poseía directamente al llegar de la cantera (lo cual abarataría y simplificaría significativamente el proceso de construcción en el caso de una empresa local).

La investigación se ha centrado en cuatro mezclas distintas, definidas todas ellas con la misma granulometría de árido y la misma dosificación de resina, combinándose las dos variables: árido seco/árido húmedo, resina ortoftálica/resina isoftálica, de ahí que las dosificaciones resultantes se denominaran:

- OW: árido húmedo, resina UP ortoftálica
- OS: árido seco, resina UP ortoftálica
- IW: árido húmedo, resina UP isoftálica
- IS: árido seco, resina UP isoftálica

Los resultados que se han obtenido despiertan grandes expectativas y permiten creer en la conveniencia de continuar este trabajo, tanto con las mezclas ensayadas, como con otras que puedan plantearse con otros tipos de ligantes polímeros, refuerzos y áridos.

Esta investigación se complementará en un futuro con el estudio de la posible industrialización del producto, basándose en el aprovechamiento de la maquinaria existente actualmente en la industria del sector. Por las características estéticas y autóctonas del albero se considera que el mortero polimérico de albero puede ser un material muy apreciado por los arquitectos y profesionales de la construcción, fundamentalmente para placas de revestimiento de suelos y paredes, paneles sándwich, placas o tejas para cubierta, mobiliario urbano, elementos decorativos de fachada, etc.

II.2. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Para caracterizar un nuevo material de construcción es necesario realizar una serie de ensayos encaminados a obtener sus características físicas y mecánicas, así como otros que determinen su comportamiento frente a otros agentes agresores: el agua, el fuego, la exposición a la intemperie a largo plazo, etc. De esta forma se considera definido el material. En la mayoría de los casos se trata de una información difícil de entender, tanto por la terminología como por la formulación que conlleva.

Por otra parte el técnico de la construcción, arquitecto o aparejador, tiene también su propio lenguaje, mentalidad y enfoque, y por lo tanto no le resultará significativo un estudio aislado de un material. Un técnico siempre verá el material colocado en la obra, o lo que es lo mismo, en continua interacción con otros materiales, con el edificio y con el entorno. Es el eterno debate entre la investigación básica y su aplicación; el eterno debate entre la Ciencia y la Técnica.

Los fabricantes a menudo describen sus productos en términos sin significado para los técnicos de la construcción. Por ejemplo, un suministro de resina de poliéster irá acompañado de las especificaciones del fabricante en cuanto al índice de acidez, viscosidad, tiempo de gel, contenido de no volátiles y peso específico, mientras que el técnico de la construcción necesita saber valores y límites de resistencia, módulo elástico y deformación máxima. Por otra parte, los técnicos no necesariamente entienden la terminología química o la importancia de esos datos suministrados en términos de definir las propiedades constructivas del material.

El desarrollo de un nuevo material es un proceso complejo (Browne *et al.*, 1975), que se muestra de forma esquemática en la figura 5. Es, además, un proceso que necesita de un constante *feedback* a medida que se van obteniendo experiencia y datos con los primeros ensayos. Es, por lo tanto, muy importante empezar cuanto antes ensayos de envejecimiento, incluso de puesta en servicio real del material, aunque posteriormente pueda sufrir modificaciones.

Un material de construcción debe mantener sus prestaciones durante al menos 25 años (Browne *et al.*, 1975), por lo que resulta esencial obtener cuantos datos sean posibles para determinar la vida útil de un nuevo material. Esto se debe llevar a cabo mediante monitorización y seguimiento del material una vez colocado. Todos estos datos serán útiles para realizar sucesivas mejoras en el material.

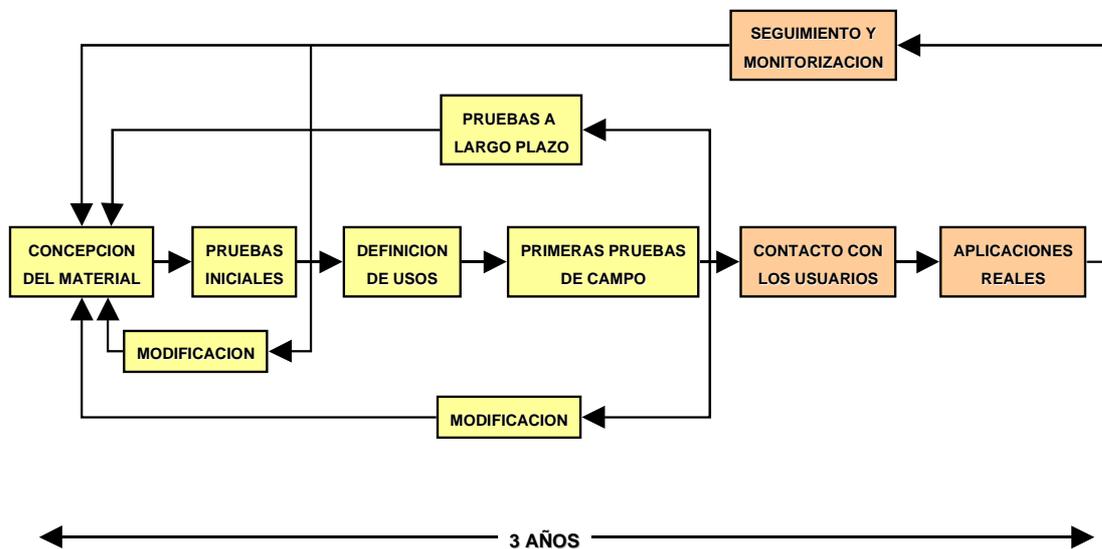


Figura 5. Fases en el desarrollo de un nuevo material de construcción. (Browne et al., 1975).

El estudio y la determinación de las propiedades de un material de construcción es un campo abierto a la investigación, puesto que en algunos casos los parámetros o características necesarias no se encuentran regulados por normativa alguna, o no existe una metodología definida que permita asegurar que el método utilizado sea el correcto.

En el caso de los morteros poliméricos o de polímeros no se ha encontrado normativa española o europea específica que defina los objetivos y alcance de los ensayos a realizar. El Comité Técnico de RILEM ha publicado “*Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*”, RILEM TC CPT-113 (1995). En Italia existen nuevas normas UNI para el ensayo de lo que ellos denominan *pedra natural aglomerada con polímeros para revestimientos de paredes y suelos* (Sandrolini *et al.* 1995).

No obstante, la definición de los parámetros necesarios para caracterizar un material está siempre relacionado con los usos que queramos darle al mismo. Es por ello que en este trabajo hemos partido de una hipótesis inicial de utilización en aplacados y revestimientos de suelos y paredes. A medida que caractericemos el material también será necesario analizar la conveniencia o no de nuevas posibilidades de uso.

Los valores de resistencia a distintos esfuerzos mecánicos del tipo compresión, flexión o desgaste son útiles no sólo en la determinación de la capacidad portante de un elemento constructivo, sino que también permiten valorar, entre otros parámetros, el grado de alteración del material, la potencial predisposición al deterioro, el grado de compacidad y la consolidación de los componentes que forman su estructura.

De hecho, la resistencia a compresión parece identificar a la inmensa mayoría de materiales, sobre todo aquellos cuya utilidad es estructural, ya que al determinar la tensión de rotura a compresión se está indicando la tensión que es capaz de soportar el material, es decir, la tensión a partir de la cual la estructura interna se destruye completamente.

Sin embargo, hay que tener presente que el objetivo de la investigación es definir un material apto para revestimientos de poco espesor, y que, por lo tanto, en este tipo de usos será necesario controlar además otros parámetros.

En resumen, los ensayos que se van a realizar al nuevo material objeto de esta investigación han sido:

- Control de las propiedades del árido utilizado: humedad y granulometría.

- Determinación de las propiedades mecánicas del material, a través de sus características de resistencia a compresión, resistencia a flexión (mediante ensayo de tres puntos), y resistencia al desgaste por abrasión.
- Determinación de sus propiedades físicas, densidad real y aparente y comportamiento frente al agua, – absorción, succión y secado –.
- Determinación de sus propiedades químicas: resistencia frente a manchas y ataques químicos.
- Ensayos de reacción frente al fuego.
- Medición por ultrasonidos, para determinar y contrastar mediante este tipo de ensayos no destructivos diversas características del material.
- Envejecimiento, controlando la variación de sus propiedades a lo largo del tiempo, a través de la exposición a la intemperie real y los ensayos de cámara climática.

II.3. ELABORACIÓN DE MEZCLAS. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Como hemos definido anteriormente, este trabajo de investigación pretende estudiar las características del albero mezclado con resina, buscando las proporciones y tipos de resinas más adecuadas para conseguir un producto que por sus características técnicas, económicas y estéticas sea susceptible de utilizarse como material de construcción, a fin de concretar en qué elementos constructivos pueden aprovecharse mejor sus características.

Por lo tanto, será necesaria una definición de las características del material y del sistema de ensayos. Esta definición debe incluir el nivel de dosificación, el tipo de árido, el tipo de resina, la humedad de los áridos, etc., así como la determinación de cuáles y cuántas son las probetas necesarias para caracterizar el material.

Mediante la definición de la metodología de ensayos más adecuada podremos determinar si los tipos de probetas ensayadas son adecuadas o no, así como definir los ensayos que sean más relevantes.

Todas las diferentes mezclas y probetas ensayadas han sido realizadas en los laboratorios del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Se realizaron bajo la supervisión y control permanente y directo de la autora de este trabajo, tanto en lo que se refiere a tareas de suministro y recepción de materias primas como en la elaboración de los morteros y probetas, apoyada por el personal de dicho laboratorio.

Para su fabricación se contó además con la colaboración de grupos de alumnos de sexto curso, especialidad edificación. Destinadas a ellos se instauraron unas sesiones formativas previas para profundizar los conocimientos de estos *operadores* con respecto al tema, incluyendo en ellas la transmisión de experiencias de cursos anteriores.

La finalidad principal de estas sesiones previas era la de presentar a todos los componentes de cada grupo la totalidad de las experiencias a realizar, de forma que en su trabajo estuvieran capacitados para cumplir todas las recomendaciones técnicas

correspondientes y muy especialmente las reglas sobre seguridad en el trabajo por el manejo de componentes químicos tóxicos, inflamables, etc.

Como asesora e informadora de los aspectos físico-químicos de la investigación se ha contado con la colaboración de la profesora doctora Doña Reyes Rodríguez García, Licenciada en Ciencias Químicas y muy experimentada en trabajos de laboratorio de materiales.



Figura 6. Distintos tipos de probetas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A.

A la vista de los ensayos a realizar, de la versatilidad del material, y de los equipamientos disponibles en el laboratorio se determinó la elaboración de los siguientes tipos de probetas (Figura 6):

- Probetas prismáticas: (40 × 40 × 160 mm). Se elaboraron en moldes metálicos normalizados desmontables. Estas probetas fueron utilizadas para ensayos de flexión y compresión. Se elaboraron series de probetas de control, y otras para ensayar tras su exposición a la intemperie o condicionamiento en la cámara climática.
- Probetas cilíndricas: (100 × Ø 50 mm). Se prepararon en una primera fase en moldes metálicos normalizados y posteriormente en moldes de tubo de PVC. Se utilizaron para ensayos de compresión e hídricos. Se elaboraron series de probetas de control, y otras series para ensayar tras su exposición a la intemperie.
- Probetas baldosas: (150 × 150 × 10 mm). Ejecutadas en moldes de madera fabricados en las instalaciones de la Escuela. Se utilizaron para ensayos de flexión, resistencia química y a las manchas y desgaste por abrasión en series de probetas de control, y otras series para ensayar tras su exposición a la intemperie.
- Probetas losas: (300 × 400 × 10 mm) de mayor tamaño, específicas para los ensayos de fuego. Se ejecutaron también en moldes de madera fabricados en las instalaciones de la Escuela.
- Probetas decorativas (Figura 7): realizadas con moldes de látex, de diversa forma y tamaño, con los que se pretendía valorar inicialmente las características decorativas y expresividad del material.

La amplia variedad de formas y tamaños de moldes utilizados así como los distintos materiales de los mismos (metal, madera, PVC, látex) ha permitido disponer, debido al gran número de probetas realizados, de gran experiencia en la elaboración de muestras de muy diversos tipos, lo que permite establecer recomendaciones acerca de la

trabajabilidad de la muestra, recomendaciones sobre el vertido en cada tipo de molde según el material, la forma del mismo, etc.



Figura 7. Probeta decorativa: capitel preparada en los laboratorios de la E.T.S.A.

Se han realizado algunas parejas de ensayos para contrastar características del material determinadas mediante probetas diferentes. Por ejemplo, se ha determinado la resistencia a compresión en dos tipos diferentes de probetas: probetas cilíndricas (tal y como se especifica en las normas RILEM PC-5, TC 113-CPT) y en las dos mitades de cada una de las probetas prismáticas (norma UNE 83-821-92), después de su rotura a flexión. Se pretende con ello establecer cuáles son las probetas necesarias y suficientes

para definir este material, así como los ensayos más idóneos para la determinación de sus características.



Figura 8. Algunas de las probetas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A. antes de iniciarse los ensayos

El mismo proceso de contraste de resultados se ha seguido para determinar la resistencia a flexión, calculada mediante probetas prismáticas y probetas baldosas respectivamente.

II.4. DURABILIDAD

La mayoría de los materiales se degradan si son expuestos a la intemperie. La corteza terrestre se degrada debido a procesos químicos y físicos como resultado de su exposición a la intemperie. La proporción y velocidad del deterioro depende de la naturaleza del material: para las rocas más duras la escala de tiempo se alarga hasta millones de años, mientras que algunos polímeros orgánicos sufren grandes cambios al ser expuestos a la intemperie durante pocos días.

En la industria de la construcción, los plásticos compiten actualmente con éxito frente a la madera, el vidrio, los metales y los materiales pétreos. Sea cual sea el tipo de aplicación, existe siempre una preocupación respecto a la durabilidad de los materiales poliméricos, en parte debido a su relativa novedad, pero también debido a que si podemos prever la vida útil de estos materiales también podremos prever su mantenimiento y reposición.

El deterioro de un material depende de cómo y en qué grado interacciona con el ambiente. El ambiente exterior considerado en términos de radiación solar, temperatura, lluvia y viento presenta amplias variaciones en términos de duración, intensidad y ciclos. En lo que se refiere a durabilidad de los materiales, la importancia dada a las condiciones climáticas severas depende de las características que sean requeridas a dicho material. No existe una clasificación climática aceptada para los deterioros en los materiales, aunque los principales componentes del clima que causan degradación en los materiales son: radiación solar, temperatura, humedad, viento, polvo y contaminación (Davis *et al.* 1983).

Debido al impacto en el bienestar social y económico del ser humano, el tiempo atmosférico ha sido medido durante muchos años. Existen regiones del mundo que disponen de sus datos grabados con detalle de varios cientos de años. En nuestro caso y puesto que se prevé un posible uso mayoritariamente local del material se han analizado los datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología, tomados en el

observatorio de Sevilla “Aeropuerto de San Pablo”, disponiéndose de datos en un intervalo de 30 años: 1961-1990 (MOPTMA 1995).

Se estima (Davis *et al.* 1983) que en un ambiente húmedo y cálido los composites de poliéster muestran una más rápida pérdida de sus propiedades físicas. Se ha demostrado (Kimball 1961) que mientras que el envejecimiento en el laboratorio de hasta 3 años tiene sólo un pequeño efecto en la resistencia a tracción, compresión y flexión, para composites de resina de poliéster, epoxi o fenólica reforzados con fibra de vidrio, los cambios son mucho más acusados si se exponen a la intemperie en Florida por ejemplo. En este caso la resistencia a tracción de dichos composites disminuyó hasta un 41%.

Un informe publicado por el Ministerio de Defensa Británico (*Ministry of Defence*, 1982), sobre composites realizados con resina de poliéster UP ortoftálica utilizando peróxido de MEK como catalizador, y con cuatro tipos de fibras de vidrio como refuerzo incluye una comparación entre exposición a distintas temperaturas en ambientes húmedos tropicales y ambientes secos. No se extraen datos claros de las muestras expuestas a la intemperie dos y cuatro años, puesto que la variación de los datos de muestra a muestra es mayor que los cambios que pudieran haberse producido derivados de la intemperie.

En clima seco y caluroso los cambios fueron severos, marcándose fuertemente la presencia de las fibras aunque las pérdidas de peso se encontraban entre el 1-3%. Después de ocho años de exposición los mayores descensos en sus propiedades correspondían a los composites laminados expuestos en ambientes calurosos y de alta humedad. Por ejemplo, la resistencia a flexión disminuyó en la mitad, un tercio o sólo la cuarta parte en clima cálido/húmedo, cálido/seco o clima moderado respectivamente.

Los altos niveles de radiación, temperatura y humedad combinados hacen de los climas húmedos y cálidos (tropicales) los ambientes más duros para los composites (Davis *et al.* 1983). Para evitar su deterioro se han utilizado distintos recubrimientos en el caso de los elementos reforzados con fibra de vidrio: aplicación de un gel coat (con o sin fibra

de refuerzo) en la superficie, aplicación de una capa de resina protectora, barnices acrílicos con agentes protectores para los rayos ultravioletas, así como la aplicación de un film protector de fluoruro de polivinilo durante el proceso de fabricación de los propios paneles.

Los métodos utilizados para medir el deterioro de un material expuesto a la intemperie, es decir a la degradación provocada por los cambios de temperatura, radiación solar, humedad, contaminación atmosférica, etc. son habitualmente ensayos destructivos. En esta investigación hemos complementado dichos ensayos con otros no destructivos, como los ensayos de ultrasonidos, para conocer la variación de distintas características del material a lo largo del tiempo.

Para poder realizar estudios significativos que sirvan de base a análisis posteriores se han controlado dos procesos de envejecimiento: controlando la variación de sus propiedades a lo largo del tiempo, a través de la exposición a la intemperie real y simulando el proceso de envejecimiento mediante ensayos de cámara climática.

a) Intemperie real

La exposición de probetas a intemperie real conlleva todos los factores que afectan a un material de construcción colocado en exteriores: radiación solar (factor de gran influencia en Sevilla, con medias de 2.922 horas de insolación al año), temperatura, humedad, viento, polvo y contaminación.

La correlación entre los ensayos realizados con cámara climática y el deterioro que sufre un material realmente expuesto a la intemperie es la clave de cualquier ensayo de envejecimiento. Sin embargo, no se ha encontrado bibliografía donde se expresaran resultados experimentales de otros investigadores respecto a este tema en el caso de los morteros poliméricos.

Esto es aún más significativo, si cabe, dado el carácter extremo del clima de Sevilla. El valle del Guadalquivir ostenta las temperaturas medias más altas de la península durante casi todo el año (17-18 °C). Presenta además mínimos en el mes de enero. El máximo se

localiza en agosto, produciéndose un recalentamiento que hace del Valle central (Córdoba) y medio (Sevilla) la región más calurosa de Europa (Artacho, 2000).

Según los datos recogidos en el observatorio meteorológico de Sevilla “Aeropuerto de San Pablo” (MOPTMA 1995) los datos de temperaturas mínimas en invierno alcanzan los -5°C en los meses de Diciembre-Enero, mientras que las máximas por encima de los 40°C (hasta un valor máximo de 47°C) son relativamente frecuentes en los meses de verano. La humedad relativa media al año es del 63 %, oscilando a lo largo del año desde el 49% de humedad relativa (mes Julio) al 76% de humedad relativa en los meses de Diciembre-Enero, en época de máxima pluviosidad.

Por lo tanto, se planteó entre los objetivos de este trabajo realizar un seguimiento del material de forma que se detectara con la mayor exactitud posible en qué punto se asemejaban el deterioro producido en el material tras los cuatro meses de ciclos en la cámara climática, con el deterioro producido en tiempo real.

Para la realización de estos ensayos se han dispuesto las probetas a la intemperie en la azotea de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Se han fabricado cuatro lotes compuestos cada uno por probetas prismáticas, cilíndricas y baldosas en número suficiente para realizar con ellas los mismos ensayos realizados a las probetas denominadas de control. La previsión inicial era retirar un lote tras cada trimestre, coincidiendo además con las estaciones del año.

Se inició la exposición de probetas a la intemperie en el mes de Abril de 2001. Tras tres meses de exposición se retiró uno de los lotes y se realizaron los ensayos correspondientes a todas las probetas de ese lote. Pasados otros tres meses se retiró el segundo lote y se ensayaron. Por lo tanto, se disponen de datos de ensayos de probetas de edades que hemos denominado tres y seis meses de intemperie.

A la vista de los resultados obtenidos en los dos primeros lotes se ha optado por mantener los lotes restantes un plazo de exposición mayor (un año y dos años) a la espera de obtener datos más significativos sobre el posible deterioro del material.

b) Cámara climática

Se ha utilizado para los ensayos de envejecimiento acelerado una cámara climática para ensayo de materiales modelo Fitoclima 300EDTU, de la casa ARALAB. Esta cámara admite gamas de temperaturas de -20 a $+80$ °C, de humedad de 10 a 98%, contando con programador electrónico, capacidad de hasta 8 programas de 20 segmentos cada uno. Permite conexión a software de adquisición de datos. Así mismo, posee un registrador gráfico para visualización de los datos, con salida impresa, tal y como se muestra en las Figuras 9 y 10.

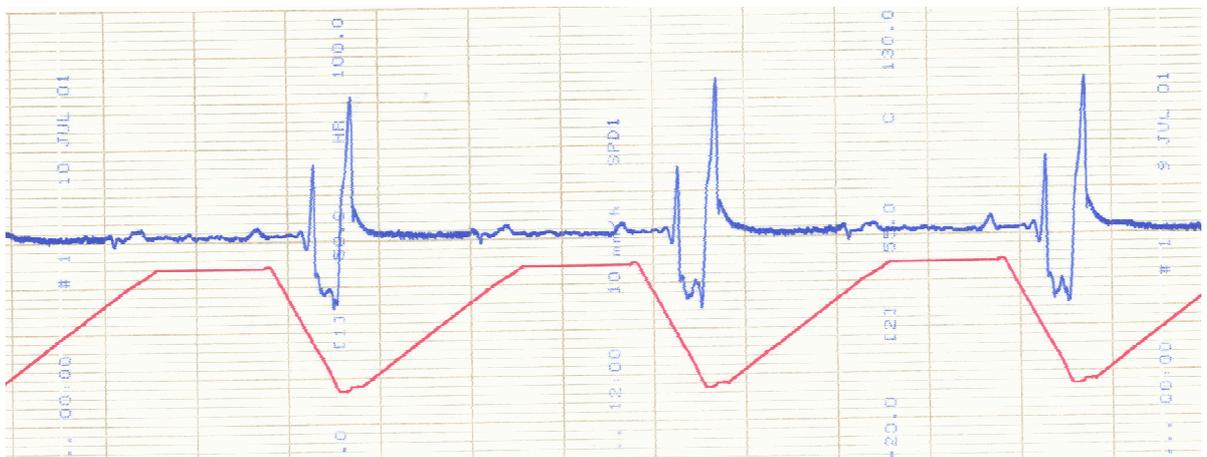


Figura 9. Salida impresa de parámetros de cámara: ciclo primavera/verano

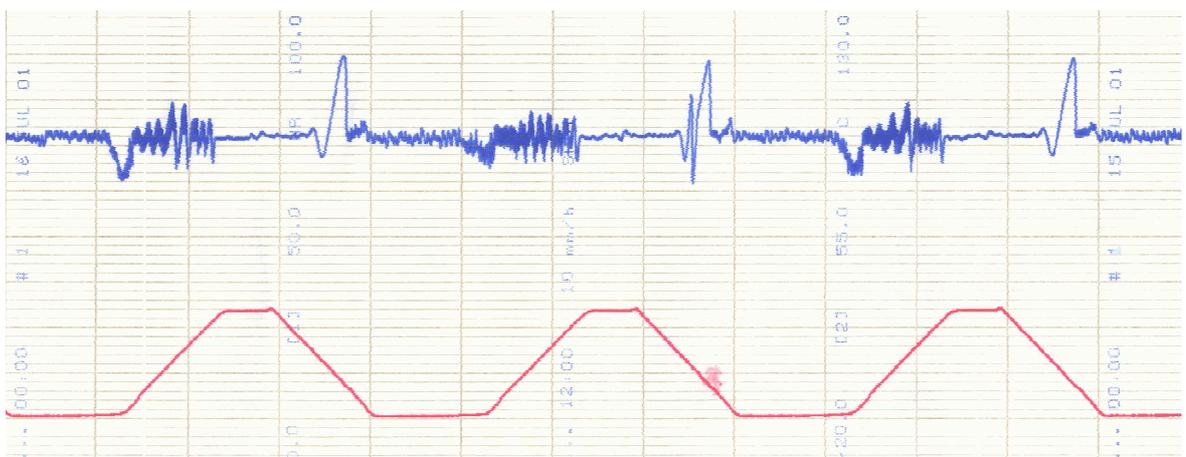


Figura 10. Salida impresa de parámetro de cámara: ciclo otoño/invierno

Dicha cámara se encuentra en las instalaciones del Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) de Oporto (Portugal), cuyo personal y medios han colaborado para el desarrollo de las presentes investigaciones.

La cámara permite controlar temperatura y humedad exclusivamente, no contemplando el envejecimiento del material debido a exposición solar y/o acción de la lluvia, lo que hace más aún imprescindible el contraste de los datos obtenidos con los de exposición real a la intemperie.

Se han ensayado, desplazándose hasta Oporto, probetas prismáticas fabricadas en Sevilla pertenecientes a las cuatro formulaciones resultantes de los dos parámetros de variación:

- OW - Resina Ortoftálica / Arido húmedo
- IW - Resina Isoftálica / Arido húmedo
- OS - Resina Ortoftálica / Arido seco
- IS - Resina Isoftálica/ Arido seco

Dado el tiempo disponible de utilización de la cámara para la realización de los ensayos (cuatro meses) y de acuerdo con los datos recogidos en el observatorio meteorológico de Sevilla “Aeropuerto de San Pablo” (MOPTMA 1995), se definieron dos ciclos diferentes. La hipótesis de trabajo planteada es que cada uno de los ciclos, de ocho horas de duración, equivaldría a un día real de 24 horas a la intemperie. De esta forma, en 24 horas tendrían lugar tres días ficticios (ver Figuras 9 y 10) y los cuatro meses pasados en la cámara podrían asimilarse a un año real.

A la vista de los datos climáticos del observatorio meteorológico, se optó por subdividir el año ficticio en tan sólo dos ciclos: Primavera/Verano - Otoño/Invierno. Para definir ambos ciclos se seleccionaron los parámetros de temperatura y humedad basados no sólo en los valores medios, sino también en los máximos y mínimos que se alcanzan en

la localidad de Sevilla, y que soportaría un material de construcción expuesto a la intemperie. Dichos valores se incluyen en la Tabla XV.

Parámetros	Ciclo 1: Primavera/Verano:	Ciclo 2: Otoño / Invierno:
Humedad relativa	51%	72%
Rango de Temperaturas	5°C a 45°C	-5°C a 30°C
Segmentos:		
Rampa ascendente	90 minutos	135 minutos
Tramo constante	45°C = 150 minutos	45°C = 60 minutos
Rampa descendente	210 minutos	135 minutos
Tramo constante	5°C = 30 minutos	-5°C = 150 minutos
Ciclos de 8 horas	un total de 180 ciclos	un total de 180 ciclos.
Inicio de ensayo	11 Mayo 2001, 10:08 h	11 Julio 2001, 10:30 h
Fin de ensayo	11 Julio 2001, 10:08 h	11 Septiembre 2001, 10:30 h

TABLA XV: Parámetros de los ciclos utilizados en la cámara climática

En total, se introdujeron en la cámara 12 probetas (tres series de cuatro unidades cada una) de cada una de las cuatro formulaciones antes mencionadas, extrayéndose tras cada ciclo (de un total de dos ciclos):

- 1º- Ciclo Primavera / Verano: 4 uds. × 4 formulaciones
- 2º- Ciclo Otoño / Invierno: 4 uds. × 4 formulaciones
- 3º- Ambos ciclos (1º + 2º): 4 uds. × 4 formulaciones

En lo sucesivo y para mayor brevedad se denominarán “ciclo verano” al ciclo Primavera / Verano, “ciclo invierno” al ciclo Otoño / Invierno, y “ciclo anual” a la suma de ambos.

Inmediatamente después de extraerse de la cámara tras la finalización de cada uno de los ciclos, las probetas se han ensayado a flexión (ensayo de tres puntos), mostrándose los resultados obtenidos en el apartado III.3.3.

III. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

III.1. ELABORACIÓN DEL MORTERO

III.1.1. *La resina*

Como ya se ha comentado anteriormente, todas las mezclas se han realizado con una resina duroplástica, concretamente a base de poliéster no saturado o insaturado. La elección de la resina de poliéster se ha basado en el análisis realizado en el estado de la cuestión, ya que es la más utilizada actualmente por todos los investigadores y expertos en construcción debido a su magnífica relación calidad/precio.

De entre las resinas comerciales disponibles se han seleccionado dos: una de tipo ortoftálica y otra de tipo isoftálica. Ambas se comercializan de forma líquida, bajo las siguientes denominaciones comerciales:

- ESTRATIL AL-100 (la ortoftálica) y
- ESTRATIL 66-03 (la isoftálica).



Figura 11. Materiales utilizados para la fabricación del mortero polimérico

Sus características principales se encuentran definidas en las Tablas XVI Y XVII.

Denominación comercial	ESTRATIL AL-100	ESTRATIL 66-03
Resina	Poliéster ortoftálica	Poliéster isoftálica
Tipo	Tipo semirígido Reactividad media Viscosidad baja	Tipo rígido Reactividad alta Viscosidad baja
Estado	Líquido	Líquido
Contenido de monómero (estireno)	33%	38%
Aspecto	casi incoloro	ámbar claro
Peso específico (UNE 48098)	1.12 g/cm ³	1.11 g/cm ³
Índice de acidez (UNE 53072)	24	15
Conservación a 25°C en envase cerrado	6 meses	6 meses

TABLA XVI: Características de la resina en estado líquido

Las resinas comerciales UP ven mejoradas sus características mecánicas con refuerzos, consiguiéndose con ello aumentos sustanciales de resistencias mecánicas, módulo elástico, etc., dependiendo mucho de las propias características de los refuerzos, adherencia, proporciones, granulometría y humedad. En el caso de la resina ortoftálica el fabricante simplemente enuncia en la ficha de características técnicas de la resina que se trata de una resina normal, para usos generales, con posibilidades de aplicación muy extensas. En el caso de la isoftálica, el fabricante destaca en la ficha que se emplea en piezas con mejorada resistencia a la intemperie y humedad. Además es adecuada para fabricar recipientes alimenticios, especificándose: agua, leche, vinagre, etc.

Denominación comercial	ESTRATIL AL-100	ESTRATIL 66-03
Densidad	1.20 g/cm ³	1.20 g/cm ³
Propiedades mecánicas:		
Resistencia a Tracción (UNE 53023)	60 MPa	60 MPa
Resistencia a la flexión (UNE 53022)	110 MPa	115 MPa
Módulo de flexión (UNE 53022)	4500 MPa	4200 MPa
Propiedades Térmicas:		
Tª deformación bajo carga	55 °C	80 °C
Coefficiente de dilatación lineal (UNE 53126)	60×10^{-6} m/m °C	70×10^{-6} m/m °C

TABLA XVII: Características de la resina polimerizada

Este tipo y marca de resina se ha venido utilizando durante varios años en el laboratorio del Departamento, por lo que su manejo básico resulta conocido para los operadores. El producto se maneja en estado líquido. El proceso de polimerización se inicia por adición de un iniciador o catalizador, y se activa la resina que comienza a reticular en frío, a temperatura ambiente. La duración del proceso puede controlarse y acortarse mediante sustancias acelerantes, incrementos de temperatura, presión, rayos UV, todos ellos posibles de aplicar en instalaciones industriales, no así en el caso de realizaciones in situ.

Como catalizador se ha utilizado siempre el recomendado por el suministrador de la resina: PEROXIDO DE MEK (esencialmente peróxido de metiletilcetona con un 33% de ftalato de dimetilo), añadido en un 3% del peso total del ligante.

En el curso de esta investigación el proceso de polimerizado de la resina que posibilita el fraguado y endurecimiento se ha realizado indistintamente:

- a temperatura y humedad ambiente (en época de clima seco)
- mediante curado en estufa durante tres horas a 80°C (en época de lluvias)

En función de las condiciones ambientales, el fraguado de estas resinas sin presencia de refuerzos se suele producir en pocos minutos.

A pesar de tratarse de un producto industrial y supuestamente homogéneo, en el transcurso de la investigación hemos podido comprobar que los tiempos de fraguado varían ligeramente para el mismo tipo de resina de uno a otro envase. Incluso se ha dado el caso de una resina que no iniciaba la reacción de polimerización Puestos al habla con el suministrador, éste lo achacaba a la escasa presencia del acelerante en la mezcla, defecto que al parecer se da en ciertas ocasiones en los suministros.

A la vista de los problemas surgidos se optó por realizar unas probetas de control sólo con resina y catalizador al 3% para cada nuevo acopio de resina. El tiempo de fraguado y endurecimiento real en el caso de resina pura (sin árido), oscilaba entre los 20-25 minutos.

III.1.2. Los áridos

El tipo de árido utilizado provino siempre de la misma clase de roca fragmentada: roca de albero escogida en una cantera en explotación de la localidad de Alcalá de Guadaira (Sevilla), comercializado como albero molido en sacos de 50 Kg. Se trata de una roca calcoarenita, de tipo arenisca, absorbente y drenante (Figura 12).

En las primeras investigaciones se utilizó el albero preparado con una granulometría dentro de los husos granulométricos admitidos internacionalmente para preparar morteros de alta compacidad.

Posteriormente se decidió utilizar el albero “bruto”, eliminando únicamente los tamaños superiores del árido. Se utilizó árido con un TMA inferior a los 4 mm, eliminando por cribado los tamaños superiores, aunque se ha observado que no siempre mantienen la misma granulometría.



Figura 12. Albero secado para la fabricación del mortero polimérico

La densidad real del albero determinada sobre albero seco tiene como valor medio operativo $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Granulometría del Albero
% que pasa

Tamiz	Lote 1	Lote 2	Lote 3
4 mm	96.9	97.8	99.3
2 mm	82.0	90.4	87.3
1mm	59.4	78.9	52.8
250 μ	6.3	29.0	8.1
125 μ	1.2	1.9	2.6
63 μ	0.2	0.5	0.8

TABLA XVIII: Características de los diferentes lotes de albero: granulometría

Una vez comprobado el huso granulométrico natural se decidió no modificarlo, puesto que se conseguía una compacidad aceptable en relación con los posibles costes de cribado del material. Así pues, se ha utilizado la granulometría natural del árido, suministrado por la cantera para simplificar todo lo posible el proceso de fabricación. Se han tomado siempre los tamaños menores de 4 mm (Figura 13).



Figura 13. Tamizado del albero para la fabricación del mortero polimérico

A lo largo de la dilatada fase experimental fue necesario requerir al suministrador nuevas cantidades de albero que fueron recepcionadas en diversas épocas del año. El cambio de color en cada una de ellas era patente, como en el caso de cualquier material de cantera lo que provocó probetas de muy diversos tonos (Figura 14).

A cada uno de los acopios se le controló la granulometría (Tabla XVIII), así como la humedad presente en el árido (Tabla XIX).

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Humedad	5 %	9 %	11 %

TABLA XIX: Características de los diferentes lotes de albero: porcentaje de humedad en peso

Se ha controlado siempre el contenido de humedad del árido en porcentaje de peso. En época de clima seco el árido se suministraba con un 5% de humedad. En época de lluvias el contenido de humedad del árido suministrado por la cantera llegó a ser hasta del 17,8% (en estas ocasiones no podía considerarse árido húmedo sino más bien “mojado “). En este último caso fue suficiente el secado del mismo extendido en bandejas en el laboratorio durante dos semanas para descender a los niveles de humedad anteriores. Para los áridos acopiados en el laboratorio (a cubierto y ensacados) durante al menos seis meses, en estación seca se detectó una bajada de la humedad presente en el albero de hasta el 1,8%.



Figura 14. Distintos patrones de color en probetas de mortero polimérico de albero

Acercas de la influencia de la humedad en las características de los morteros poliméricos se viene tratando desde las primeras investigaciones, de ahí el interés presente en ésta de determinar la importancia real de dicho parámetro en este PM específico.

Para las probetas de árido seco se introdujo el árido en la estufa a 50°C durante el tiempo necesario para perder toda su humedad, es decir, hasta llevarlo a peso constante entre dos pesadas sucesivas.

En la Tabla XX se detallan las series de probetas realizadas con cada acopio de árido para controlar la variabilidad de humedad y granulometría.

	Albero	Lote 1	Lote 2	Lote 3
n° Serie	Prismáticas	1-6	7-18	19-32
	Cilíndricas	1-10	11-23	24-27
	Baldosas	1-7	8-12	13-17

TABLA XX: Albero utilizado en cada una de las series de probetas fabricadas.

III.1.3. El mortero. Dosificaciones

Aunque en los primeros trabajos realizados en el laboratorio se ensayaron distintas dosificaciones de resina y distintos tipos de cargas añadidas al ligante, en esta investigación se prefirió mantener la dosificación de resina constante y sin ningún tipo de carga, para así poder determinar exactamente la influencia de los restantes factores.

En aquellos primeros trabajos se ensayaron mezclas con dosis decrecientes de resina, desde la relación expresada en peso 1:5 hasta 1:1,5, escogiéndose la relación 1:4 que fue

la que resultaba de más fácil manejo y aseguraba la máxima compacidad efectiva de la mezcla. La relación ligante/árido 1:4, es decir, 20% del peso total de resina o ligante, y 80% de árido, es la más utilizada además en la mayoría de trabajos experimentales y aplicaciones reales de los morteros poliméricos.

En dosificaciones más ricas en resina se advierte siempre un reparto poco uniforme de la resina del PM, que aparece en exceso, acumulándose generalmente en la parte inferior de las probetas donde acaban produciéndose zonas con diferencia de brillo. En el caso de dosificaciones menores, la escasez de resina se deja notar tanto en dificultades de amasado y moldeo como en el PM resultante: luego de polimerizado aparece suelto y pobremente conglomerado.

La proporción de ligante en los PM depende mucho del TMA (Sandrolini, 1995). El porcentaje de resina puede variar entre el 8-18% (en volumen) para morteros y hormigones poliméricos con tamaño máximo del árido hasta 100 mm, siendo menor el porcentaje de resina a medida que aumenta el tamaño máximo del grano.

En cuanto a las cargas que se utilizaron en las primeras investigaciones, se partió de la premisa de que su uso no habría de producir alteraciones en el acabado final de los morteros, lo que unido a la lógica disminución del porcentaje de resina contribuiría a una disminución de sus costes. Finalmente se desechó el empleo de las mismas (Olivares 1998).

De acuerdo con algunos datos presentes en la bibliografía estudiada (Demura 1995), no se observan diferencias significativas en la resistencia a flexión y la resistencia a compresión calculada para series de probetas iguales, en morteros modificados con polímero, tamaño máximo de árido 5 mm, preparados a mano, frente a otros con mezcladora mecánica.

El hecho de utilizar un amasado manual y compactaciones no homogéneas ni demasiado altas puede considerarse una hipótesis conveniente desde el punto de vista técnico: a mano y sin sistemas mecánicos de compactación se colocan los

revestimientos en obra y para producciones no muy altas el moldeo manual es lo económicamente recomendable. Esto implica que, consiguiendo un mejor mezclado y compactación, se conseguirán mejores características, lo que no impide su uso con las actuales si presentan valores suficientes en los requerimientos para su empleo constructivo. Al igual que ocurre con la humedad, se pretende valorar si su influencia en las características finales del mortero es significativa como para justificar un mayor coste de producción.

Previamente al empleo del PM se determinaron las características del “tiempo de colada” también denominado *pot life*, es decir, el tiempo que transcurre desde el vertido hasta que después de iniciada la polimerización se pueda desmoldear el mortero sin problemas. En las condiciones observadas en el laboratorio se comprobó que este tiempo de “fraguado” (por analogía con los morteros convencionales) puede variar bastante en función de las condiciones ambientales. Incluso se llega a constatar que en época de invierno, con bajas temperaturas y elevada humedad, se inhibe totalmente el proceso de polimerización, lo que hace necesario la utilización del curado controlado en estufa.

El tiempo de colada también depende de la superficie expuesta del mortero en el molde, así como del espesor de mortero vertido en el mismo. En este trabajo, para las probetas de gran superficie expuesta y poco espesor se necesitó mantener el polialbero en los moldes de 24 a 48 horas. Las probetas prismáticas se pudieron desmoldear con edades de 3 a 7 días, mientras que las cilíndricas necesitaron de 7 a 10 días. En estas últimas la superficie en contacto con el ambiente del mortero era mucho menor (la cara superior del cilindro), y en consecuencia mayor el tiempo de permanencia en el molde. Éste fue uno de los motivos que indujo a utilizar moldes de PVC, mucho más baratos y en consecuencia disponibles en mayor número.

En las posibles aplicaciones industriales del material investigado, estos tiempos de permanencia en el molde podrían acortarse notablemente mediante el empleo de acelerantes, temperatura, radiación UV u otras aportaciones de energía.

Con el fin de conocer las características de las mezcla se realizaron determinaciones o ensayos de naturaleza física, mecánica y química, con cuyos resultados se pueden establecer comparaciones con otros materiales, como los morteros convencionales.

III.1.4. Denominación de las probetas

Para la denominación de las probetas se ideó un código de identificación lo más sencillo posible, pero que permitiera reconocer individualmente a cada una de ellas en cada momento. A modo de ejemplo se muestra la Tabla XXI:

Tipo Probeta	Cilíndrica	Prismática	Baldosa	Losa
Ejemplo	C12-08 OW	P 12-06 OS	B 25-10 IW	L 01-06 IS

TABLA XXI: Ejemplos de denominaciones de probetas de polialbero

La primera letra del código de identificación se refiere a la forma de la probeta; la primera cifra, a la sesión de trabajo en la que fue fabricada y la segunda, al número asignado a la probeta dentro de esa sesión. Las dos últimas letras corresponden al tipo de resina y árido utilizado según la designación anteriormente reseñada. Cada tipo de probeta seguía su propia numeración en cuanto al número de sesiones, por lo que es posible encontrar dos probetas de diferente forma con las mismas cifras en su numeración, pero no es posible encontrar códigos idénticos.

Además de cada sesión de trabajo se elaboraron una serie de fichas donde se indicaron:

- Fecha/hora de fabricación.
- Tipo de resina, ortoftálica o isoftálica, así como el acopio al que pertenece.
- Tipo de albero, indicando si se trataba de albero húmedo o seco y número de acopio.
- Número de probetas realizadas, con la denominación de cada una de ellas.

- Proceso de curado.
- Incidencias en el desencofrado.

III.1.5. Fabricación de las probetas

Como metodología operativa para la preparación de las mezclas de PM se decidió el siguiente procedimiento:

1. Preparación del árido con anterioridad al inicio de la sesión, cribado y secado en su caso.
2. Preparación del ligante, mezclando en un recipiente la cantidad prevista de resina UP (en peso), con la proporción de catalizador requerida 3% (en peso). A continuación, la mezcla se remueve con espátula continuamente hasta que se aprecia un cambio en su tonalidad.



Figura 15. Polialbero: aspecto final del mortero, antes de ser colocado

3. Una vez dispuesta la mezcla, se vierte sobre ella la proporción necesaria de árido, amasando ambos componentes de forma continua y muy lentamente.
4. Cuando se advierta que se ha conseguido una uniformidad de la amasada (Figura 15), se vierte sin pérdida de tiempo en el molde, que debe haber sido encerado previamente para facilitar el desmoldeo.
5. Terminado de llenar el molde, se enrasa y se retira la mezcla sobrante. La compactación se realizará al terminar el llenado de cada una de las tongadas establecidas.
6. El molde lleno y compactado se mantiene en sitio protegido durante un tiempo no inferior a las 24 horas, desmoldeando posteriormente las probetas, una vez que están suficientemente endurecidas. Se procede al marcado e identificación de las mismas (Tabla XXII).

Tipo Probeta	Control UP	Cilíndricas	Prismáticas	Baldosas	Losas
Total probetas 612 uds	12	294	174	105	27

TABLA XXII: Detalle de unidades de probetas de polialbero fabricadas

A la hora de preparación de las probetas, se comenta por parte de los operadores que la parte más trabajosa de todo el proceso es el amasado de la mezcla (dificultad aún más notable en el caso de áridos secos), con la consiguiente falta de homogeneidad detectada en algunos casos en la masa.

En cuanto al nivel de trabajabilidad de la mezcla ha resultado ser muy variable: más difícil el amasado de los morteros a base de resina isoftálica que los de ortoftálica, pero más sencilla su colación y posterior compactado.

Por otra parte y como era previsible, los morteros de árido seco resultaron más difíciles de batir y mezclar con la resina que los de albero húmedo (al igual que ocurre con los morteros de cal o cemento, más dúctiles cuanto más húmedos). Sorprendentemente, la mayor consistencia de la mezcla hace que los PM de albero seco sean sensiblemente más fáciles de compactar.



Figura 16. Algunas de las diferentes probetas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A. expuestas antes de iniciarse los ensayos

Para el relleno de los moldes se vierte la mezcla con espátula, enrasando con ellas por la cara superior. Como sistema de compactación manual se estableció que los moldes prismáticos se compactarían con espátula en tres capas. La compactación de los moldes tipo baldosa se realizó con espátulas de mayor tamaño tipo llana, mientras que en los cilindros, su masa se compactó en dos togadas con ayuda de una varilla.



Figura 17. Probetas prismáticas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A. antes de iniciarse los ensayos

III.1.6. Curado y desencofrado

El curado de las probetas se realizó siempre a temperatura ambiente para las probetas cilíndricas, baldosas y losas. Estas condiciones han variado en temperatura y humedad a lo largo del año, según las circunstancias meteorológicas cambiantes.

Excepto en época de lluvias, donde el alto grado de humedad presente en los áridos y en el ambiente inhibe la polimerización (Aigrot, 1975), parece que el rango de temperaturas mínimas y máximas que se alcanzan en Sevilla permite la fabricación del material durante todo el año.

Uno de las mayores limitaciones para la preparación de las probetas ha sido el número de moldes disponibles, así como el tiempo de endurecimiento mínimo necesario para posibilitar el desencofrado. Esto fue lo que provocó que en el caso de las probetas prismáticas, forzado por la limitación de los moldes disponibles (Figura 18) se utilizase

el método de curado a temperaturas no demasiado altas (80°C) durante tres horas, inmediatamente después del llenado de los moldes. Esto ha permitido su rápido desencofrado (una vez enfriadas suficientemente) y ha posibilitado la rápida reutilización de los mismos.

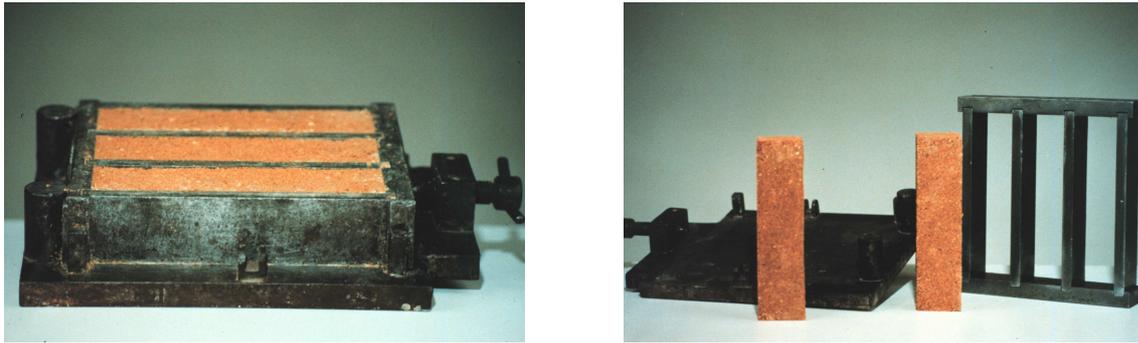


Figura 18. Moldes para la preparación de probetas prismáticas en los laboratorios de la E.T.S.A.

Además, al tratarse de moldes metálicos, no resultan afectados por las temperaturas de la estufa. Sin embargo los moldes no metálicos utilizados en otros casos (madera, PVC, látex, etc.) no presentan buena resistencia a esas temperaturas. No obstante, estos últimos presentan como ventaja su precio, significativamente más barato.

Por lo tanto se decidió introducir este parámetro como una más de las variables a contrastar en la investigación. En resumen, las probetas prismáticas de las series 1 a la serie 19 (Figura 17) han sido curadas en las condiciones normales del laboratorio: temperatura y humedad ambiente (curado *en frío*), sometidas a las condiciones climáticas del momento. Las probetas de las series 20 a 32 han sido curadas en horno durante 3 horas a 80°C (curado *en caliente*).

Este método de curado se ha utilizado ampliamente para la producción en factorías de placas de pizarra artificial a base de áridos de pizarra y resina de poliéster (Aigrot, 1975). En este caso, tras 12-14 minutos a 80°C es posible desmoldear (utilizando

moldes realizados con elastómeros), lo que permite la rápida reutilización de los moldes. Sin embargo, es necesario mantener esa temperatura algunas horas más para completar el curado, lo que en la bibliografía se denomina un postcurado (realizado fuera del molde).

Algunos autores señalan en sus investigaciones, (Chawalwala, 1996) que los valores de resistencia a flexión de probetas curadas en el horno (80°C) frente a los de probetas curadas a temperatura ambiente son estadísticamente indistinguibles. En general, es muy utilizado en muchas de las investigaciones estudiadas (Okada, 1975) el procedimiento de curado a temperaturas de 80-90 °C durante 3 o 4 horas.



Figura 19. Probetas cilíndricas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A. antes de iniciarse los ensayos

Para el desencofrado resulta imprescindible una buena preparación previa de los moldes: untarlos con abundante cera, en una capa homogénea y bien extendida. Este

tipo de desencofrante ha dado buen resultado para todos los tipos de molde utilizados (metálicos, de madera, de PVC, de látex, etc.). Se han realizado, además, ensayos con un desencofrante polivinílico, en presentación líquida, pero los resultados fueron peores que los obtenidos con la cera.

En cuanto a la retracción que se ha observado experimentalmente en las probetas hechas con albero húmedo, ésta es mucho mayor que en las realizadas con árido seco. Así mismo, mientras que la resina ortoftálica produce expansión de la mezcla (lo que requería un segundo enrase de las probetas una vez vertidas en el molde), la isoftálica produce expansión en un primer momento, y posteriormente retracción, conservando prácticamente el volumen en el molde.

Este fenómeno de dilatación inicial entre la 1ª y 5ª hora de curado ya había sido observado por Martín *et al.* (1996) que señalan una dilatación inicial de 0,2 ‰ y que finalmente desaparece. Señalan que esto puede deberse a que, durante el proceso de entrecruzamiento de las cadenas de polímeros (ordenación), el volumen final es considerablemente inferior al inicial (formación de enlaces covalentes, con distancia intermolecular inferior a la de las fuerzas de Van der Waals). No obstante, en la primera fase, por efecto del calor generado como consecuencia de la formación de la red tridimensional polimérica, se genera una pequeña dilatación al aumentar, en conjunto, la temperatura del material.

III.1.7. Normativa y metodología de ensayos

A diferencia de los materiales tradicionales, donde ya existe una importante sistemática en cuanto a control de calidad se refiere, los materiales compuestos carecen de una normativa básica de obligado cumplimiento que pueda servir de referencia para establecer el pertinente programa de calidad tanto para el control intrínseco de los mismos, así como especialmente para su recepción y ejecución. Existe una exhaustiva normativa en otros materiales tales como piedra, ladrillo, hormigones de cemento, etc.,

mediante las cuales se establecen unos parámetros tales como resistencia a compresión, a tracción, al desgaste, etc., que permiten conocer las características constructivas de los mismos.

Por ello, previamente a la elección de la metodología a seguir para los ensayos, ha sido necesario determinar cuales eran la normativa o especificaciones acordadas para dichos ensayos. Además se contaba con el condicionante de la instrumentación realmente disponible en los laboratorios del Departamento.

De hecho, una cuestión todavía por resolver adecuadamente es todo lo referente a una normativa y metodología de ensayos para los PM que sea admitida como de utilidad por los profesionales de la Construcción para controlar la calidad de los PM y como base de comparaciones objetivas con otros materiales de construcción.

Como normativa específica sobre el tema, se conoce la publicación realizada tras el congreso del RILEM celebrado en Bélgica en 1995 (RILEM TC 113-CPT) sobre propiedades y métodos de ensayo de hormigones con polímeros a modo de propuestas de norma para morteros poliméricos denominadas “*Standards PC*”.

Estas recomendaciones (un total de 13) se refieren tanto a los procedimientos para realizar la mezcla, probetas, determinación de la resistencia a compresión, flexión, cortante, módulo elástico, absorción de agua y otros. Todas ellas se han seguido específicamente para los ensayos realizados en esta investigación.

Sin embargo, para algunas de las propiedades evaluadas, al no existir metodología de ensayos específica para PM, ha parecido oportuno recurrir a ensayos disponibles para otros materiales de construcción, de características de uso similares a los que se pretenden para este mortero polimérico específico: normativas existentes para baldosas en el caso de la resistencia a desgaste por abrasión, resistencia a ataques químicos y manchas.

III.2. PROPIEDADES MECÁNICAS: RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En este apartado se describe la realización de los ensayos encaminados a determinar la resistencia a compresión, la deformación y los valores del módulo elástico en el mortero polimérico objeto de investigación.

III.2.1. Introducción

En las investigaciones realizadas por Brocard (1967) sobre las características de los morteros y hormigones polímeros hechos con áridos silíceos se afirma que, si bien no es difícil encontrar dosificaciones de PM adecuadas para asegurar resistencias a flexión del orden de los 30 MPa, es muy difícil que sus resistencias a compresión resulten superiores a los 120 MPa. Se plantea la hipótesis de que las roturas producidas por cargas muy altas acaso se deban a fallos en los áridos. Igualmente se observa que apenas se nota variación de las características para temperaturas inferiores a los 50 °C, pero que a temperaturas superiores se detecta una disminución significativa de las resistencias mecánicas en relación con los valores medidos a 20-30 °C. En estos estudios iniciales también se incluyeron PM hechos con áridos ligeros de arcilla expandida.

Investigaciones más recientes (Kyriacos, 1991) señalan resistencias a compresión de 99,3 MPa para morteros a base de resinas UP, también realizados con áridos silíceos, que pueden alcanzar cotas de hasta 106 MPa si se añaden fibras de refuerzo.

Otros autores (Chawalwala, 1996) establecen márgenes más amplios, determinando que para morteros poliméricos realizados con resinas UP las resistencias a compresión están comprendidas entre los 78-157 MPa, especificándose un módulo de elasticidad de 14 a 34,3 GPa.

La resistencia a compresión es indicativa de la calidad mecánica de un mortero y resulta interesante cuantificar su valor como dato para evaluar su durabilidad y, en el caso de

deterioro del material, el alcance del mismo cuantificándolo como pérdida de resistencia.

Un parámetro indicativo de la rigidez es el módulo elástico que se determina según la norma RILEM PC-8 TC-113. Si se desean ambos parámetros (resistencia a compresión y módulo elástico) hay que realizar dos ensayos diferentes. Para evitar esto se han realizado las roturas a compresión midiendo las deformaciones unitarias de las probeta y así poder obtener el módulo elástico en el mismo ensayo. La pendiente de la recta de regresión es el valor del módulo elástico.

III.2.2. Metodología

Para la determinación de la resistencia a compresión y el módulo elástico en probetas se ha utilizado una prensa multiensayo de 300 KNewton, de la casa Codein S.L., modelo MCO-30, nº de serie 139 (Figura 21). Esta prensa proporciona la carga de rotura y la deformación de la probeta, estando adaptada a un software que permite el control del ensayo y la salida de datos por pantalla, impresora o archivo. Estos archivos posteriormente pueden ser importados desde programas de tratamiento de datos, como son una hoja de cálculo o una base de datos, lo que facilita el análisis de los mismos (Figura 20).

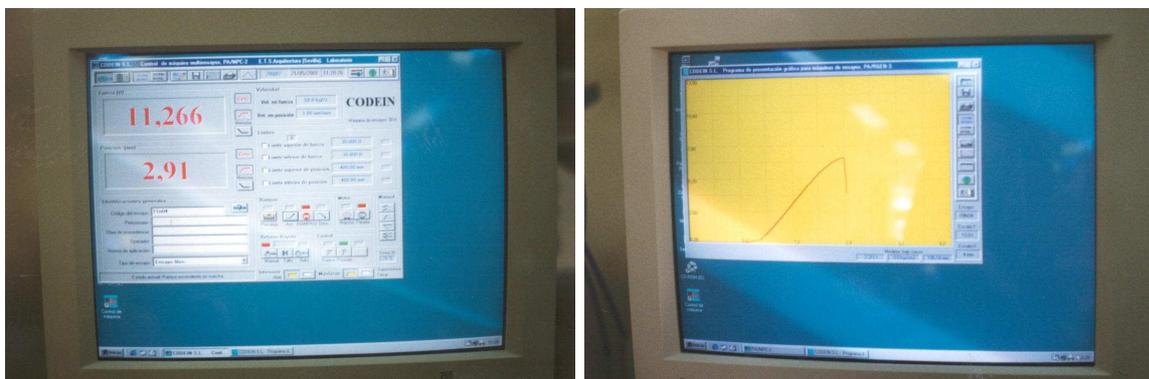


Figura 20. Salida de datos de prensa por pantalla y curva carga/deformación de la probeta ensayada a compresión

Se ha determinado la resistencia a compresión en dos tipos diferentes de probetas: probetas cilíndricas (tal y como se especifica en las normas RILEM PC-5, TC 113-CPT) y en las dos mitades de cada una de las probetas prismáticas, una vez rotas a flexión. Este último ensayo se corresponde con lo especificado en la norma UNE 83-821-92 para la determinación de las resistencias a compresión de morteros utilizados para revocos y revestimientos, tanto a base de cal como de conglomerante hidráulicos, no existiendo norma UNE específica en este caso para los morteros poliméricos o de polímeros.

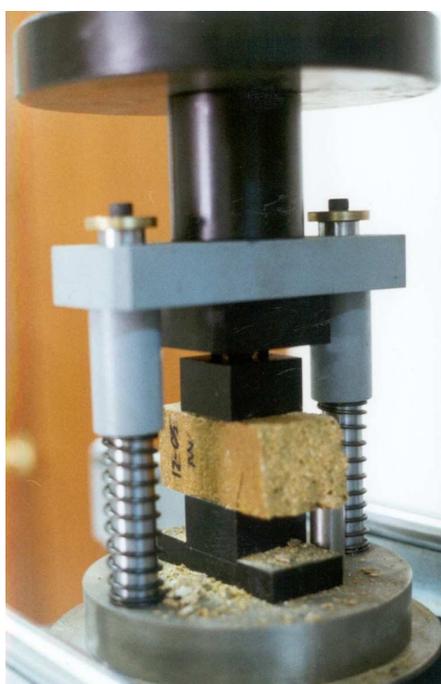


Figura 21. Prensa multiensayo para ensayos de compresión en probetas prismáticas

En el caso de las probetas cilíndricas se ha comprobado que, aunque la dimensión normalizada de $100 \times \varnothing 50$ mm no se cumplía en la mayoría de los casos (debido a la utilización de moldes no normalizados de PVC), sí se cumplía que la relación entre la longitud y el diámetro medio de la probeta era sensiblemente igual a 2, por lo que, siguiendo las especificaciones de la norma UNE 83304:1984. *Ensayos de hormigón. Rotura por compresión* para hormigones de cemento, no es necesario aplicar ningún

factor de correlación a los resultados obtenidos. Las caras superior e inferior de cada cilindro fueron refrentadas con azufre para eliminar las irregularidades y con ello reducir la posibilidad de cargas excéntricas.

De acuerdo con las especificaciones de RILEM PC-5, TC 113-CPT 1995, la velocidad de carga ha sido de 0.5 MPa/s.

Tanto para las probetas cilíndricas como para las prismáticas se han fabricado y clasificado diversas series, denominadas las primeras *probetas de control* (ensayadas una vez endurecidas con 2 meses de edad), y otras ensayadas tras 3 y 6 meses de exposición a la intemperie. Cada una de las series contiene probetas de distintas hornadas, lo que explica en algunos casos la disparidad de resultados, pero permite controlar a su vez la evolución de cada hornada a lo largo del tiempo. Para determinar el efecto de la humedad en la resistencia del PM se ensayaron tantas probetas realizadas con árido húmedo como con árido seco, con ambos tipos de resina.

Cada probeta se carga según su eje longitudinal, a velocidad constante para evitar cualquier efecto dinámico. La carga mayor alcanzada por cada una de las probetas se divide por su sección transversal para determinar la tensión de rotura.

En el apartado siguiente se muestran los valores de tensión y deformación unitaria obtenidos al realizar los ensayos. Se muestra la representación gráfica de los datos, tabla con los valores medios y la ecuación de la curva de regresión con los parámetros estadísticos correspondientes.

III.2.3. Resultados probetas cilíndricas

PROBETAS DE CONTROL		INTEMPERIE 3 MESES		INTEMPERIE 6 MESES	
OW	rotura	OW	rotura	OW	rotura
C 14-12	15,18	C 27-10	15,20	C 14-10	19,60
C 05-08	25,61	C 05-10	28,10	C 05-05	23,20
C 05-06	23,81	C 06-01	16,60	C 27-06	24,90
C 06-07	14,32				
C 21-07	19,03				
C 03-09	17,94				
Medias	19,31	Medias	19,97	Medias	22,57
Desviación estándar	4,56	Desviación estándar	7,08	Desviación estándar	2,71
Intervalo de conf. 90%	3,06	Intervalo de conf. 90%	6,72	Intervalo de conf. 90%	2,57
OS	rotura	OS	rotura	OS	rotura
C 20-06	14,87	C 20-07	16,70	C 20-08	20,70
C 10-10	18,14	C 25-09	45,30	C 25-15	40,50
C 22-15	36,65			C 27-17	31,60
C 25-14	50,78				
C 25-04	61,86				
Medias	36,46	Medias	31,00	Medias	30,93
Desviación estándar	20,32	Desviación estándar	20,22	Desviación estándar	9,92
Intervalo de conf. 90%	14,95	Intervalo de conf. 90%	23,52	Intervalo de conf. 90%	9,42
IW	rotura	IW	rotura	IW	rotura
C 15-05	22,45	C 15-09	30,30	C 23-10	31,00
C15-04	28,51	C 12-09	29,90	C 24-20	26,20
C 23-09	29,40	C 23-16	33,60	C 08-09	30,20
C 24-12	30,23				
C 08-06	30,54				
C 11-06	28,26				
Medias	28,23	Medias	31,27	Medias	29,13
Desviación estándar	2,97	Desviación estándar	2,03	Desviación estándar	2,57
Intervalo de conf. 90%	2,00	Intervalo de conf. 90%	1,93	Intervalo de conf. 90%	2,44
IS	rotura	IS	rotura	IS	rotura
C 18-09	13,88	C 18-12	32,00	C 18-01	23,50
C 26-09	43,02	C 26-13	51,50	C 26-08	57,30
C 11-10	29,96	C 09-13	39,50		
C 09-10	46,70				
C 16-04	17,22				
Medias	30,16	Medias	41,00	Medias	40,40
Desviación estándar	14,76	Desviación estándar	9,84	Desviación estándar	23,90
Intervalo de conf. 90%	10,86	Intervalo de conf. 90%	9,34	Intervalo de conf. 90%	27,80

TABLA XXIII: Ensayo de resistencias a compresión probetas cilíndricas. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascales)

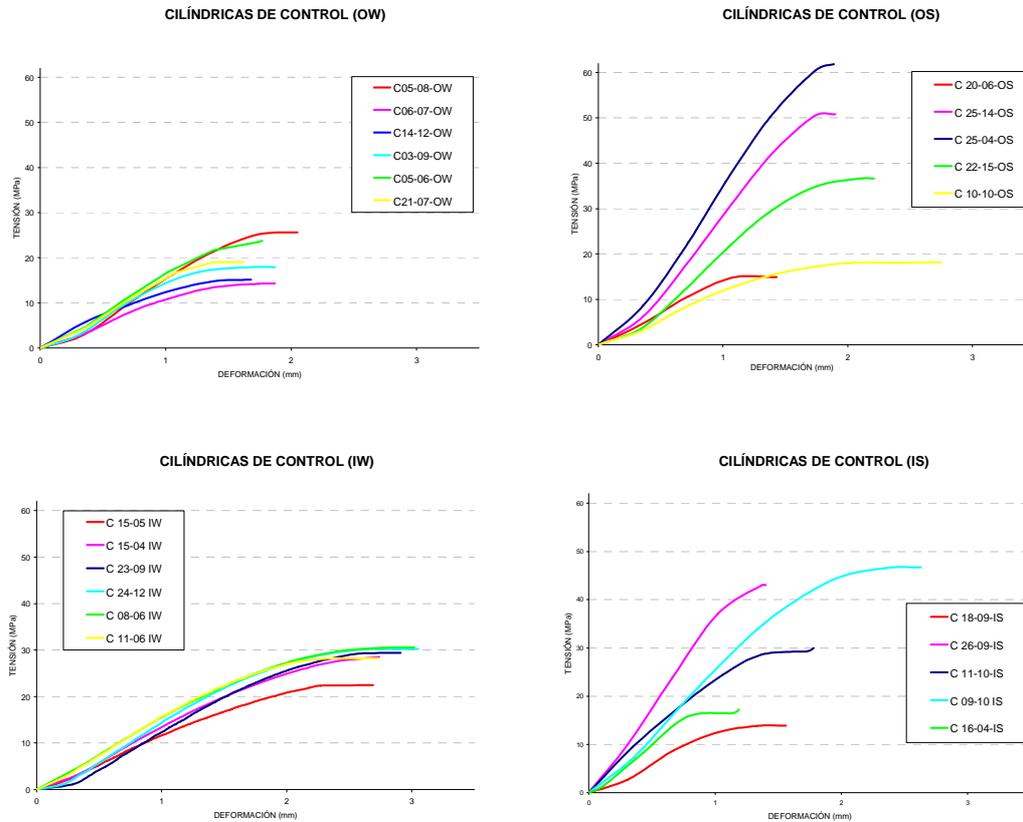


Figura 22. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas de control

En primer lugar se han presentado los datos de rotura a compresión de probetas cilíndricas. Para ello se han agrupado en una sola tabla (Tabla XXIII) los resultados de las probetas ensayadas, clasificadas según su dosificación y edad para facilitar su comparación. Se han mostrado los datos de tensión de rotura de cada una de las probetas ensayadas, lo que permite controlar la evolución de probetas pertenecientes a la misma hornada a lo largo del tiempo.

Así mismo, la vista de los datos disponibles se puede evaluar la dispersión de valores obtenidos, y la exactitud de los parámetros estadísticos calculados.

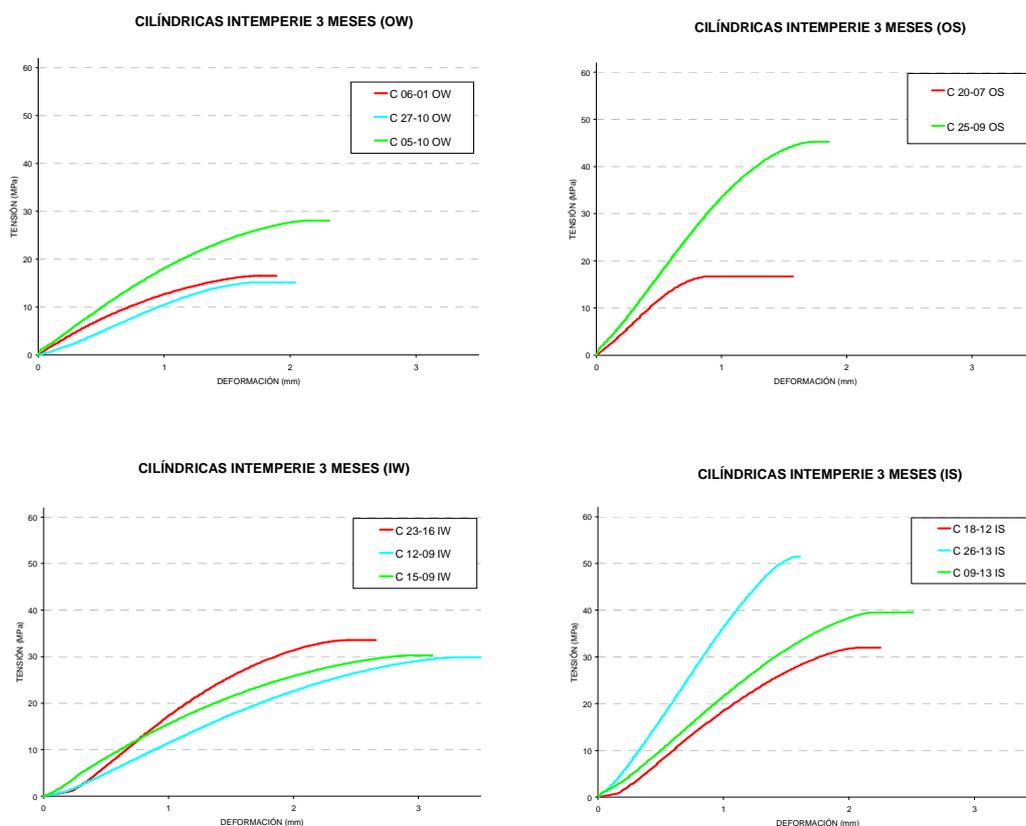


Figura 23. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas tras tres meses a la intemperie

A continuación se presentan las curvas tensión-deformación de todas las probetas ensayadas, clasificadas según la dosificación de resina y árido utilizada en cada caso (resina ortoftálica/isoftálica, árido húmedo/árido seco) así como según la edad de las probetas: de control, tras exposición de tres meses a la intemperie y tras seis meses de intemperie.

Las probetas de control se representan en la Figura 22. La Figura 23 representa las probetas ensayadas tras una exposición a la intemperie durante tres meses, de Abril a Junio de 2001. La Figura 24 representa las probetas ensayadas tras una exposición a la intemperie durante seis meses, de Abril a Septiembre de 2001.

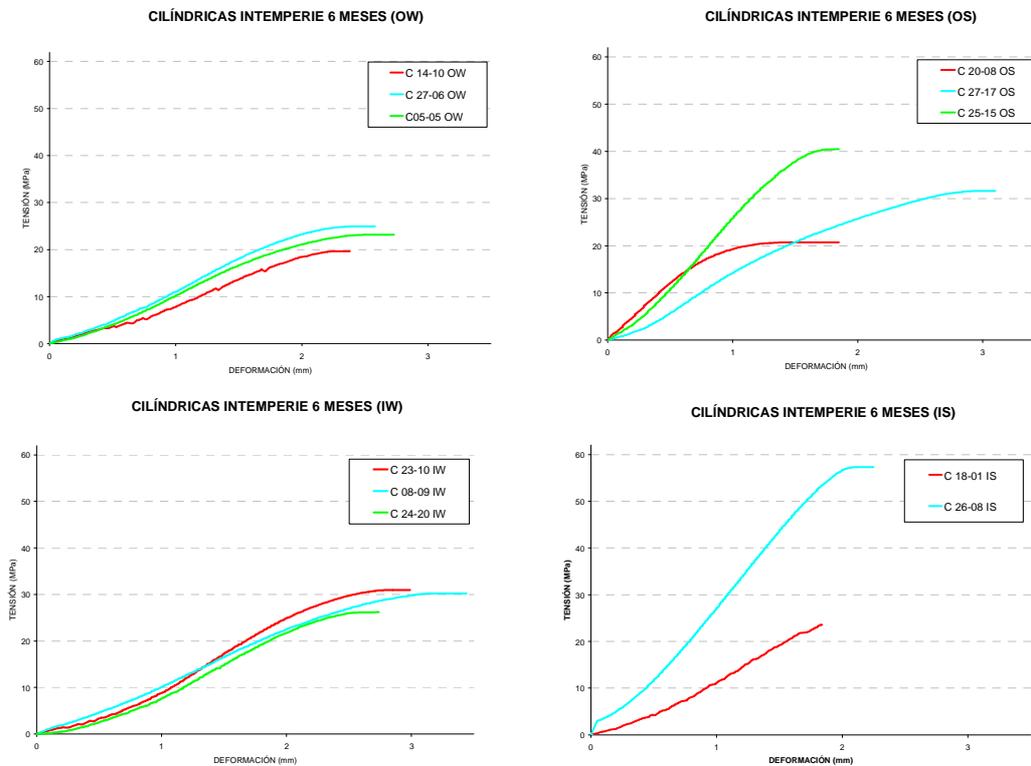


Figura 24. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas tras seis meses a la intemperie

Para cada una de las tres edades señaladas se presentan agrupadas en una sola figura las cuatro gráficas tensión deformación correspondientes a probetas de cada una de las dosificaciones: OW/OS/IW/IS. De este modo es posible confrontar el comportamiento del material para cada una de las edades estudiadas en todas las dosificaciones ensayadas.

A continuación, en las Figuras 26 a 28, se muestran las curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas en cada uno de los casos: probetas de control, y tras tres y seis meses a la intemperie.



Figura 25. Rotura de probetas cilíndricas de control de cada una de las dosificaciones ensayadas a compresión, correspondientes a la Figura 22

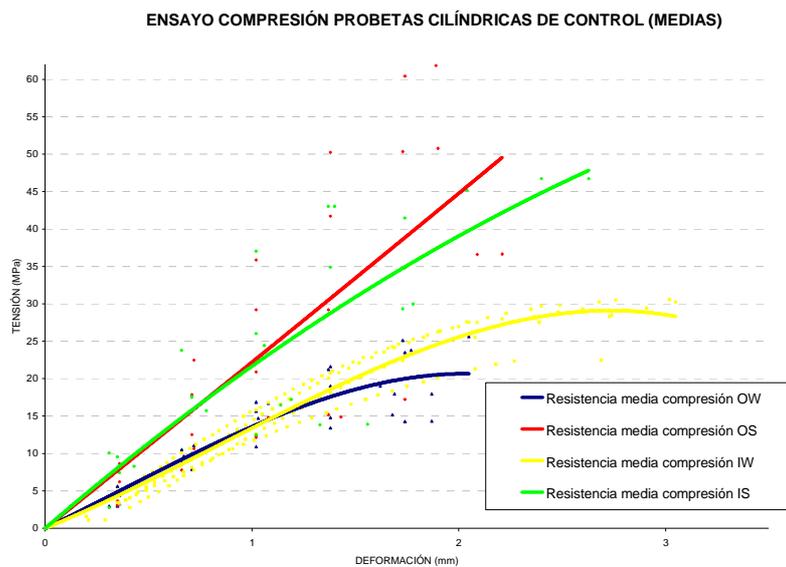


Figura 26. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas de control

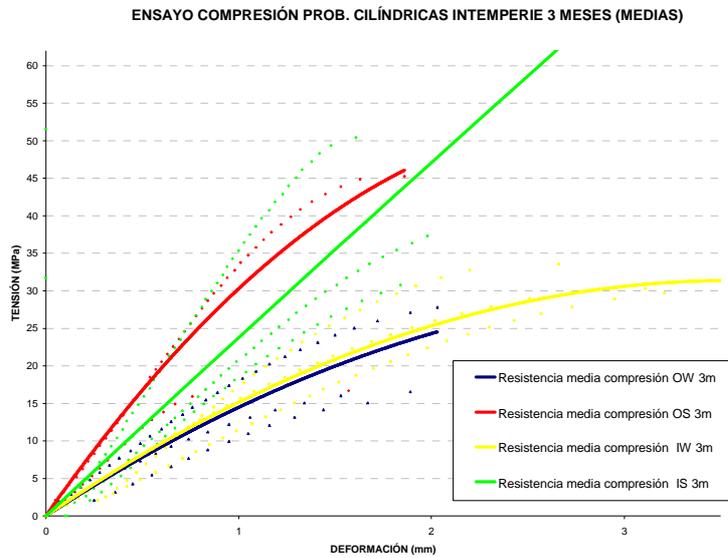


Figura 27. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas tras tres meses a la intemperie

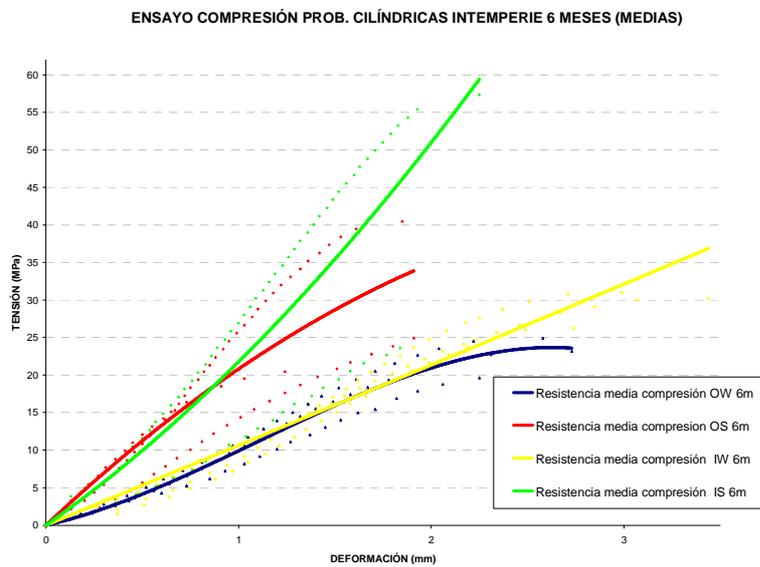


Figura 28. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas tras seis meses a la intemperie

III.2.4. Resultados probetas prismáticas

PROBETAS DE CONTROL		INTEMPERIE 3 MESES		INTEMPERIE 6 MESES	
OW	rotura	OW	rotura	OW	rotura
P 10-03	32,89 30,41				
P 31-04	45,64 46,39	P 31-03	40,05 39,51	P 31-01	44,55 47,53
P 17-03	51,40 67,95			P 17-05	29,92 21,83
P15-01	29,83 36,39	P15-06	50,87 44,29		
Medias	42,61	Medias	43,68	Medias	35,96
Desviación estándar	13,03	Desviación estándar	5,25	Desviación estándar	12,16
Intervalo de conf. 90%	7,58	Intervalo de conf. 90%	4,32	Intervalo de conf. 90%	10,00
OS	rotura	OS	rotura	OS	rotura
P 08-06	34,14 37,41				
P 09-04	43,06 43,31	P 09-01	43,10 42,38		
P 14-01	30,89 43,67	P 14-03	52,64 56,47	P 13-01	56,91 51,36
P 16-05	27,79 32,02	P 16-01	45,09 60,45	P 16-04	44,52 44,08
Medias	36,54	Medias	50,02	Medias	49,22
Desviación estándar	6,26	Desviación estándar	7,59	Desviación estándar	6,12
Intervalo de conf. 90%	3,64	Intervalo de conf. 90%	5,09	Intervalo de conf. 90%	5,03
IW	rotura	IW	rotura	IW	rotura
P 12-02	51,91 52,76				
P 12-05	45,71 45,54	P 12-06	52,03 52,86	P 23-01	25,93 30,74
P 25-01	41,90 41,44			P 25-03	19,96 23,24
P 24-01	47,55 47,90	P 24-04	42,88 41,09	P 24-05	35,82 48,18
Medias	46,84	Medias	47,22	Medias	30,65
Desviación estándar	4,12	Desviación estándar	6,09	Desviación estándar	10,25
Intervalo de conf. 90%	2,40	Intervalo de conf. 90%	5,01	Intervalo de conf. 90%	6,88
IS	rotura	IS	rotura	IS	rotura
P 11-04	70,41 65,16				
P 03-03	33,78 40,61				
P 27-05	34,41 30,03	P 27-05	27,91 33,18	P 21-05	20,83 17,69
P 22-05	54,17 49,69	P 22-02	57,71 52,96	P 22-01	68,51 60,42
Medias	47,28	Medias	42,94	Medias	41,86
Desviación estándar	15,11	Desviación estándar	14,60	Desviación estándar	26,34
Intervalo de conf. 90%	8,79	Intervalo de conf. 90%	12,01	Intervalo de conf. 90%	17,69

TABLA XXIV: Ensayo de resistencias a compresión probetas prismáticas. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascales)

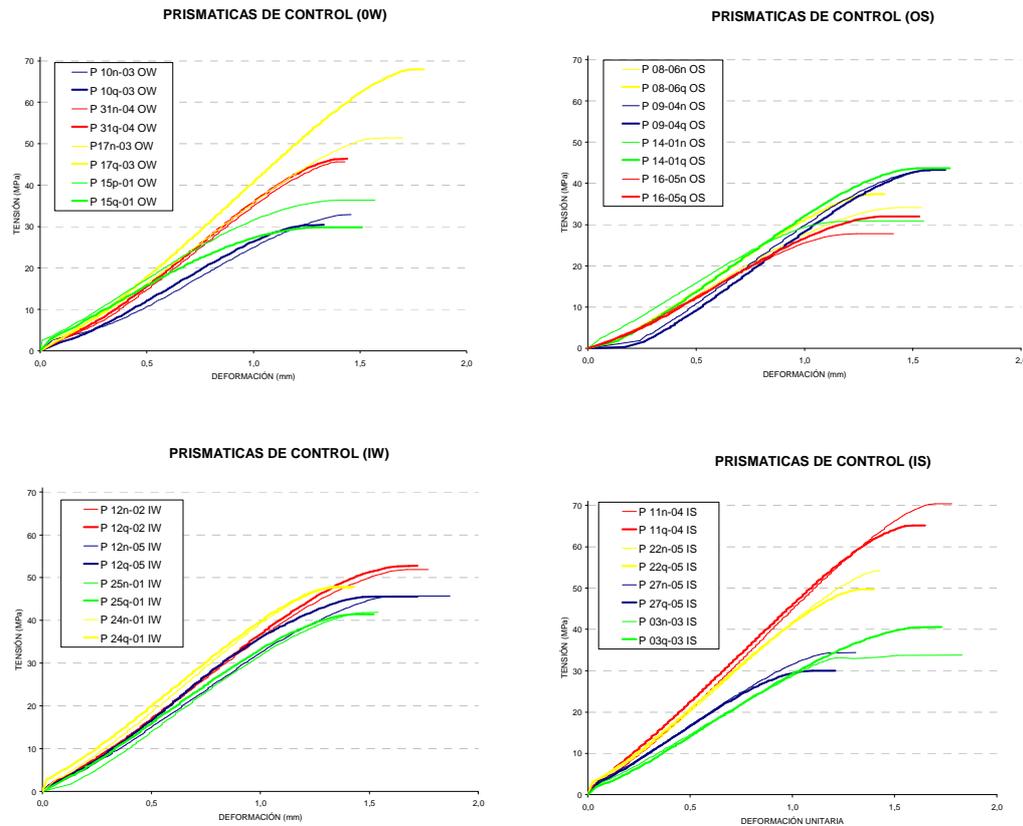


Figura 29. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas de control

En primer lugar se han presentado en la Tabla XXIV los datos de rotura a compresión de probetas prismáticas. Para ello, se han agrupado en una sola tabla los resultados de las dos mitades de cada una de las probetas ensayadas, clasificadas según su dosificación y edad, lo que permite su comparación. Se han mostrado los datos de tensión de rotura de cada una de las probetas ensayadas para poder permitir controlar la evolución de probetas pertenecientes a la misma hornada a lo largo del tiempo.

Así mismo, a la vista de los datos disponibles se puede evaluar la dispersión de valores obtenidos y la exactitud de los parámetros estadísticos calculados.

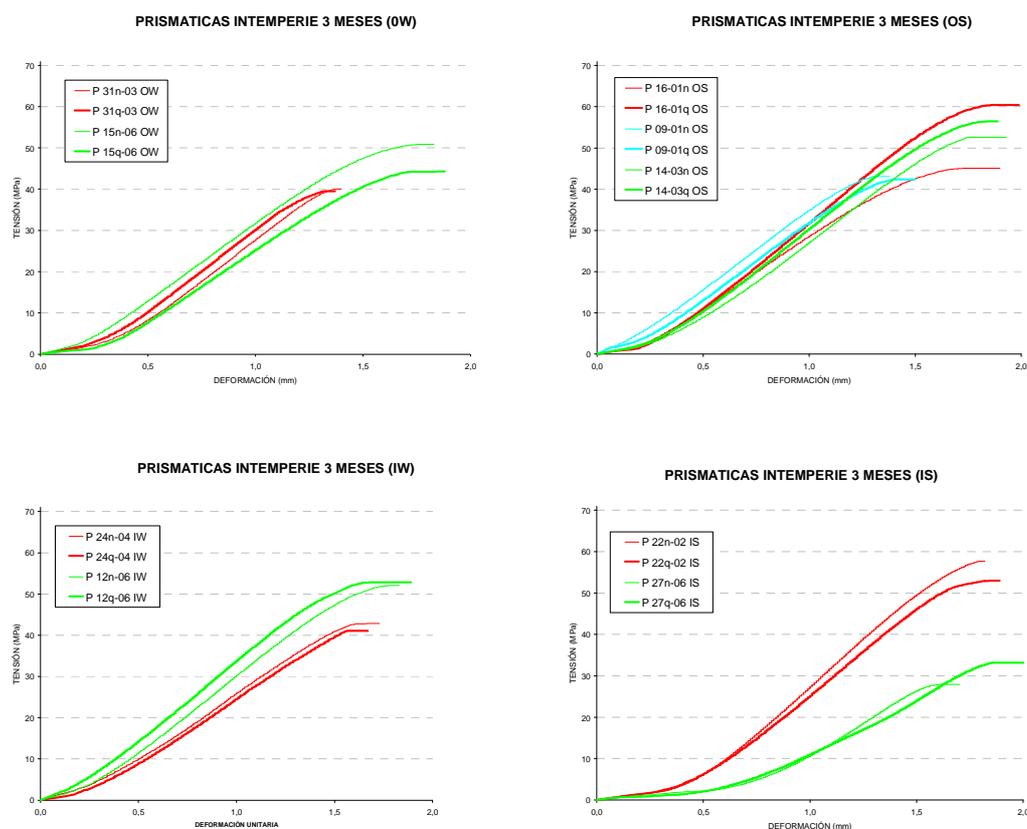


Figura 30. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas tras tres meses a la intemperie

Se muestran a continuación las curvas tensión-deformación de las probetas ensayadas, clasificadas según dosificación de resina y árido utilizada en cada caso (resina ortoftálica/isoftálica, árido húmedo/árido seco), y según la edad de las probetas: de control (Figura 29), tras exposición de tres meses a la intemperie (Figura 30) y tras seis meses de intemperie (Figura 31).

La rotura a compresión de probetas prismáticas se realiza sobre los dos trozos de la misma tras partirlas a flexión. Se obtienen en realidad dos datos de resistencia a compresión para la misma probeta, por lo que se han representado las dos curvas pertenecientes a la misma probeta mediante dos curvas del mismo color, realizadas con trazos fino y grueso correspondientes a las dos mitades obtenidas a partir de la misma. Disponer de estos dos valores permite controlar además la homogeneidad del material.

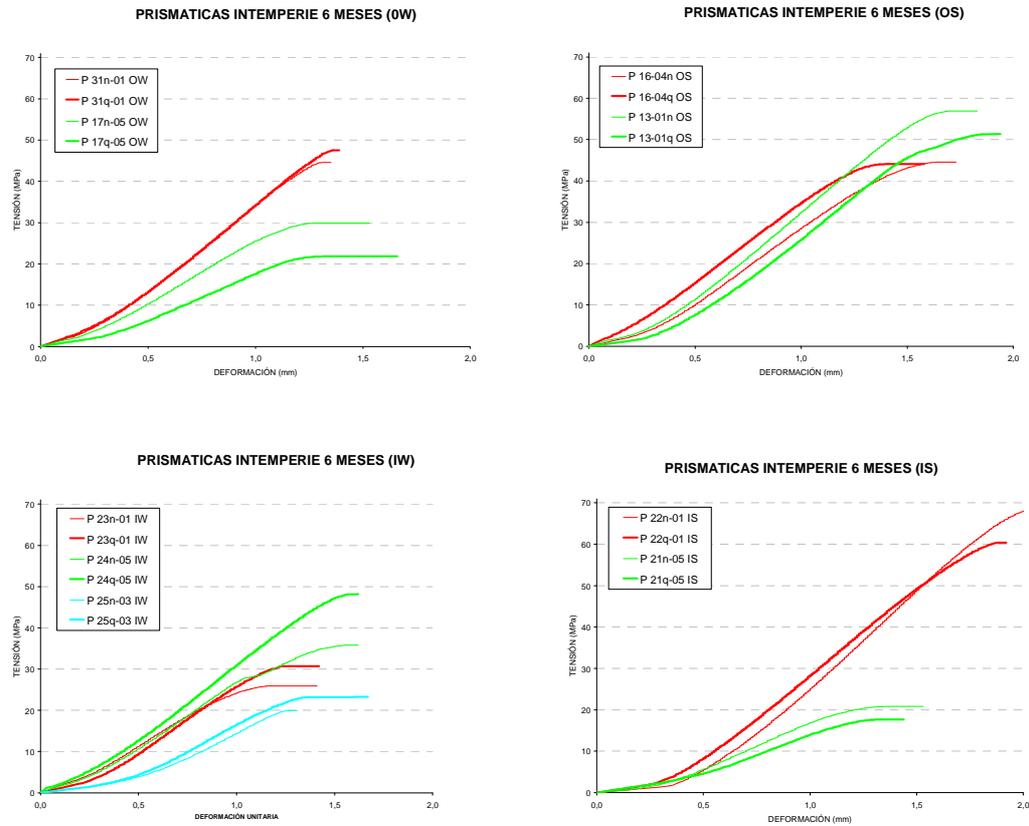


Figura 31. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas tras seis meses a la intemperie

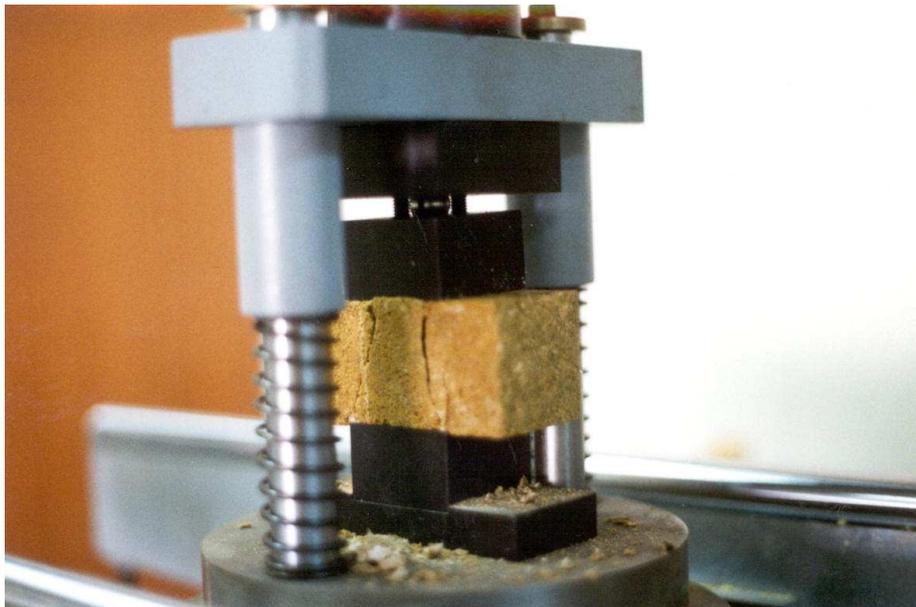


Figura 32. Rotura a compresión de probeta prismática. Inicio de la rotura.

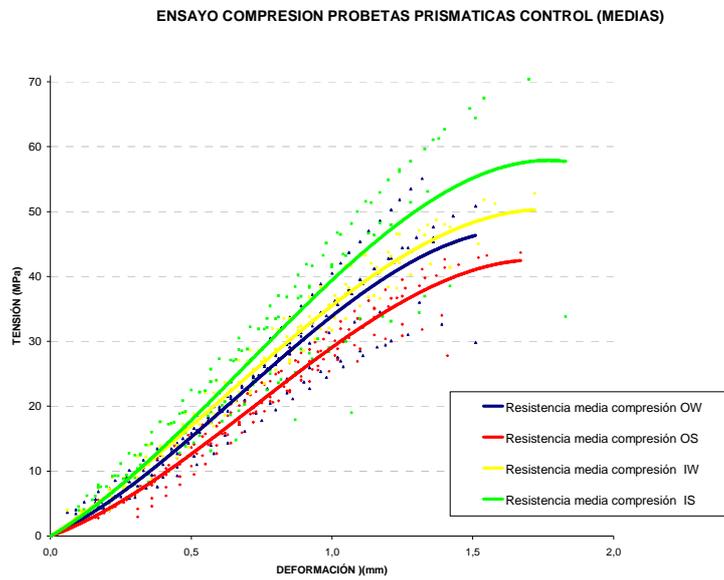


Figura 33. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas de control

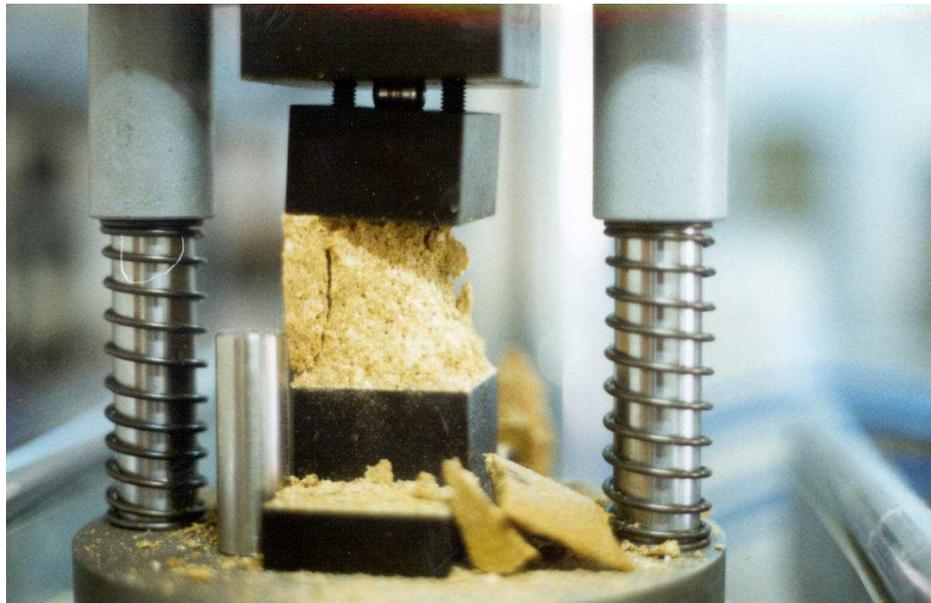


Figura 34. Rotura a compresión de probeta prismática. Final del ensayo.

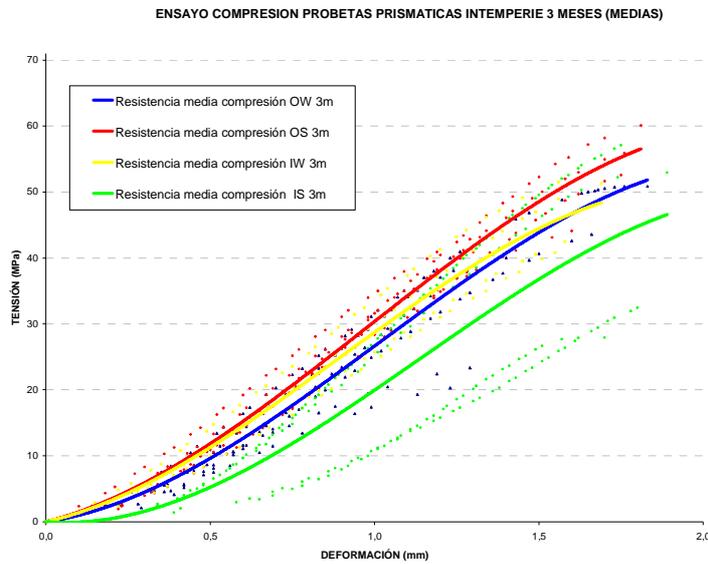


Figura 35. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas tras tres meses a la intemperie

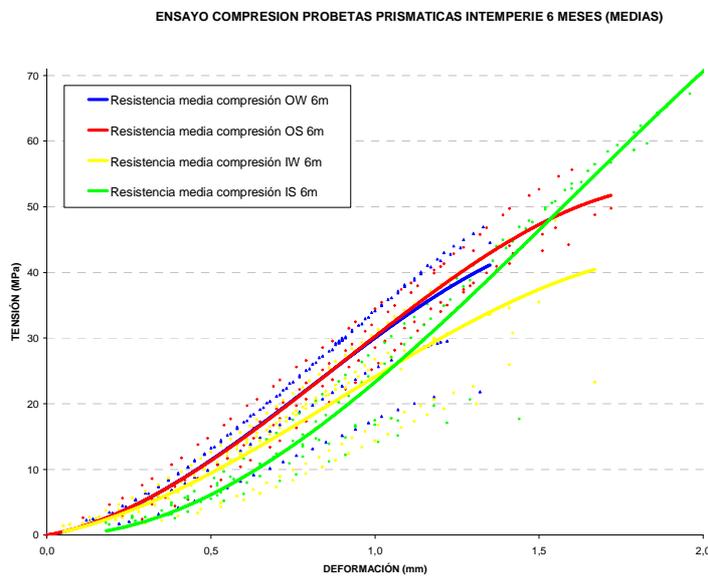


Figura 36. Curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas prismáticas tras seis meses a la intemperie

Se presentan además en las Figuras 32 y 34 dos momentos del ensayo de rotura a compresión para estas probetas. A continuación, en las Figuras 33, 35 y 36 se muestran las curvas de regresión obtenidas a partir de los valores medios de tensión deformación de polialbero para rotura a compresión de probetas cilíndricas en cada uno de los casos: probetas de control, y tras tres y seis meses a la intemperie.

Por último, se presentan agrupados en la Tabla XXV los valores medios del módulo elástico para cada una de las dosificaciones, así como su variación a lo largo del tiempo tras su exposición a la intemperie.

Dosificación	MÓDULO ELÁSTICO (Gpa)			
	Control	Intemperie 3 meses	Intemperie 6 meses	Intervalo
OW	27,4	27,9	31,7	27,4-31,7
OS	34,4	35,8	37,7	34,4-37,7
IW	32,7	29,9	30,0	29,9-32,7
IS	37,3	39,6	39,4	37,3-39,6

TABLA XXV: Valores de módulo elástico a compresión en probetas prismáticas.

En la Tabla XXVI se exponen los resultados de cargas de rotura medias obtenidas para todas las probetas representadas, cilíndricas y prismáticas, presentando el intervalo de valores en cada uno de los casos.

Tipo mezcla	Probetas cilíndricas			Probetas prismáticas		
	Valor mínimo y máximo	Tamaño del intervalo	Valor medio	Valor mínimo y máximo	Tamaño del intervalo	Valor medio
OW	14,32-28,10	(13,78)	20,62	21,83-67,95	(46,12)	40,75
OS	14,87-61,86	(46,99)	32,80	27,79-60,45	(32,66)	45,26
IW	22,45-33,60	(11,15)	29,54	19,96-52,86	(32,90)	41,57
IS	13,88-57,30	(43,42)	37,19	17,69-70,41	(52,72)	44,03

TABLA XXVI: Ensayo de resistencias a compresión probetas prismáticas y cilíndricas. Valores máximos y mínimos para probetas de cualquier edad (Tensión de rotura expresada en Megapascales)



Figura 37. Restos de la probeta prismática después del ensayo. Rotura frágil, probeta IS

III.2.5. *Discusión de resultados*

A la vista de los resultados, parece oportuno comentarlos de forma estructurada según los diferentes parámetros evaluados:

a) Comparación probetas cilíndricas / probetas prismáticas

En primer lugar, tras los datos expuestos parece que no es muy adecuado hablar de valores medios, sino más bien de intervalos de valores, tal y como quedan expresados en la tabla XXV.

En dicha tabla es posible ver claramente cómo los valores máximos y mínimos son similares para ambos tipos de probetas, si bien las medias de valores de resistencia a compresión de las prismáticas son, en general, más altas que las de las cilíndricas.

La variabilidad de resultados entre probetas de distintas amasadas puede deberse a aquellos factores no homogéneos entre ellas: amasado manual, compactación manual, o temperatura y humedad variables en el laboratorio; entendiéndose que todos ellos son factores difícilmente controlables en el caso de una producción en obra como se pretende. La homogeneidad de valores dentro de la misma amasada es manifiesta, como se puede comprobar siguiendo los resultados obtenidos para probetas de la misma amasada a lo largo del tiempo en las tablas XXIII y XXIV. Esta homogeneidad también es mayor para probetas prismáticas que para las cilíndricas.

Además, las resistencias obtenidas para las probetas prismáticas son, en general, sensiblemente mayores que las obtenidas para las probetas cilíndricas, por lo que en un principio se pensó que fuera posible encontrar un factor de correlación entre los mismos. Sin embargo, se observa también que en lo que se refiere a los valores máximos alcanzados (véase probetas OS por ejemplo), se alcanzan valores similares, en torno a 60 MPa tanto para probetas cilíndricas como prismáticas, lo que anula la posibilidad de esta correlación.

La forma de llenado y compactación de las probetas cilíndricas es muy distinta de las prismáticas, donde el llenado es más homogéneo y la compactación mejor debido a la propia forma del molde. Tratándose de la misma masa de mortero vertida en ambas probetas, la resistencia de las cilíndricas es menor en un gran número de casos, lo que puede deberse a problemas en la compactación y llenado de las mismas.

Por todo lo anterior, no parece recomendable la realización de probetas cilíndricas para este tipo de ensayos, siendo suficiente con la caracterización lograda a través de probetas prismáticas.

b) Comparación árido seco / árido húmedo

Se ha observado que con este mortero polimérico se pueden alcanzar resistencias a compresión de hasta 70 MPa (en probetas prismáticas IS), y que es posible conseguir buenas resistencias tanto con áridos húmedos como con áridos secos (los máximos – 67,95 MPa – se obtienen para árido húmedo en probetas prismáticas OW), por lo que en lo que se refiere a resistencia a compresión no parece ser significativo el contenido de humedad de los áridos.

Sí resulta más llamativo el que esta semejanza de valores (resistencia de mortero con árido húmedo \cong árido seco) se produzca únicamente en probetas prismáticas. En todos los casos de probetas prismáticas se dan valores mínimos en torno a 20 MPa y máximos de 52 a 70 MPa. En probetas secas se pueden alcanzar aproximadamente las mismas cotas de resistencia en cilíndricas que en prismáticas (máximos de 57 a 61 MPa). Sin embargo en probetas cilíndricas realizadas con árido húmedo los valores máximos de resistencia a compresión son mucho más bajos: en torno a 28-33 MPa.

Esta disminución de resistencia para las probetas cilíndricas realizadas con árido húmedo podría estar relacionado con el proceso de fabricación. Como se comentó en el capítulo anterior, las probetas húmedas son más difíciles de compactar que las secas, y

las cilíndricas más difíciles de compactar que las prismáticas, por lo que las cilíndricas realizadas con árido húmedo serían *a priori* las más difíciles de fabricar correctamente.

Esto viene confirmado por el alto índice de rechazo (por defectos aparentes se descartaron un cierto número de probetas de entre todas las fabricadas) encontrado entre las probetas de árido húmedo en el proceso de selección de las probetas a ensayar, debido a la presencia de coqueras, discontinuidad entre tongadas, etc.

c) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan grandes diferencias entre los resultados obtenidos para una u otra, siendo mucho mayor la variabilidad detectada entre las probetas del mismo tipo de árido y resina pertenecientes a distintas amasadas que la que se detecta al cambiar de un tipo a otro de resina.

d) Efecto de la temperatura de curado

Las probetas prismáticas de las series 1 a la serie 19 han sido curadas en las condiciones normales del laboratorio: temperatura y humedad ambientes (curado *en frío*), en función de las condiciones climáticas del momento. Las probetas de las series 20 a 32 han sido curadas en horno durante 3 horas a 80°C (curado *en caliente*).

Se observa que es posible obtener resistencias altas o bajas indistintamente de que se trate de probetas curadas en frío o en caliente. Compárense en la Tablas XXIII las probetas de las series IW números 12 (curada en frío), con la serie 24 (curada en caliente). Ambas presentan resistencias similares en el entorno de los 40-50 MPa en sus probetas. O – en el caso de la dosificación IS – compárense en las mismas tablas las probetas pertenecientes a las series 11 (curada en frío), y 22 (curada en caliente), ambas con resistencias en torno a los 50-60 MPa.

Estas mismas probetas han sido ensayadas previamente a flexión, por lo que sus resultados confirmarán también la similitud de los resultados obtenidos con ambos métodos de curado.

e) Efecto de la exposición a la intemperie

Dentro del plazo de exposición a la intemperie estudiado, no se detectan disminuciones significativas de la resistencia del material. Al analizar las Tablas XXIII y XXIV sí se detectan variaciones en las medias, aumentos o disminuciones provocadas por los datos de las probetas específicas contenidas en cada serie. Pero se observa que para probetas pertenecientes a la misma hornada (por ejemplo para probetas prismáticas compárense en la tabla XXIV en la misma fila las probetas pertenecientes a las series 31-xx OW, 14-xx OS, 24-xx IW y 22-xx IS) su resistencia a compresión no disminuye a lo largo del tiempo, sino que más bien aumenta incluso hasta un 20%, como puede verse en el caso de la serie 22-xx IS.

En general, podemos decir que se da una gran variabilidad de resultados. Y que esa variabilidad se mantiene a lo largo del tiempo, por lo que los altibajos en las resistencias medias son debidos al efecto que sobre los valores estadísticos tienen las probetas de distintas hornada reservadas para cada periodo. Es definible un valor de resistencia medio que, para una hornada determinada, se mantiene a lo largo del tiempo, aunque no resulta representativo el valor medio de cada periodo.

A pesar de la gran cantidad de muestras realizadas, hemos de afirmar que para poder utilizar este material en construcción bajo estas condiciones de preparación debemos prever usos que puedan ser cubiertos con determinados valores mínimos o en su lugar realizar un exhaustivo control de fabricación (condiciones de temperatura y humedad, amasado, curado, etc.).

f) Módulo elástico

Los intervalos de valores de módulo elástico medio calculados para cada edad y dosificación de las probetas son bastante más homogéneos que los valores de resistencia obtenidos. Esto es lógico pues el módulo elástico es un dato intrínseco a la estructura del material. De hecho se puede observar en las gráficas tensión-deformación como muchas de las curvas tienen en su tramo elástico la misma pendiente (el valor del módulo elástico), pero alcanzan distintas cotas (el valor de resistencia de la probeta).

El módulo es algo mayor para las probetas realizadas con árido seco que para las realizadas con árido húmedo, y algo superior en las realizadas con resina isoftálica que en las realizadas con resina ortoftálica, es decir, que de las cuatro dosificaciones ensayadas el mortero más rígido es el realizado con resina isoftálica y albero seco, mientras que el realizado con albero húmedo y resina ortoftálica resulta ser el menos rígido.

Los módulos de elasticidad obtenidos están dentro del mismo rango que los valores medios del módulo de deformación del hormigón de cemento en torno a 25.000/35.000 MPa para valores de resistencias a compresión similares (Jiménez-Montoya 1991).

III.3. PROPIEDADES MECÁNICAS: RESISTENCIA A FLEXIÓN

En este apartado se describe la realización de los ensayos encaminados a determinar la resistencia a flexión, la deformación y los valores del módulo elástico en el mortero polimérico objeto de investigación.

III.3.1. Introducción

En la bibliografía localizada (Kyriacos, 1991) se señalan resistencias a flexión de 19,3 MPa para morteros a base de resinas UP, que pueden alcanzar cotas de hasta 25 MPa si se añaden fibras de refuerzo. Otros autores (Chawalwala, 1996) reseñan resistencias de 13,7 a 34 MPa sin añadir fibras de refuerzo para morteros de poliéster.

Ferreira *et al.* (2000) realizan un exhaustivo estudio con diferentes muestras y dosificaciones, añadiendo cargas, alternando mezclado manual y mecánico y curado de 7 días a 23°C con curado de 3 horas a 80 °C; y presentan cargas de rotura que varían de 14,6 a 32,9 MPa, obteniendo las mejores resistencias (con variaciones del orden del 27%) cuando se realiza la mezcla de modo mecánico, debido a que se trata de un hormigón más homogéneo.

En cualquier caso, y aunque los datos varían según autores y mezclas ensayadas, sí es significativo que la resistencia a flexión es el parámetro más exhaustivamente ensayado a lo largo de la bibliografía, por ser el parámetro que más diferencia a los morteros poliméricos de los convencionales desde el punto de vista estructural.

En nuestra investigación se ha ensayado la resistencia a flexión mediante probetas prismáticas normalizadas (las utilizadas habitualmente en la bibliografía) y se ha realizado una comprobación con probetas baldosas de control, para posibilitar una equivalencia entre ambos ensayos.

III.3.2. Metodología

Para la determinación de la resistencia a flexión en probetas se ha utilizado así mismo una prensa multiensayo de 300 KNewton, de la casa Codein S.L., modelo MCO-30, nº de serie 139. Esta prensa proporciona la carga de rotura, la deformación de la probeta y está adaptada a un software que permite el control del ensayo y la salida de datos por pantalla, impresora o archivo. Estos archivos posteriormente pueden ser importados desde programas de tratamiento de datos, como son una hoja de cálculo o una base de datos, lo que facilita el análisis de los mismos.

Se ha determinado la resistencia a flexión mediante el ensayo de tres puntos en dos tipos diferentes de probetas: probetas prismáticas y probetas baldosas. De acuerdo con las especificaciones de RILEM PCM-8, TC 113-CPT 1995, la velocidad de carga ha sido de 0,5 MPa/s. Este ensayo se corresponde con lo especificado en la norma UNE 83-821-92 para la determinación de las resistencias a flexión de morteros utilizados para revocos y revestimientos, tanto a base de cal como de conglomerante hidráulicos, no existiendo norma UNE específica para los morteros poliméricos o de polímeros.

La carga mayor alcanzada por cada una de las probetas se divide por su sección transversal para determinar la tensión de rotura.

Para las probetas prismáticas se han fabricado un gran número de amasadas (Figura 16), organizadas y clasificadas en diversas series, denominadas probetas de control y otras ensayadas tras 3 y 6 meses de exposición a la intemperie. Además como ya se ha comentado en el apartado anterior, se organizaron otras tres series sometidas a envejecimiento acelerado, disminuyendo según el período de permanencia en la cámara climática: ciclo 1 (verano), ciclo 2 (invierno), ciclo 1 + 2 (anual).

Cada una de las series contiene probetas de distintas hornadas, lo que explica en algunos casos la disparidad de resultados, pero permite controlar a su vez la evolución de cada hornada a lo largo del tiempo. Para determinar el efecto de la humedad en la resistencia

del PM se ensayaron tantas probetas realizadas con árido húmedo como con árido seco, con ambos tipos de resina.

En el caso de las probetas baldosas únicamente se han ensayado probetas de control de cada una de las dosificaciones, con la idea de contrastar los resultados de ambos ensayos. Este ensayo se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN ISO 10545-4:1997. Baldosas cerámicas. Determinación de resistencia a la flexión y de la carga de rotura.

III.3.3. Resultados probetas prismáticas

Se expresan a continuación los resultados obtenidos para probetas prismáticas ensayadas a flexión. En las Tablas XXVII y XXVIII se exponen los resultados de las cargas de rotura para todas las probetas representadas, expresando además los valores medios y parámetros estadísticos correspondientes.

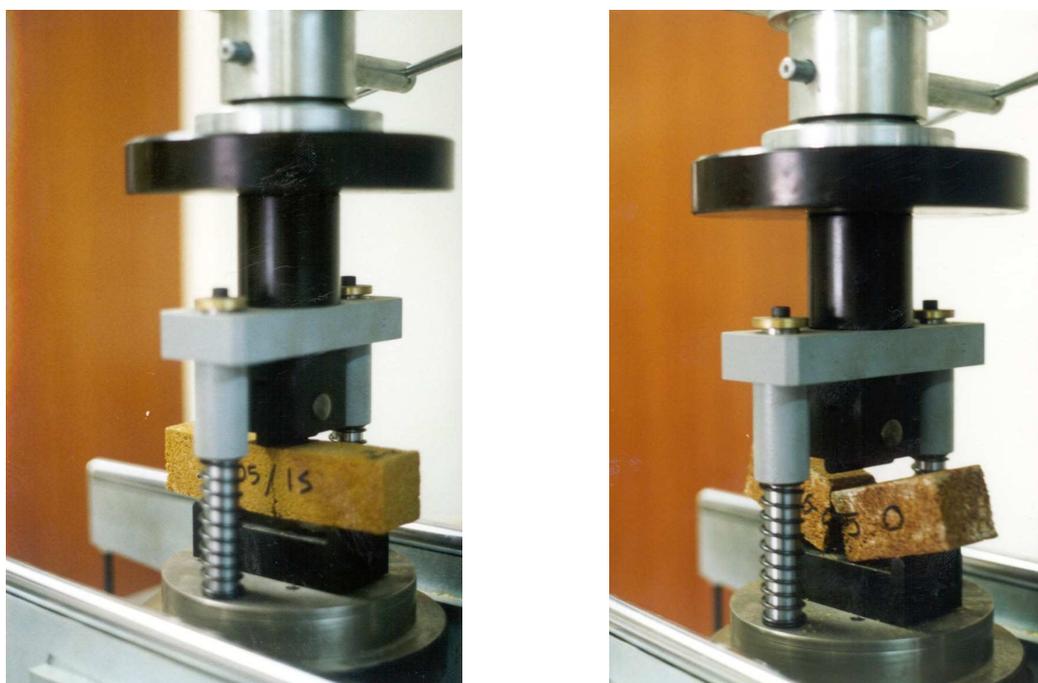


Figura 38. Rotura a flexión de probetas prismáticas de control

PROBETAS DE CONTROL		INTEMPERIE 3 MESES		INTEMPERIE 6 MESES	
OW	rotura	OW	rotura	OW	rotura
P 05-01	6,72	P 05-03	8,17	P 20-05	4,51
P 10-03	7,97			P 31-01	14,91
P 31-04	13,68	P 31-03	12,78	P 17-05	9,33
P 17-03	17,51				
P 15-01	13,36	P 15-06	16,02		
Medias	11,85	Medias	12,32	Medias	9,58
Desviación estándar	4,45	Desviación estándar	3,94	Desviación estándar	5,20
Intervalo de conf. 90%	3,27	Intervalo de conf. 90%	3,75	Intervalo de conf. 90%	4,94
OS	rotura	OS	rotura	OS	rotura
P 08-06	12,59			P 13-01	15,58
P 09-04	11,67			P 16-04	12,89
P 14-01	15,26	P 14-03	17,11		
P 16-05	11,39	P 16-01	15,89		
Medias	12,73	Medias	16,50	Medias	14,24
Desviación estándar	1,76	Desviación estándar	0,86	Desviación estándar	1,90
Intervalo de conf. 90%	1,45	Intervalo de conf. 90%	0,82	Intervalo de conf. 90%	2,21
IW	rotura	IW	rotura	IW	rotura
P 12-02	13,98	P 12-06	16,42		
P 12-05	13,10			P 23-01	10,16
P 25-01	13,01			P 25-03	7,54
P 23-02	9,58			P 24-05	17,81
P26-05	7,49	P26-01	8,38		
P 24-01	14,07	P 24-04	17,23		
Medias	11,87	Medias	14,01	Medias	11,84
Desviación estándar	2,70	Desviación estándar	4,89	Desviación estándar	5,34
Intervalo de conf. 90%	1,82	Intervalo de conf. 90%	4,65	Intervalo de conf. 90%	5,07
IS	rotura	IS	rotura	IS	rotura
P 11-04	18,26			P 22-01	21,63
P 22-05	15,88	P 22-02	19,19	P 28-01	7,53
P 28-02	8,96	P 28-03	7,33	P 21-05	7,52
P 27-05	10,22	P 27-06	11,23		
P 03-03	9,38				
Medias	12,54	Medias	12,58	Medias	12,22
Desviación estándar	4,24	Desviación estándar	6,04	Desviación estándar	8,14
Intervalo de conf. 90%	3,12	Intervalo de conf. 90%	5,74	Intervalo de conf. 90%	7,73

TABLA XXVII: Ensayo de resistencias a flexión de probetas prismáticas de control e intemperie. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascuales)

CAMARA CICLO 1-VERANO		CAMARA CICLO 2-INVIERNO		CAMARA CICLO 1+2 (ANUAL)	
OW	rotura	OW	rotura	OW	rotura
P 05-05	7,55			P 05-04	5,08
P 10-06	8,50			P 10-05	8,46
		P 01-01	8,03		
P 31-06	15,85	P 17-01	9,54	P 17-04	8,51
P 31-05	16,56	P 15-02	12,27		
		P 15-03	11,47	P 15-04	16,61
Medias	12,12	Medias	10,33	Medias	9,67
Desviación estándar	4,75	Desviación estándar	1,91	Desviación estándar	4,90
Intervalo de conf. 90%	3,90	Intervalo de conf. 90%	1,57	Intervalo de conf. 90%	4,03
OS	rotura	OS	rotura	OS	rotura
P 08-03	7,13	P 08-01	13,53	P 08-05	10,91
		P 09-02	11,29	P 09-05	13,58
P 13-03	9,50	P 14-02	13,42	P 09-06	12,72
				P 16-06	12,91
Medias	8,32	Medias	12,75	Medias	12,53
Desviación estándar	1,68	Desviación estándar	1,26	Desviación estándar	1,14
Intervalo de conf. 90%	1,95	Intervalo de conf. 90%	1,20	Intervalo de conf. 90%	0,94
IW	rotura	IW	rotura	IW	rotura
		P 04-02	7,71	P 24-03	14,93
P 25-04	16,07	P 04-03	8,48		
P 25-06	12,98	P 23-03	10,91	P 23-04	8,93
P 26-03	9,25			P 26-04	13,67
P 12-04	14,74	P 12-03	14,69	P 24-06	7,99
Medias	13,26	Medias	10,45	Medias	11,38
Desviación estándar	2,96	Desviación estándar	3,14	Desviación estándar	3,43
Intervalo de conf. 90%	2,43	Intervalo de conf. 90%	2,58	Intervalo de conf. 90%	2,82
IS	rotura	IS	rotura	IS	rotura
		P 11-01	19,20	P 11-05	21,91
P 22-06	18,02			P 22-03	18,70
P 28-06	7,22	P 21-02	6,69	P 21-04	6,42
P 28-05	6,76	P 27-01	10,63	P 27-04	10,14
P 03-06	13,09	P 27-02	10,03		
Medias	11,27	Medias	11,64	Medias	14,29
Desviación estándar	5,34	Desviación estándar	5,33	Desviación estándar	7,23
Intervalo de conf. 90%	4,39	Intervalo de conf. 90%	4,38	Intervalo de conf. 90%	5,94

TABLA XXVIII: Ensayo de resistencias a flexión de probetas prismáticas sometidas a cámara climática. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascuales)

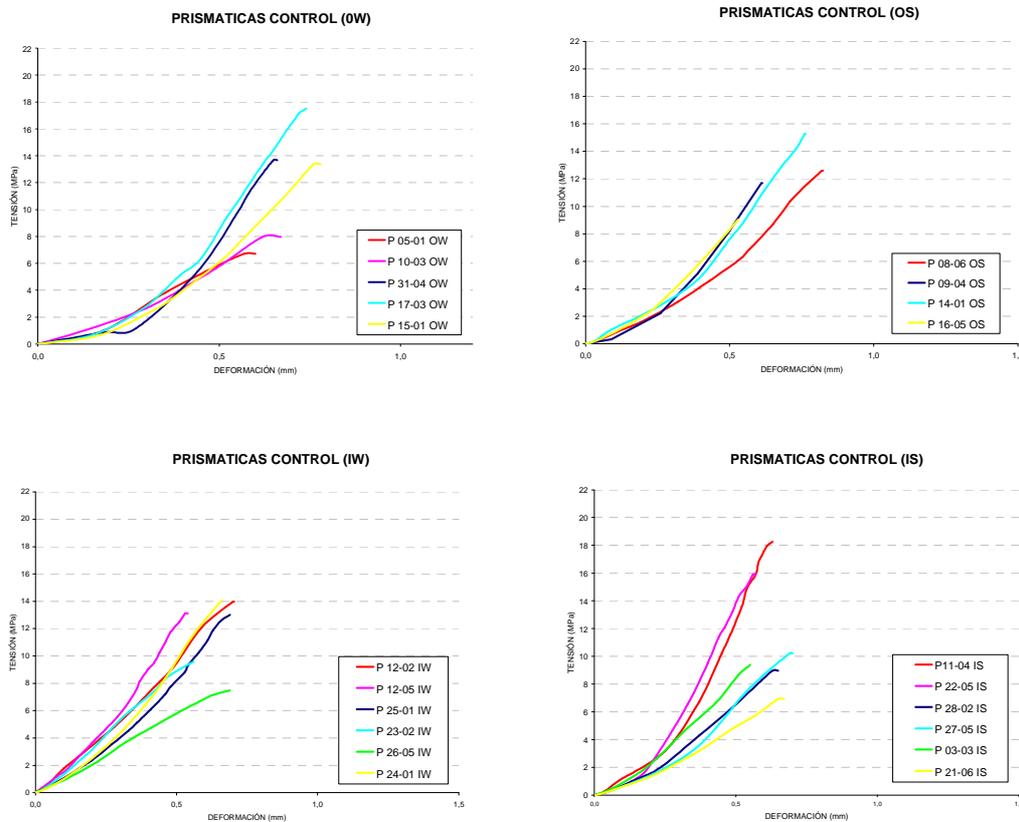


Figura 39. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas de control

A continuación se presentan las curvas tensión-deformación de todas las probetas ensayadas, clasificadas según la dosificación de resina y árido utilizada en cada caso (resina ortoftálica/isoftálica, árido húmedo/árido seco) así como la edad de las probetas: de control, tras exposición de tres meses y seis meses de intemperie, y tras los ciclos de la cámara climática: ciclo 1, ciclo 2 o ciclo 1 + 2.

Las curvas tensión-deformación de las probetas de control se representan en la Figura 39. La Figura 40 representa las probetas prismáticas ensayadas tras una exposición a la intemperie durante tres meses, de Abril a Junio de 2001. La Figura 41 representa las probetas prismáticas ensayadas tras una exposición a la intemperie durante seis meses, de Abril a Septiembre de 2001.

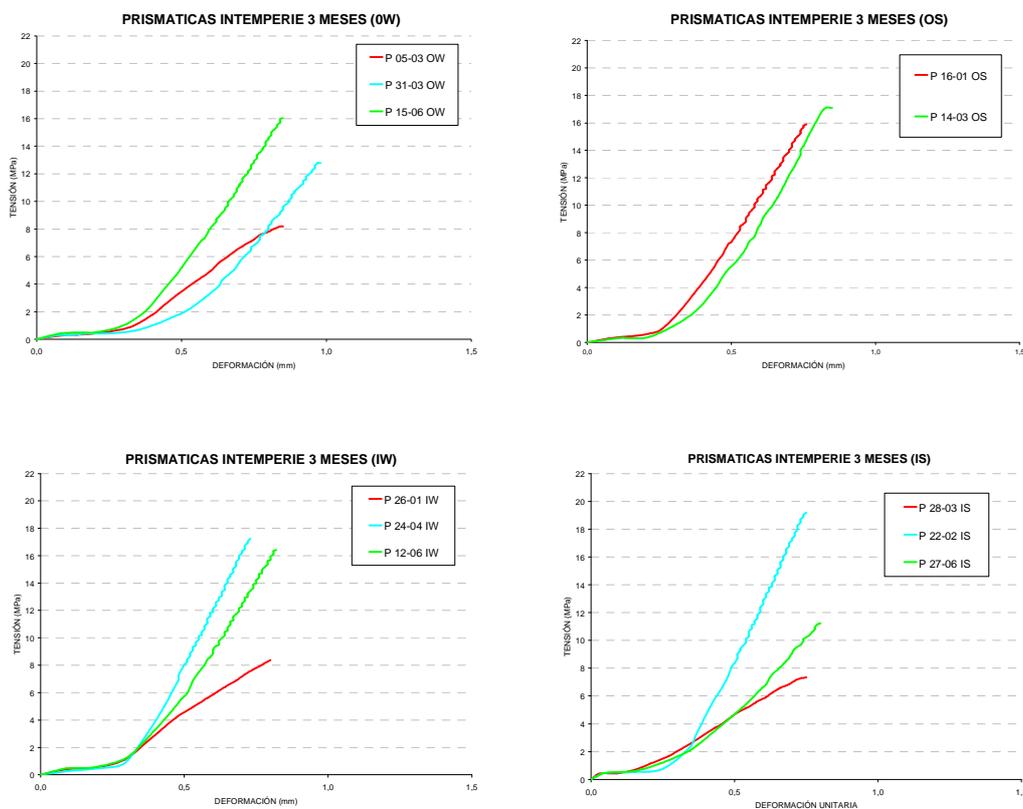


Figura 40. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas tras tres meses a la intemperie

Las Figuras 43, 44 y 45 representan sucesivamente las probetas prismáticas ensayadas tras los ciclos de la cámara climática: ciclo 1 denominado verano, ciclo 2 denominado invierno, y ciclo (1+2), denominado anual.

Para cada una de las tres edades se presentan agrupadas las cuatro gráficas correspondientes a probetas de cada una de las dosificaciones: OW/OS/IW/IS.

Se acompañan también imágenes para contrastar el tipo de rotura de las probetas ensayadas.

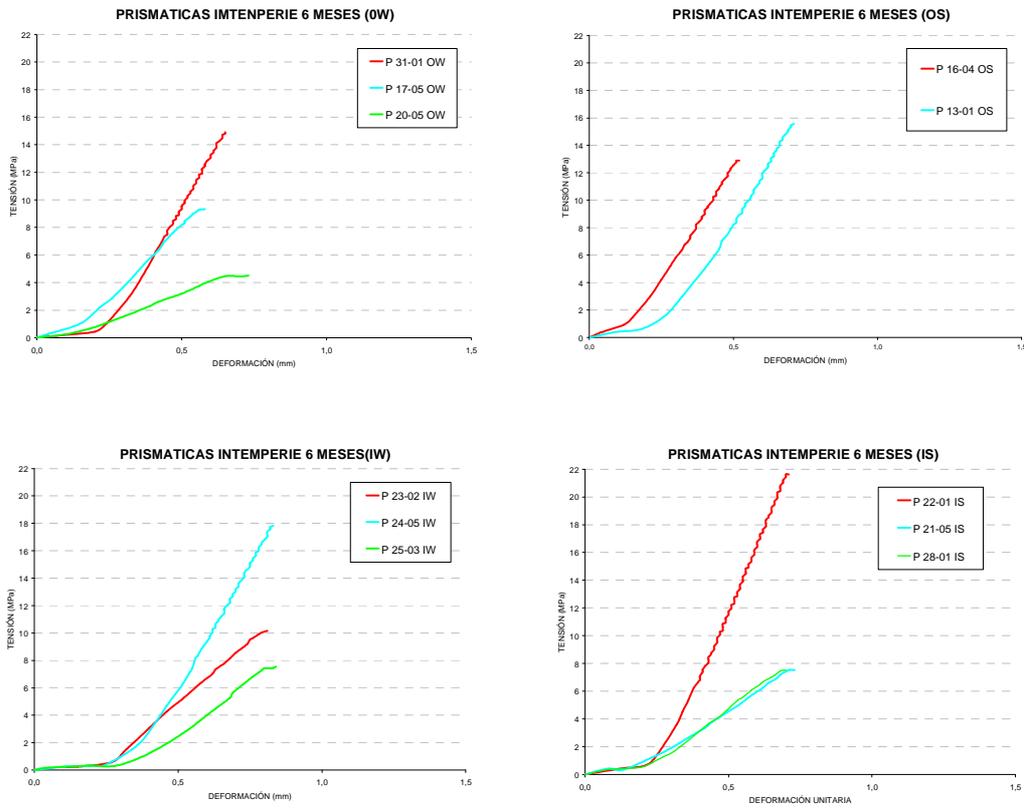


Figura 41. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas tras seis meses a la intemperie



Figura 42. Rotura de probetas prismáticas de control OW y OS a flexión

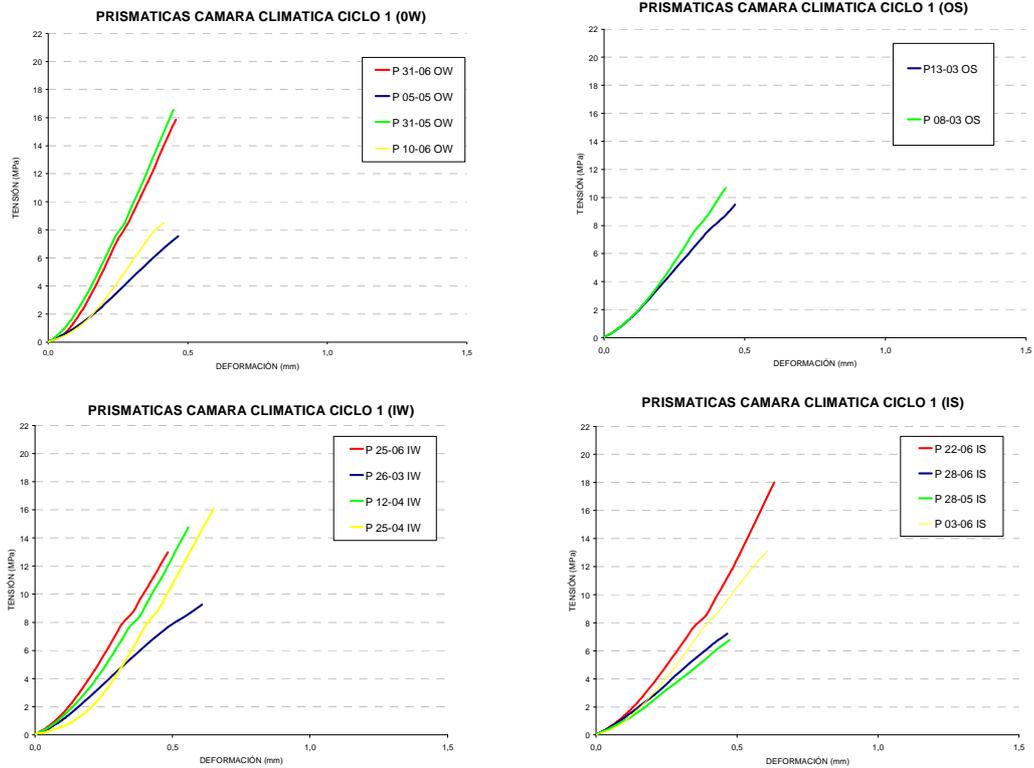


Figura 43. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas tras ciclo 1 (verano) en cámara climática



Figura 44. Rotura de probetas prismática de control IW e IS a flexión

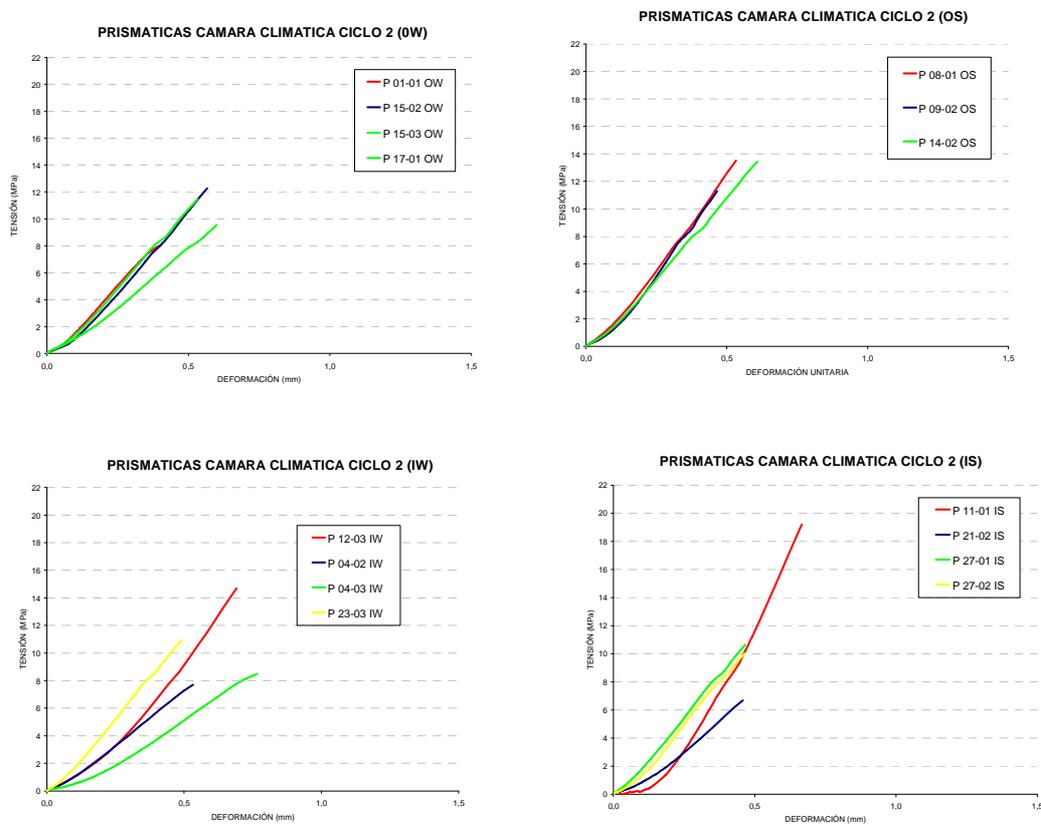


Figura 45. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas tras ciclo 2 (invierno) en cámara climática

Resina/ árido	Control	Envejecimiento real		Cámara climática			Valor medio
		3 meses	6 meses	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	
OW	6.7-17.5	8.2-16.0	4.5-14.9	7.6-16.6	8.0-12.3	5.1-16.6	10.98
OS	11.4-15.3	15.9-17.1	12.9-15.6	7.1-9.5	11.3-13.5	10.9-13.6	12.85
IW	7.5-14.1	8.4-17.2	7.5-17.8	9.3-16.1	7.7-14.7	8.9-14.9	12.14
IS	9.0-18.3	7.3-19.2	7.5-21.6	6.8-18.0	6.7-19.2	6.4-21.9	12.42

TABLA XXIX: Ensayo de resistencias a flexión probetas prismáticas. Valores máximos y mínimos para probetas de cualquier edad. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascuales)

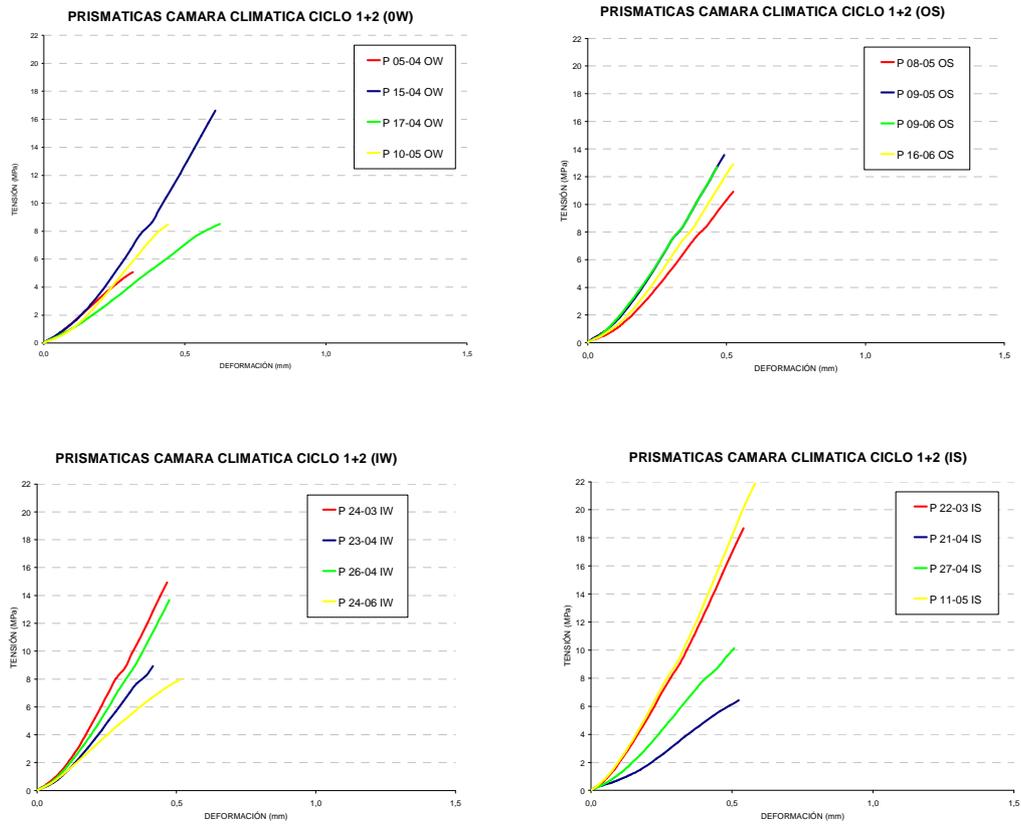


Figura 46. Curvas tensión deformación de polialbero para rotura a flexión de probetas prismáticas tras ciclo 1+2 (verano + invierno) en cámara climática



Figura 47. Ensayo de flexión en probetas prismática tras ciclos (1+2) en la cámara climática.

III.3.4. Resultados probetas baldosas

Se expresan a continuación los resultados de resistencia a flexión obtenidos para probetas baldosas de control. El objetivo principal de este ensayo es contrastar la validez del mismo frente a los ensayos realizados con probetas prismáticas, por ello únicamente se han realizado para probetas de control.

Los datos obtenidos se exponen en la Tabla XXX, calculados los valores medios y expresados en paralelo con los valores medios de rotura obtenidos para prismáticas.



Figura 48. Ensayo de resistencia a flexión probetas baldosas de control

Dosificación	Probeta	Carga	Valores de resistencia en Megapascuales		
			Tensión	Valores medios para baldosas	Valores medios para prismáticas
OW	B 09-04	0,086	11,18		
	B 01-02	0,072	9,36	13,56	10.98
	B 10-06	0,155	20,15		
OS	B 11-09	0,058	7,54		
	B 02-01	0,128	16,64	13,00	12.85
	B 14-07	0,114	14,82		
IW	B 06-05	0,087	11,31		
	B 06-06	0,091	11,83	15,86	12.14
	B 13-05	0,188	24,44		
IS	B 05-03	0,087	11,31		
	B 15-01	0,107	13,91	14,47	12.42
	B 05-08	0,140	18,20		

TABLA XXX: *Ensayo de resistencias a flexión probetas baldosas. Valores máximos y mínimos para probetas de cualquier edad. Valores medios. (Tensión de rotura expresada en Megapascuales)*

III.3.5. *Discusión de resultados*

Al igual que en el apartado anterior, se comentan los resultados de forma estructurada, en función de los parámetros analizados:

a) **Comparación árido seco / árido húmedo**

A la vista de los resultados expuestos en la tabla XXIX podemos determinar que, si bien los peores resultados se obtienen para probetas realizadas con árido húmedo, no se

observan diferencias muy significativas entre la resistencia a flexión de probetas realizadas con árido seco frente a las realizadas con árido húmedo.

La variación calculada entre las resistencias medias de todas las dosificaciones (de 1 a 2 Megapascales) es menor que la obtenida no ya para probetas del mismo tipo sino incluso en ocasiones para probetas de la misma hornada.

b) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan grandes diferencias entre los resultados obtenidos para una u otra, siendo mayor, por ejemplo, la variabilidad entre las distintas probetas de una misma serie que la obtenida para los valores medios entre uno y otro tipo de resina.

c) Efecto de la temperatura de curado

Las probetas prismáticas de las series 1 a la serie 19 han sido curadas en las condiciones normales del laboratorio: temperatura y humedad ambiente no controlados (curado *en frío*), en función de las condiciones climáticas del momento. Las probetas de las series 20 a 32 han sido curadas en horno durante 3 horas a 80°C (curado *en caliente*).

Sin embargo no se observan diferencias en las resistencias obtenidas para ambos tipos de probetas. A modo de ejemplo, compárense en las Tablas XXVII y XXVIII las probetas de las series OW números 15 (curada en frío), con la serie 31 (curada en caliente). Ambas presentan resistencias en torno a los 13-16 MPa en todas sus probetas. O en el caso de la dosificación IS, compárense en las mismas tablas las probetas pertenecientes a las series 11 y 22. Ambas series presentan unas resistencias en torno a los 18-20 MPa.

En conclusión, podemos decir que es posible obtener las mismas resistencias curando en frío que en caliente, por lo que es posible utilizar uno u otro método de curado según se adapte mejor al proceso de fabricación.

d) Efecto de la exposición a la intemperie

No se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos para probetas expuestas a la intemperie y las de control, por lo que podemos afirmar que el material, al menos en este plazo de tiempo, no sufre degradación de su resistencia a flexión.

e) Efecto de la cámara climática

Los resultados obtenidos para probetas sometidas a envejecimiento acelerado en la cámara climática y los de probetas de control son similares, por lo que podemos afirmar que el material, al menos en este número de ciclos ensayados, no sufre degradación de su resistencia a flexión.

f) Comparación probetas prismáticas/probetas baldosas

Los valores medios obtenidos para probetas baldosas son muy similares a los obtenidos para probetas prismáticas de control. Además, también en las probetas baldosas se da una variabilidad similar de resultados: se registran valores máximos de resistencia a flexión que duplican o triplican los valores mínimos. Por todo ello, entendemos que ambos tipos de probetas son adecuados para controlar las características de resistencia a flexión del mortero polimérico.

Hay que recordar además que las probetas baldosas han sido preparadas por operarios distintos, con moldes distintos y en sesiones distintas que las probetas prismáticas

(manteniendo las mismas materias primas, dosificaciones para las mezclas y el mismo procedimiento de ejecución de las mismas, supervisadas directamente por la autora de este trabajo).

La existencia de esta disparidad de resultados entre las probetas de la misma forma y dosificación, y la similitud de los valores medios entre probetas baldosas y prismáticas confirma una vez más que los valores obtenidos son correctos y que la gran variabilidad en los mismos con respecto a la media se debe a las condiciones de preparación y curado de las probetas, asumidas como una de las hipótesis de partida de la presente investigación.

Con los valores medios disponibles podemos afirmar que el material mortero polimérico de albero tiene una resistencia media a flexión de 10-12 Megapascuales (según dosificaciones), sin embargo hemos de señalar también que la diferencia entre los valores mínimos obtenidos, 4,5 MPa y máximos, 21,9 MPa, indica de nuevo una fuerte variabilidad de este parámetro característico del material, lo que deberá ser tenido en cuenta para su posible utilización.

III.4. PROPIEDADES MECÁNICAS: DESGASTE POR ABRASIÓN

En este apartado se describe la realización de los ensayos encaminados a determinar la resistencia al desgaste por abrasión, y la comparación de los mismos con valores obtenidos para otros materiales utilizados para revestimientos.

III.4.1. *Introducción*

El desgaste por abrasión es uno de los datos más utilizados para conocer las características reales de un material utilizado para revestimiento de suelos. Se trata de un ensayo normalizado para todo tipo de pavimentos. No se ha encontrado normativa de ensayos similares específica para PM, por lo que se ha recurrido, como en otros apartados, a los ensayos existentes para baldosas cerámicas.

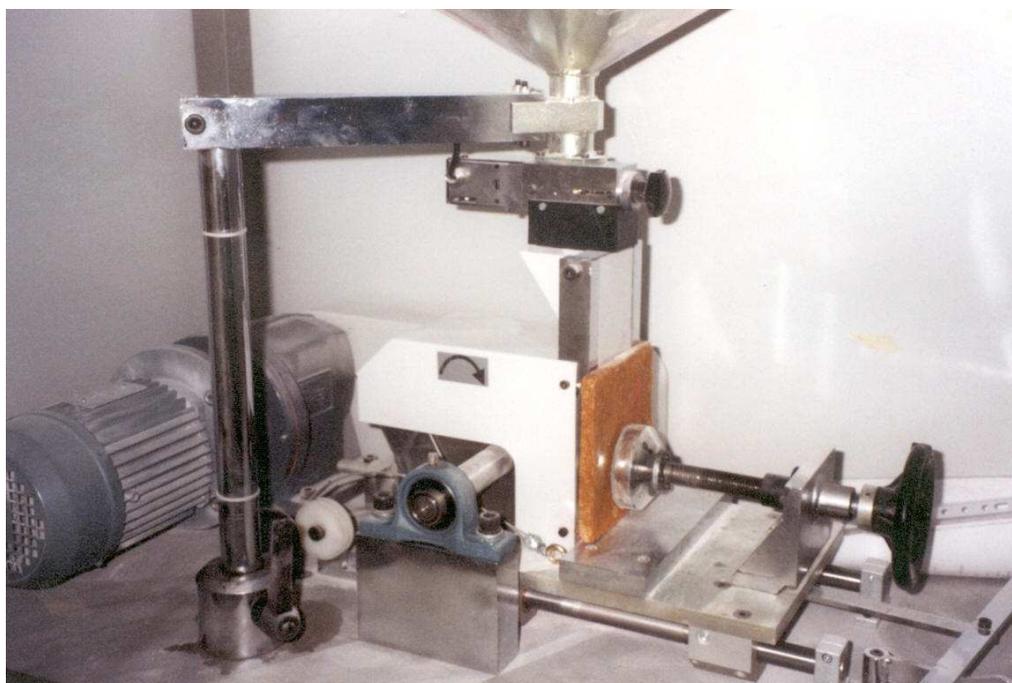


Figura 49. *Maquinaria de ensayos para desgaste por abrasión.*

III.4.2. Metodología

Para determinar la influencia real de la abrasión en el PM estudiado, se han realizado ensayos según UNE-EN ISO 10545-14:1998, aplicables para baldosas cerámicas.

Para realizar dichos ensayos se han tomado probetas de PM de las denominadas baldosas, de dimensiones $150 \times 150 \times 10$ mm. De acuerdo con el procedimiento descrito en dicha norma, para determinar la resistencia a la abrasión se tomaron 4 probetas de cada tipo, (de cada dosificación OW / OS / IW / IS y de cada una de las tres edades estudiadas: control / 3 meses / 6 meses), limpiadas con agua y secadas en estufa a 100°C hasta masa constante.

Posteriormente y una vez enfriadas a temperatura ambiente se realiza el siguiente procedimiento sobre cada una de ellas:

- Si la cara vista tiene una desviación en la planeidad mayor de 1 mm se refrentará mecánicamente hasta conseguir una superficie lisa.
- Se limpia la superficie de la probeta con un cepillo y se colorea la superficie con una tiza.
- La baldosa se coloca en contacto con el disco de abrasión (en este caso arena blanca silíceo proyectada), se abre la tolva y se deja girar el disco 75 veces en 60 ± 3 segundos, produciendo un efecto de desgaste en la superficie ensayada.
- Se realizarán dos huellas por cada probeta de ensayo.
- Se dibuja una línea en el centro de la huella y se mide la distancia entre ambos puntos con una precisión de 0,1 mm desde los bordes interiores.
- Se toma el valor mayor como resultado y aproximado al 0,5 mm más próximo.



Figura 50. Medida de resultados del ensayo.

III.4.3. Resultados

Se han realizado ensayos a probetas de las cuatro dosificaciones estudiadas y de las tres edades analizadas (de control y tras tres y seis meses a la intemperie). Los resultados del ensayo se exponen en la tabla de la página siguiente (Tabla XXXI):

Dosificación	Edad de las probetas	Denominación	Dimensiones de huellas (mm)	Valor mayor (mm)
OW	Control	B 04-03 OW	26,1 / 24,0	26
	3 meses	B 01-03 OW	26,5 / 28,9	29
	6 meses	B 04-02 OW	20,6 / 20,1	20,5
OS	Control	B 02-02 OS	19,5 / 22,0	22
	3 meses	B 02-05 OS	22,8 / 23,8	24
	6 meses	B 14-03 OS	19,6 / 21,2	21
IW	Control	B 03-01 IW	24,5 / 23,2	24,5
	3 meses	B 06-01 IW	23,8 / 23,9	24
	6 meses	B 03-06 IW	19,7 / 21,4	21,5
IS	Control	B 14-04 IS	23,4 / 17,5	23,5
	3 meses	B 05-06 IS	20,7 / 23,9	24
	6 meses	B 14-03 IS	19,3 / 20,8	21

TABLA XXXI: Ensayo de resistencias a desgaste de probetas baldosas.

III.4.4. Discusión de resultados

a) Comparación árido seco / árido húmedo

Las resistencias al desgaste medidas en probetas realizadas con árido seco son algo mejores que las medidas en probetas realizadas con áridos húmedos, aunque no se trata de una gran diferencia. Además, es importante señalar que esta diferencia sólo es apreciable en las probetas de control y tras tres meses a la intemperie. Los resultados tras seis meses a la intemperie son prácticamente iguales para las cuatro dosificaciones estudiadas.

b) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan diferencias significativas.

c) Efecto de la exposición a la intemperie

El efecto de la intemperie resulta muy significativo en las baldosas estudiadas. Tras tres meses a la intemperie todas mantienen su resistencia al desgaste inicial o incluso aumenta ligeramente con respecto a la medida en las probetas de control.

Sin embargo, tras seis meses a la intemperie la resistencia al desgaste ha mejorado en todos los casos, aumentando significativamente con respecto a la inicial, medida en probetas de su misma serie (ver tabla XXXI).

d) Comparación con otros materiales

Se muestran a continuación, recogidos para otros tipos de baldosas existentes en el mercado, los valores máximos de desgaste permitidos, según las normas experimentales citadas.

Norma	Tipo de baldosa	Dimensiones de huellas (mm)	Especificaciones
UNE 127022: 1999 EX	Baldosa de hormigón	≤30 ≤23	Clase G: Tráfico ligero Clase H: Tráfico intenso
UNE 127023: 1999 EX	Losetas de hormigón	<21	
UNE 127024: 1999 EX	Aglomerada de cemento	≤30	
UNE 127020: 1999 EX	Baldosa de terrazo uso interior	≤25 ≤23 ≤21	Uso normal Uso intensivo Uso industrial
UNE 127021: 1999 EX	Baldosa de terrazo uso exterior	≤20 ≤20	Clase B Clase D

TABLA XXXII: Ensayo de resistencias a desgaste para otros tipos de baldosas.

Podemos apreciar que para el polialbero se han obtenido en cualquier caso resultados mejores que los exigidos para baldosas de hormigón para tráfico ligero, baldosas de aglomerado de cemento o baldosas de terrazo para uso interior.

E incluso, si comparamos los datos de la Tabla XXXII con los valores obtenidos por el polialbero tras seis meses a la intemperie, se aprecia que los valores de éste último son mejores que los exigidos para losetas de hormigón, baldosas de hormigón para tráfico intenso o baldosas de terrazo para uso interior intensivo o industrial.

Por lo tanto, sobre la base de los resultados de resistencia al desgaste una de las conclusiones de este trabajo de investigación es que el material podría ser utilizado en revestimientos para solería en cualquiera de los usos anteriormente citados.

III.5. PROPIEDADES FÍSICAS: DENSIDAD REAL Y DENSIDAD APARENTE.

III.5.1. Introducción

La densidad de un material compuesto, en este caso un mortero polimérico, dependerá de las densidades de los materiales que lo componen, así como de la cantidad de poros presente en el mismo.

De acuerdo con los resultados de diversos ensayos anteriormente citados, el valor de la densidad en la roca albero se puede fijar dentro del intervalo comprendido entre 1,93 y 1,95 g/cm³.

La densidad de la resina polimerizada también es un dato conocido. Según las especificaciones del fabricante (Tabla XVII) ambas resinas, ortoftálica e isoftálica, una vez polimerizadas tienen una densidad de 1,20 g/cm³.

Se ha pretendido determinar la densidad aparente del material, y además comprobar si ésta se mantiene constante a lo largo del tiempo. Por ello, en la Tabla XXV se expresan dichas densidades referidas a la edad o periodo de exposición de la probeta a la intemperie. Además se ha determinado la densidad real para las probetas de control, lo que nos permitirá conocer la compacidad del material.

III.5.2. Metodología

Para determinar la densidad aparente del material se han realizado mediciones a todas y cada una las probetas fabricadas de todos los tipos (cilíndricas, prismáticas, baldosas y losas), utilizando un calibre digital (pie de rey) y una balanza de precisión para comprobar las dimensiones y peso de las mismas respectivamente.

Se ha realizado el presente ensayo a cada una de las cuatro formulaciones utilizadas para el mortero polimérico: OW / OS / IW / IS.

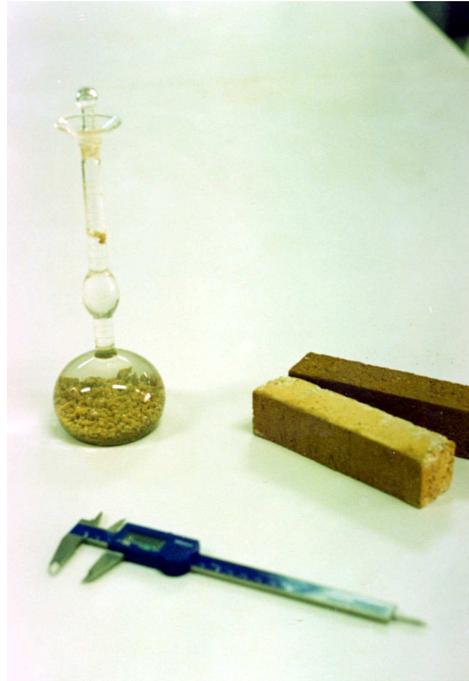


Figura 51. Ensayo densidad: toma de datos con calibre digital y volumenómetro.

Por su mayor regularidad volumétrica, se estimó finalmente la determinación de la densidad aparente a través de los datos obtenidos con las probetas cilíndricas y prismáticas, expuestos en la Tabla XXXIII.

Para la determinación de la densidad real se utilizó un volumenómetro (Figura 51), una vez comprobada la densidad aparente de la probeta analizada.

La compactación se calcula según la siguiente expresión:

$$\text{Compactación (\%)} = (D_{ap} / D_{real}) \times 100$$

III.5.3. Resultados

En esta página se incluyen en primer lugar los resultados de densidad aparente, densidad real y compacidad obtenidos para probetas de control de cada una de las cuatro dosificaciones (Tabla XXXIII).

A continuación se expresan los resultados de densidad aparente obtenidos para probetas cilíndricas y prismáticas (Tabla XXXIV), así como los valores medios y parámetros estadísticos correspondientes.

Muestra	Densidad aparente (g / cm ³)	Densidad real (g / cm ³)	Compacidad (%)
OW	1,65	1,88	87,8
OS	1,74	1,87	93,0
IW	1,79	2,03	88,2
IS	1,82	1,97	92,4

TABLA XXXIII: Valores de densidad aparente y densidades reales calculados mediante voluménometro para probetas de control

PROBETAS CILÍNDRICAS						PROBETAS PRISMÁTICAS					
Probetas de Control		Intemperie tres meses		Intemperie seis meses		Probetas de Control		Intemperie tres meses		Intemperie seis meses	
OW	Dens.	OW	Dens.	OW	Dens.	OW	Dens.	OW	Dens.	OW	Dens.
C 14-12	1,64			C 14-10	1,67	P 10-03	1,72				
C 05-08	1,70	C 05-10	1,69	C 05-05	1,71	P 31-04	1,75	P 31-03	1,63	P 31-01	1,74
C 05-06	1,67					P15-01	1,80	P15-06	1,52		
C 06-07	1,49	C 06-01	1,49			P 17-03	1,87			P 17-05	1,76
C 21-07	1,66										
C 03-09	1,66	C 27-10	1,67	C 27-06	1,73						
Medias	1,64	Medias	1,62	Medias	1,70	Medias	1,78	Medias	1,58	Medias	1,75
Desv	0,07	Desv	0,11	Desv	0,03	Desv	0,06	Desv	0,08	Desv	0,01
I.C 90%	0,05	I.C 90%	0,10	I.C 90%	0,03	I.C 90%	0,05	I.C 90%	0,09	I.C 90%	0,02
OS	Dens.	OS	Dens.	OS	Dens.	OS	Dens.	OS	Dens.	OS	Dens.
C 20-06	1,76	C 20-07	1,79	C 20-08	1,80	P 08-06	1,80			P 13-01	1,87
C 10-10	1,81					P 16-05	1,76	P 16-01	1,86	P 16-04	1,82
C 22-15	1,88			C 27-17	1,90	P 09-04	1,80	P 09-01	1,74		
C 25-14	1,88					P 14-01	1,83	P 14-03	1,89		
C 25-04	1,93	C 25-09	1,80	C 25-15	1,85						
Medias	1,85	Medias	1,80	Medias	1,85	Medias	1,80	Medias	1,82	Medias	1,85
Desv	0,07	Desv	0,01	Desv	0,05	Desv	0,03	Desv	0,11	Desv	0,04
I.C 90%	0,05	I.C 90%	0,01	I.C 90%	0,05	I.C 90%	0,02	I.C 90%	0,10	I.C 90%	0,01
IW	Dens.	IW	Dens.	IW	Dens.	IW	Dens.	IW	Dens.	IW	Dens.
C 15-05	1,73	C 15-09	1,74			P 24-01	1,79	P 24-04	1,85	P 24-05	1,89
C15-04	1,70					P 12-05	1,88	P 12-06	1,83	P 23-01	1,76
C 23-09	1,74	C 23-16	1,73	C 23-10	1,79	P 25-01	1,76			P 25-03	1,76
C 24-12	1,67			C 24-20	1,74	P 12-02	1,83				
C 08-06	1,77			C 08-09	1,77						
C 11-06	1,79	C 12-09	1,68								
Medias	1,74	Medias	1,72	Medias	1,77	Medias	1,82	Medias	1,84	Medias	1,80
Desv	0,05	Desv	0,03	Desv	0,03	Desv	0,05	Desv	0,01	Desv	0,08
I.C 90%	0,03	I.C 90%	0,03	I.C 90%	0,02	I.C 90%	0,04	I.C 90%	0,01	I.C 90%	0,07
IS	Dens.	IS	Dens.	IS	Dens.	IS	Dens.	IS	Dens.	IS	Dens.
C 18-09	1,78	C 18-12	1,80	C 18-01	1,83	P 22-05	1,88	P 22-02	1,86	P 22-01	1,91
C 26-09	1,91	C 26-13	1,89	C 26-08	1,93	P 11-04	1,80				
C 11-10	1,80					P 21-06	1,57			P 21-05	1,57
C 09-10	1,89	C 09-13	1,82			P 27-05	1,74	P 27-05	1,69		
C 16-04	1,69					P 03-03	1,83				
Medias	1,82	Medias	1,84	Medias	1,88	Medias	1,77	Medias	1,78	Medias	1,74
Desv	0,09	Desv	0,05	Desv	0,07	Desv	0,12	Desv	0,12	Desv	0,24
I.C 90%	0,07	I.C 90%	0,04	I.C 90%	0,08	I.C 90%	0,09	I.C 90%	0,14	I.C 90%	0,28

TABLA XXXIV: Valores de densidad aparente calculados en probetas cilíndricas y prismáticas. Densidades expresadas en g/cm³

III.5.4. *Discusión de resultados*

Las densidades aparentes obtenidas son muy heterogéneas, variando desde 1,63 a 2,00 g/cm³. Para posibilitar el contraste de los datos se presenta a continuación la Tabla XXXV, donde se muestran de forma resumida los valores obtenidos para cada una de las formulaciones, con independencia de la edad de las probetas.

	Densidad aparente (g/cm ³)			Compacidad
	En probetas cilíndricas	En probetas prismáticas	Densidad aparente del material	
OW				
Intervalo	1,64-1,73	1,63-1,80	1,63-1,80	87,8 %
Valor medio	1,65	1,70		
OS				
Intervalo	1,76-2,00	1,76-1,89	1,76-2,00	93,0 %
Valor medio	1,83	1,82		
IW				
Intervalo	1,67-1,79	1,76-1,88	1,67-1,88	88,2 %
Valor medio	1,74	1,82		
IS				
Intervalo	1,80-1,93	1,69-1,91	1,69-1,93	92,4 %
Valor medio	1,84	1,76		

TABLA XXXV: *Densidad aparente del material. Valores medios.*

a) **Comparación probetas cilíndricas / probetas prismáticas**

La densidad aparente media obtenida para probetas cilíndricas con árido seco resulta ser igual o incluso algo superior en algún caso (IS) a la obtenida para probetas prismáticas. Sin embargo, llama la atención que en el caso de probetas realizadas con árido húmedo, tanto para resina ortoftálica como para resina isoftálica, se cumple que la densidad

media es menor (5 a 7 centésimas de g/cm^3) para las cilíndricas que para las prismáticas.

Esto es debido, como ya se ha comentado en el apartado de ensayos a compresión, a que las probetas se ven afectadas por las dificultades halladas en el proceso de fabricación para colocar los morteros realizados con árido húmedo que son más difíciles de compactar, cuestión que se ve agravada en las cilíndricas por la propia forma del molde, que presenta una menor superficie disponible para llenado y compactación.

b) Comparación árido seco / árido húmedo

Como era de esperar, en general, la densidad de las probetas realizadas con árido húmedo es algo menor que las de árido seco.

Sin embargo, corroborando lo comentado en otros ensayos, es evidente que la heterogeneidad de los datos origina casos de probetas realizadas con áridos húmedos y mayor densidad que otras preparadas con áridos secos. Esto es debido a la influencia de otros factores como el amasado, la colocación, etc.

Más significativo es el contraste en la compacidad, donde se aprecia claramente cómo para áridos secos, ya sea con resina ortoftálica o isoftálica, la compacidad es cinco puntos superior a la obtenida con áridos húmedos, debido al mayor índice de huecos provocado al evaporarse el agua procedente del árido presente en el mortero.

c) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan diferencias significativas en los resultados obtenidos.

d) Efecto de la exposición a la intemperie

Tal y como queda reflejado en la Tabla XXXIV, la densidad obtenida para probetas ensayadas a lo largo del tiempo es bastante constante cuando se trata de probetas pertenecientes a la misma hornada.

Sin embargo, las diferencias entre densidades de probetas pertenecientes a distintas amasadas provocan fluctuaciones en la media de densidad de cada una de las edades, y son las que conducen a ligeras altas o bajas en las medias, que no se corresponden con una influencia real del factor de exposición a la intemperie, sino con la heterogeneidad de los resultados obtenidos para distintas amasadas.

III.6. PROPIEDADES QUÍMICAS: RESISTENCIA A MANCHAS Y ATAQUE DE ÁCIDOS

III.6.1. Introducción

De acuerdo con la bibliografía consultada (Tennyson 1980), las resinas UP presentan en general un excelente comportamiento frente a la intemperie, al agua, lejías y detergentes, soluciones salinas, algunos ácidos y álcalis diluidos, bebidas alcohólicas, gasolina y gasoil, cualidades que se ven potenciadas conforme más cerrada es su textura superficial. Por contra, resisten mal o no resisten el agua hirviendo, hidrocarburos clorados y otros disolventes orgánicos y ácidos concentrados y álcalis incluso diluidos.

En general depende de la propia resistencia química de la resina y en menor grado de la del árido, así como de la agresividad real del medio donde se mantienen los PM. Salvo algunas generalizaciones poco útiles, lo que hay que procurar es ensayar en concreto cada tipo de formulación que vaya a hacerse y además si es posible plantearse la realización de ensayos de durabilidad y resistencias químicas a largo plazo, sea en condiciones reales, mediante cámaras climáticas (Vale, 1985) o al menos conservando probetas en soluciones diversas y midiendo los efectos de las mismas, sobre las probetas. De todas formas se puede recurrir a la bibliografía existente (Tennyson, 1980).

En busca de datos más concretos, se han analizado otras investigaciones y se ha encontrado que se han llevado a cabo ensayos de exposición de larga duración (tres años) a agentes químicos (Browne *et al.*, 1975), cuyos resultados se muestran en la Tabla XXXVI.

Otros autores (Ribeiro, 2001) señalan que la pérdida de resistencia a flexión para un mortero polímero de poliéster puede llegar a ser hasta del 30% para morteros sumergidos en soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 10% o Cloruro de Sodio (NaCl) al 10% por un periodo de 90 días.

Agente químico	Grado de ataque
Grasas animal	Ninguno
Cerveza	Ninguno
Acido acético	Se desintegra
Gasoil	Amarillea ligeramente
Aceite	Oscurece
Acido láctico	Ninguno
Acido sulfúrico	Ligero ataque y pérdida de color
Orina	Ninguno

TABLA XXXVI: Resistencia química del PM de poliéster según Browne et al. 1975,

En las normas RILEM analizadas existe un método para ensayar morteros poliméricos, PC-12, *Method of test for chemical resistance of polimer concrete and mortar*, basado en la determinación de los cambios en la masa de la probeta y en su resistencia a flexión.

Sin embargo, en este caso, y dado el uso de revestimiento que se pretende dar al material ha parecido más oportuno realizar los ensayos exigibles para comprobar la resistencia química de baldosas utilizables para aplicaciones similares.

En siguiente apartado se describe la realización de los ensayos encaminados a determinar la resistencia a ataques químicos, y la comparación con los valores obtenidos para otros materiales utilizados para revestimientos.

III.6.2. Metodología

Para determinar la influencia real de los ataques químicos en el PM estudiado, se han realizado dos tipos de ensayos diferentes: determinación de resistencia a las manchas, según UNE-EN ISO 10545-14:1998, y ensayo de determinación de la resistencia química, según UNE-EN ISO 10545-13:1998. Ambos son aplicables para baldosas cerámicas.

a) Resistencia a manchas

Para realizar dichos ensayos se han tomado probetas de PM de tipo baldosa y dimensiones (150 × 150 × 10 mm). De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma, se tomaron 5 probetas de cada tipo (de cada dosificación OW / OS / IW / IS y de cada una de las tres edades estudiadas: control / 3 meses / 6 meses), limpiadas con agua y secadas en estufa a 100°C hasta masa constante. Posteriormente, y una vez enfriadas a temperatura ambiente se extienden sobre cada una de ellas:

- Manchas que dejan rastro: 3 ó 4 gotas de agente de mancha verde en aceite ligero (40% m/m de Cr₂O₃ y aceite ligero como el gliceril tributirato) sobre la superficie.
- Manchas de acción química oxidante: en una zona diferente 3 ó 4 gotas de yodo (solución alcohólica de 13 g/l).
- Manchas que forman capa: 3 ó 4 gotas de aceite de oliva.

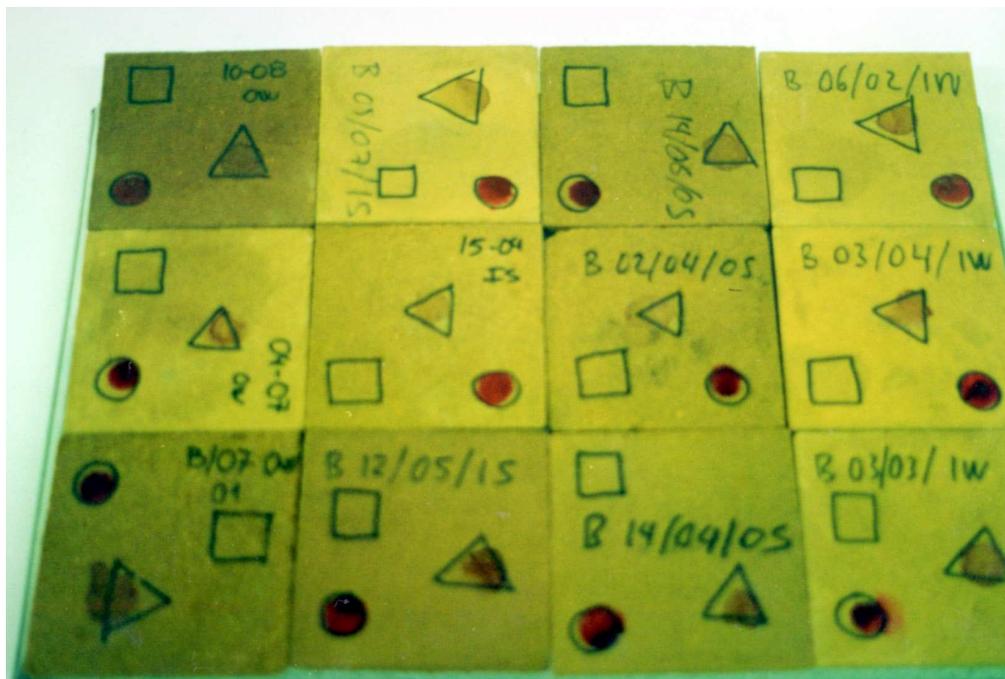


Figura 52. Ensayo de resistencia a manchas: realización del ensayo

Procedimiento de limpieza	Clasificación		
	Manchas que dejan rastro (Oxido de Cromo)	Manchas de acción química oxidante (Yodo)	Manchas que forman capa (aceite de oliva)
A	5	5	5
B	4	4	4
C	3	3	3
D	2	2	2
No se han eliminado	1	1	1

TABLA XXXVII: Clasificación de baldosas según ensayo de resistencia a las manchas, UNE 10545-14:1:1995

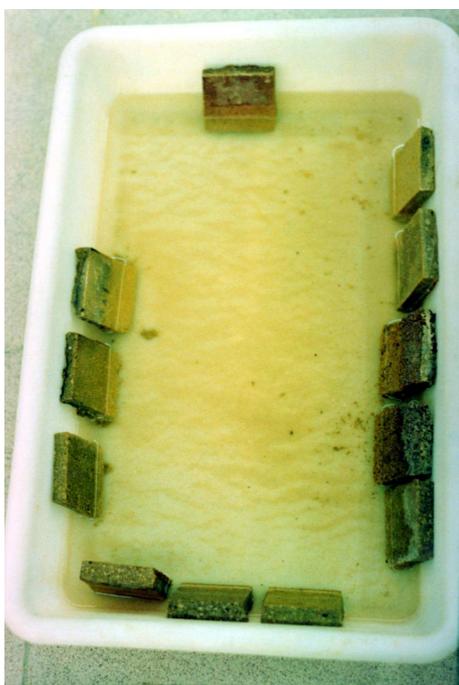
Se coloca sobre ellas un vidrio convexo de 30 mm de diámetro a fin de extenderlo, dejando actuar durante 24 horas. Posteriormente se seca de nuevo en la estufa a 110 °C y se somete a los siguientes procedimientos de limpieza de forma consecutiva hasta conseguir la eliminación de las manchas:

- Procedimiento A: Se ha eliminado la mancha limpiándola con agua caliente durante 5 minutos y finalmente enjuagado con un paño húmedo.
- Procedimiento B: Se ha eliminado la mancha limpiándola con un agente limpiador débil (agente de limpieza comercial no abrasivo con PH entre 6,5 y 7,5), y con una esponja. Después se ha enjuagado con agua caliente y un paño húmedo.
- Procedimiento C: Se ha eliminado la mancha con un medio mecánico (cepillo giratorio de pelo duro de 8 cm de diámetro con una frecuencia de agitación de unas 500 r/min) y un agente limpiador de fuerte actividad, (producto de limpieza comercial con abrasivo y PH entre 9 y 10), efectuándose la limpieza durante 2 minutos, enjuagando con agua corriente y por último con un paño húmedo.
- Procedimiento D: Se ha limpiado tras introducir la probeta durante 24 horas en HCl 3% V/V o KOH (solución de 200 g/l) y enjuagándola con abundante agua y por último con un paño húmedo.

Tras cada procedimiento de limpieza se ha observado la superficie a simple vista a una distancia de 25 a 30 cm y con luz de 300 lx. Las baldosas se clasifican según el método con el que se ha eliminado cada tipo de mancha.

b) Resistencia química

Para determinar la resistencia química, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma para baldosas cerámicas, se cortan de cada baldosa 5 probetas de 50×50 mm, de tal manera que uno de los bordes no haya sido cortado. Se limpia cuidadosamente la superficie con metanol y se secan en estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.



*Figura 53. Ensayo de resistencia química: realización del ensayo.
Solución de ensayo: Acido Clorhídrico al 3 %*

Solución acuosa de ensayo	Composición
Productos de limpieza doméstica	Cloruro amónico 100g/l
Sales para piscinas	Hipoclorito sódico 20 mg/l con un 13% de cloro libre
Ácidos y bases débiles	Acido Clorhídrico al 3% V/V Acido Cítrico 100 g/l Solución de hidróxido potasio 30 g/l
Ácidos y bases fuertes	Acido Clorhídrico al 18% V/V Acido Láctico al 5% V/V Solución de hidróxido potasio 100 g/l

TABLA XXXVIII: Clasificación de disoluciones para ensayo resistencia química, según UNE-EN-ISO 10545-13

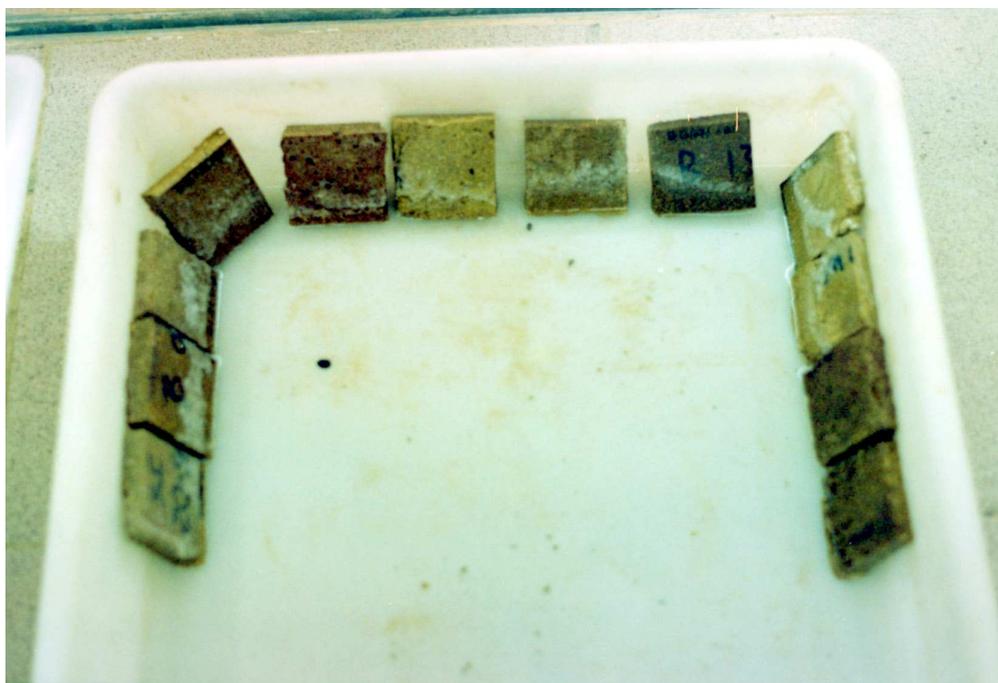
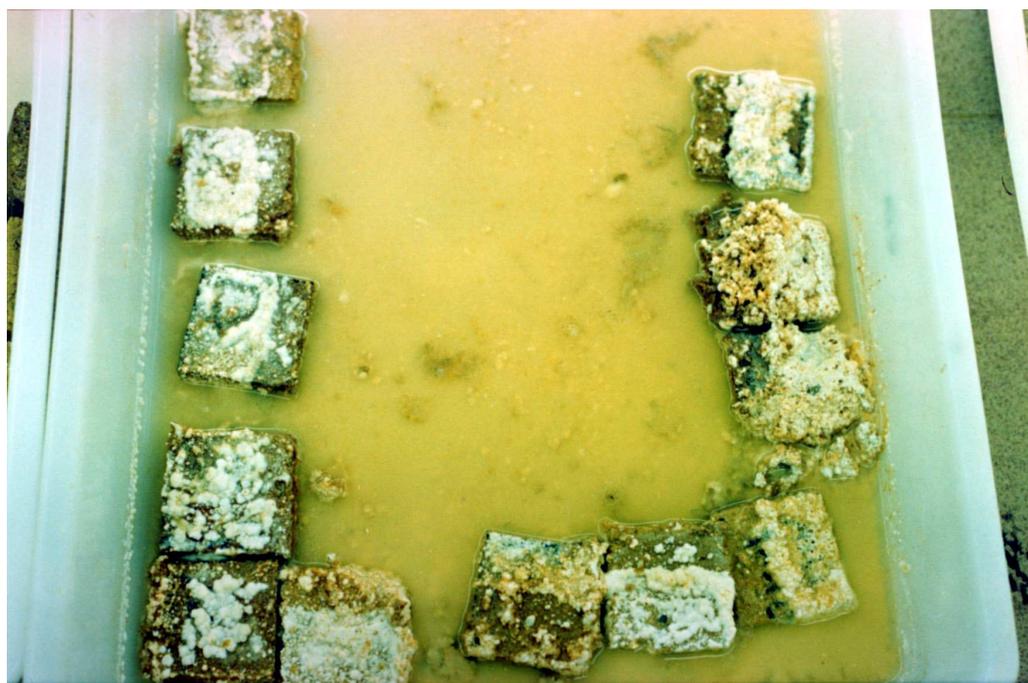


Figura 54. Ensayo de resistencia química: realización del ensayo. Solución de ensayo: cloruro amónico 100 g/l

Posteriormente, y una vez enfriadas a temperatura ambiente, se introducen 5 probetas verticalmente a una profundidad de 25 mm en cada recipiente quedando el lado no cortado completamente sumergido en cada una de las disoluciones indicadas en la Tabla XXXVIII. Se mantienen así durante doce días a 20 °C.



*Figura 55. Ensayo de resistencia química: realización del ensayo.
Solución de ensayo: Acido Cítrico 100 g/l*

Transcurrido ese tiempo se someten durante 5 días a la acción de agua corriente. Posteriormente se hierven durante 30 minutos completamente sumergidas y por último se secan con una gamuza limpia y se introducen en la estufa a 110 °C.

Tras la limpieza se ha observado la superficie a simple vista a una distancia de 25 a 30 cm y con luz de 300 lx para detectar los cambios en la cara vista y en el lado no cortado y en los restantes. Las baldosas se clasifican según se describe en la Tabla XXXIX.

Solución acuosa de ensayo	Clase	Defecto
Producto de limpieza doméstico	UA(V)	Sin defecto visible
	UB (V)	Clara modificación de aspecto
	UC (V)	Pérdida parcial o completa de la superficie original
Sales para piscinas	UA(V)	Sin defecto visible
	UB (V)	Clara modificación de aspecto
	UC (V)	Pérdida parcial o completa de la superficie original
Acidos y bases débiles	UA(V)	Sin defecto visible
	UB (V)	Clara modificación de aspecto
	UC (V)	Pérdida parcial o completa de la superficie original
Acidos y bases fuertes	UA(V)	Sin defecto visible
	UB (V)	Clara modificación de aspecto
	UC (V)	Pérdida parcial o completa de la superficie original

TABLA XXXIX: Clasificación de disoluciones para ensayo resistencia química, según UNE-EN-ISO 10545-13

III.6.3. Resultados

Para la resistencia a las manchas, los resultados en probetas de las tres edades (control, 3 meses de intemperie, y 6 meses de intemperie), y las cuatro dosificaciones (OW, OS, IW, IS) se expresan en la Tabla XL de la página siguiente.

Los resultados de resistencia química obtenidos en probetas de las tres edades y las cuatro dosificaciones se expresan en la Tabla XLI de la página siguiente.

Dosificación	Edad de las probetas	Clasificación		
		Manchas que dejan rastro (Oxido de Cromo)	Manchas de acción química oxidante (Yodo)	Manchas que forman capa (aceite de oliva)
OW	Control	2	4	4
	3 meses	1	4	4
	6 meses	2	4	4
OS	Control	2	4	4
	3 meses	2	4	4
	6 meses	3	4	4
IW	Control	2	4	4
	3 meses	1	4	4
	6 meses	1	4	4
IS	Control	1	4	4
	3 meses	1	4	4
	6 meses	1	4	4

TABLA XL: Resultados de las probetas ensayadas para ensayo de resistencia a las manchas, UNE 10545-14:1:1995

Dosificación	Edad de las probetas	Producto de limpieza doméstico	Sales para piscinas	Acidos y bases débiles		
		Lejía comercial	NH ₄ Cl	HCl 30 g/l	Acido Cítrico 100 g/l	KOH 30 g/l
OW	Control	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	3 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	6 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
OS	Control	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	3 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	6 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
IW	Control	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	3 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	6 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
IS	Control	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	3 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)
	6 meses	UA(V)	UA(V)	UA(V)	UC (V)	UA(V)

TABLA XLI: Resultados de las probetas ensayadas para ensayo de resistencia química, UNE-EN-ISO 10545-13

III.6.4. *Discusión de resultados*

Podemos observar que las manchas provocadas tanto por acción química oxidante (yodo), así como las manchas que forman capa (de aceite de oliva) son fácilmente eliminables en todos los casos, con el procedimiento B, es decir, con un agente de limpieza comercial no abrasivo y esponja. Sin embargo, las manchas denominadas manchas que dejan rastro (óxido de cromo), han necesitado para limpiarse el procedimiento D: introducir la probeta durante 24 horas en HCl 3% V/V y a pesar de ello en algunos casos aún son visibles las manchas en superficie.

En cuanto al ataque químico, no hay defectos visibles en ninguna de las baldosas sometidas a las distintas soluciones, excepto en las sumergidas en ácido cítrico, donde se observa claramente (Figura 55) que el ácido reacciona con el material y provoca en el polialbero, no sólo pérdida parcial o completa de la superficie original, sino que el material resulta fuertemente atacado, se reblandece y se disgrega.

a) Comparación árido seco / árido húmedo

No existe diferencia alguna en el comportamiento a las manchas ni en la resistencia química de ambos ensayos para las probetas realizadas con árido seco y las realizadas con árido húmedo.

b) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan diferencias entre los resultados obtenidos para una u otra frente a las manchas provocadas tanto por acción química oxidante (yodo), así como frente a las manchas que forman capa (de aceite de oliva), siendo fácilmente eliminables en todos los casos. Las manchas denominadas manchas que dejan rastro (óxido de cromo) sí presentan un

comportamiento diferenciado: en el caso de las probetas de resina ortoftálica se ha necesitado para su limpieza el procedimiento D (introducir la probeta durante 24 horas en HCl 3% V/V), pero se han eliminado dichas manchas.

En las probetas de resina isoftálica, a pesar de todos los procedimientos utilizados, aún son visibles dichas manchas en la superficie de las probetas.

No se detecta diferencia alguna en cuanto al comportamiento de resistencia al ataque químico.

c) Efecto de la exposición a la intemperie

Tal y como queda expresado en la Tabla XL, el comportamiento de las probetas ensayadas a lo largo del tiempo es constante para las manchas provocadas tanto por acción química oxidante (yodo) como por las manchas que forman capa (de aceite de oliva), puesto que son fácilmente eliminables en todos los casos con el procedimiento B.

Para las manchas que dejan rastro (óxido de cromo) sí se observa comportamiento diferenciado, pero no provocado por la edad de la probeta, sino por las diferencias específicas entre cada una de ellas, puesto que son notables las diferencias de color, provocadas por el color predominante del árido, algo distinto en cada acopio, como ya se comentó anteriormente (Figura 52). Como era de esperar, en las probetas de color más claro son más evidentes los restos de manchas, por lo que la sucesión de distintos valores para las probetas se corresponde en realidad a contraste entre probetas más claras y más oscuras y no con cambios de comportamiento del material a lo largo del tiempo.

En cuanto a la resistencia a distintas soluciones, ataque químico, su comportamiento no se modifica a lo largo del tiempo.

III.7. ESTUDIO CON ULTRASONIDOS

III.7.1. *Introducción*

El empleo de la técnica de análisis por ultrasonidos es ampliamente aceptada en el campo de la Resistencia de Materiales, siendo su ventaja fundamental el hecho de tratarse de una técnica no destructiva (Crnkovic, 1982). Además, las ondas ultrasónicas permiten detectar no sólo defectos visuales de los materiales (fisuras, huecos, etc.), sino que también es posible determinar otros índices como el grado de compacidad o disgregación intergranular (Guerrero *et al.*, 1989). Así, el estudio realizado a partir del espectro ultrasónico puede proporcionar, en medios limitados y heterogéneos, información muy valiosa relativa a la presencia de discontinuidades, como fisuras y disgregación intergranular, entre otras (Simon *et al.*, 1994).

Este ensayo pertenece al grupo denominado “Ensayos de información del hormigón”, según la EHE, que se refiere al empleo de métodos no destructivos fiables para analizar el hormigón de cemento portland.

En el campo de los composites existen un cierto número de investigaciones destinadas a evaluar los defectos en los composites a través de técnicas de ultrasonido, ya sea realizando imágenes ultrasónicas (Peñaranda, 1995), o en aplicaciones específicas más desarrolladas de materiales composites para la aeronáutica (Valdecantos, 1995).

En el campo de la construcción, junto con los ensayos de laboratorio, hay que plantearse el desarrollo de ensayos no destructivos y realizables en obra, que permitan con fiabilidad la evaluación de elementos realizados a base de composites, luego de montados, sin necesidad de inutilizarlos con la extracción de muestras. (Laffarga *et al.*, 1995).

III.7.2. Metodología

Los ultrasonidos son oscilaciones micromecánicas que se propagan a través de medios elásticos, ya sean éstos sólidos, líquidos, o gaseosos. El rango de frecuencias que se emplea para la diagnosis en estos materiales varía de 20 KHz a, aproximadamente, 1 MHz.

El parámetro más importante en los análisis ultrasónicos es la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, magnitud que se calcula como el cociente entre la distancia que recorre la onda y el tiempo de transmisión. El instrumental utilizado es un equipo de “pulso ultrasónico” que cuenta con un emisor y un receptor de ultrasonidos. La alimentación puede realizarse desde la red o bien por un acumulador de 6 V recargable automáticamente a través del circuito del equipo y que proporciona un servicio continuo durante más de diez horas.



Figura 56. Ensayo ultrasonido: toma de datos en probetas cilíndricas.

Después de conectar el equipo se hacen llegar, con intervalos de aproximadamente un segundo, impulsos eléctricos a un cristal o cerámica que entra en vibración (emisor) transformando los impulsos eléctricos en ultrasónicos. Un cristal similar (receptor o captador) recibe las vibraciones emitidas por el emisor. Los impulsos ultrasónicos son reconvertidos en señal eléctrica y conducidos a un amplificador especial de alta sensibilidad y a un sistema de medición de tiempos.

La frecuencia de vibración depende de la naturaleza del cristal piezoeléctrico y el poder de emisión es función de la potencia de los impulsos eléctricos de excitación.

La medida del tiempo de propagación desde el momento de la emisión hasta la recepción del impulso (en microsegundos) y de la energía recibida, se efectúa con la ayuda de un instrumento electrónico que consta principalmente de un cronómetro de gran precisión y de un osciloscopio que permite visualizar la llegada del frente de ondas. Adicionalmente se puede utilizar un amplificador de la señal.

El cristal y las piezas intermedias protegidas por una carcasa constituyen el transductor. Éste se pone en contacto con la superficie del material a auscultar y los impulsos ultrasónicos se transmiten generando un movimiento elástico de las partículas del material.

Para evitar al máximo los fenómenos de reflexión en la interfase y conseguir una transmisión de ondas adecuada entre los transductores y el material en estudio, es imprescindible que exista un buen contacto entre éstos y la superficie de la muestra, por lo que se intercala entre ambos un acoplante plástico (vaselina, gel, silicona, etc.).

Además, sobre los transductores debe mantenerse adaptada una presión constante para obtener una buena reproductibilidad de las medidas.

Existen dos tipos de equipos, dependiendo de si el emisor y el receptor están unidos o de si ambos elementos están separados. En los primeros – también denominados “ECOS” –, el cristal juega alternativamente los dos papeles en el mismo transductor. Con los segundos son posibles tres tipos de medidas:

- 1) **Transmisión directa o por transparencia.** El receptor se coloca en la cara opuesta al emisor y las ondas atraviesan el interior del material. Este tipo de medida suministra información para la caracterización litológica y determinación de los defectos en la piedra (oquedades, fracturas, etc.).
- 2) **Transmisión semidirecta.** El receptor se coloca a 90° del emisor. Estas medidas informan sobre la homogeneidad del material a diferentes distancias de la superficie. También se utilizan para conocer los espesores de sillares.
- 3) **Transmisión de superficie o indirecta.** Este método se utiliza en investigaciones muy concretas. El receptor se coloca en la misma superficie que el emisor. El método permite detectar las alteraciones próximas a la superficie y es muy indicado para determinar los espesores y la profundidad de las capas de alteración. Las medidas efectuadas antes y después de un tratamiento de la piedra sirven para estimar la efectividad del mismo.

En el sistema semidirecto y, particularmente en el método indirecto, la energía transmitida es menor que en el caso de una transmisión directa y por tanto, disminuye el alcance de la medición.

Las frecuencias de trabajo propuestas están comprendidas entre 20 y 200 KHz, el uso de la más adecuada depende de la composición del material aunque deben considerarse también otros factores, ya que la transmisión será más débil cuanto mayor sea la frecuencia, en función de la relación inversa existente entre ésta y la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{\text{Velocidad de propagación}}{\text{Frecuencia}}$$

La longitud de onda debe ser al menos tres veces superior al diámetro de los granos más groseros que constituyen el material de estudio, ya que únicamente así puede pasar una energía suficiente alrededor de los obstáculos sin dispersión notable.

En general, en los transductores se pueden encontrar dos tipos de superficies de apoyo, destinadas a transmitir las vibraciones al material: los de superficie plana y los de puntas. A éstos últimos también se les conoce como exponenciales y en los que la unión entre la cerámica piezoeléctrica y la muestra se efectúa por un punto cónico cuyo extremo es esférico y de pequeño diámetro.

Actualmente la utilización de la velocidad del sonido para el estudio de rocas, morteros y hormigones está definida por diferentes normas según los países. Las normas americanas ANSI/ASIM D 2845 (1969-1976) son las más completas y restrictivas (Rodríguez, 1999).

En este estudio el ensayo ultrasónico ha consistido en medir las variaciones de la velocidad de las ondas ultrasónicas empleando el método de la medida por transparencia. Las medidas se han realizado con un equipo STEIKAMP tipo BP V, con generación de ondas longitudinales. Los impulsos de excitación se obtienen aplicando una rápida variación de potencial y las lecturas de tiempo se efectúan sobre un indicador numérico digital con precisión de 0,1 μ s. Se han empleado transductores estándar cilíndricos de 36 mm de diámetro y emisión de frecuencia de 50 KHz.

La velocidad de los trenes de ondas (V) no se registra directamente sino que se calcula sobre la base del tiempo de propagación empleado en recorrer una distancia determinada. Para ello se hace uso de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{d}{t}$$

siendo d la distancia entre emisor y receptor, medida en centímetros, y t el tiempo de propagación determinado en microsegundos.

Previamente se han medido con exactitud, con ayuda del calibre digital las dimensiones de cada probeta, esto es, la distancia que habrá entre el emisor y el receptor.

III.7.3. Resultados

Los resultados obtenidos con el ultrasonido de las distintas probetas solamente pueden indicarnos si nos encontramos frente a un material homogéneo o si por el contrario se aprecian notables dispersiones, significándose más como indicadores cualitativos que como elementos cuantificadores de la capacidad resistente del material ensayado.

Sin embargo el objetivo primordial que se pretende con los ensayos de información es el de poder llegar a asignar, con suficiente fiabilidad, valores de resistencia a cada uno de los elementos ensayados. Ello puede conseguirse si tenemos presente que puede existir una correspondencia entre los valores de resistencia del material y su velocidad de propagación de ultrasonidos.

Poseyendo parejas de valores (velocidad de ultrasonido y resistencia), obtenidos de una misma probeta es factible, en teoría, establecer una correspondencia entre los valores de ensayos no destructivos (ultrasonido) y destructivos (rotura de probetas) mediante una correlación estadística.



Figura 57. Ensayo ultrasonido: toma de datos en probetas prismáticas.

CILINDRICAS CONTROL			INTEMPERIE 3 MESES			INTEMPERIE 6 MESES		
OW	ultras	R.Com	OW	ultras	R.Com	OW	ultras	R.Com
C 14-12	1.097	15,18				C 14-10	875	19,60
C 05-08	1.237	25,61	C 05-10	1.171	28,10	C 05-05	1.139	23,20
C 05-06	1.264	23,81						
C 06-07	913	14,32	C 06-01	1.046	16,60			
C 21-07	1.139	19,03						
C 03-09	1.194	17,94	C 27-10	993	15,20	C 27-06	1.139	24,90
Medias	1.141	19,31	Medias	1.070	19,97	Medias	1.051	22,57
Desv estándar	127	4,56	Desv estándar	91	7,08	Desv estándar	152	2,71
Int conf. 90%	85	3,06	Int conf. 90%	87	6,72	Int conf. 90%	145	2,57
OS	ultras	R.Com	OS	ultras	R.Com	OS	ultras	R.Com
C 20-06	1.062	14,87	C 20-07	1.484	16,70	C 20-08	560	20,70
C 10-10	1.421	18,14						
C 22-15	1.713	36,65				C 27-17	1.838	31,60
C 25-14	1.702	50,78						
C 25-04	1.844	61,86	C 25-09	1.566	45,30	C 25-15	1.860	40,50
Medias	1.548	36,46	Medias	1.525	31,00	Medias	1.419	30,93
Desv estándar	313	20,32	Desv estándar	58	20,22	Desv estándar	744	9,92
Int conf. 90%	230	14,95	Int conf. 90%	67	23,52	Int conf. 90%	707	9,42
IW	ultras	R.Com	IW	ultras	R.Com	IW	ultras	R.Com
C 15-05	1.174	22,45	C 15-09	1.078	30,30			
C15-04	1.110	28,51						
C 23-09	1.133	29,40	C 23-16	1.088	33,60	C 23-10	713	31,00
C 24-12	1.142	30,23				C 24-20	1.080	26,20
C 08-06	1.201	30,54				C 08-09	1.380	30,20
C 11-06	1.249	28,26	C 12-09	1.057	29,90			
Medias	1.168	28,23	Medias	1.074	31,27	Medias	1.058	29,13
Desv estándar	51	2,97	Desv estándar	16	2,03	Desv estándar	334	2,57
Int conf. 90%	34	2,00	Int conf. 90%	15	1,93	Int conf. 90%	317	2,44
IS	ultras	R.Com	IS	ultras	R.Com	IS	ultras	R.Com
C 18-09	954	13,88	C 18-12	1.230	32,00	C 18-01	624	23,50
C 26-09	1.212	43,02	C 26-13	1.631	51,50	C 26-08	1.635	57,30
C 11-10	1.464	29,96						
C 09-10	1.498	46,70	C 09-13	1.326	39,50			
C 16-04	1.089	17,22						
Medias	1.244	30,16	Medias	1.396	41,00	Medias	1.130	40,40
Desv estándar	236	14,76	Desv estándar	209	9,84	Desv estándar	715	23,90
Int conf. 90%	173	10,86	Int conf. 90%	199	9,34	Int conf. 90%	831	27,80

TABLA XLII: Ensayo de ultrasonido y valores de resistencia a compresión para probetas cilíndricas de control y sometidas a la intemperie. Valores medios. Valores de ultrasonido en cm/sg.

Caracterización de un mortero polimérico con resina U.P. y Albero para su aplicación en construcción

PRISMATICAS CONTROL			INTEMPERIE 3 MESES			INTEMPERIE 6 MESES		
OW	ultras	R.Com	OW	ultras	R.Com	OW	ultras	R.Com
P 10-03	3.000	32,89						
	3.000	30,41						
P 31-04	3.762	45,64	P 31-03	1.548	40,05	P 31-01	1.515	44,55
	3.762	46,39		1.548	39,51		1.515	47,53
P 17-03	4.528	51,40				P 17-05	1.097	29,92
	4.528	67,95					1.097	21,83
P15-01	4.027	29,83	P15-06	1.504	50,87			
	4.027	36,39		1.504	44,29			
Medias	3.829	42,61	Medias	1.526	43,68	Medias	1.306	35,96
Desv estándar	590	13,03	Desv estándar	25	5,25	Desv estándar	241	12,16
Int conf. 90%	343	7,58	Int conf. 90%	21	4,32	Int conf. 90%	198	10,00
OS	ultras	R.Com	OS	ultras	R.Com	OS	ultras	R.Com
P 08-06	3.000	34,14						
	3.000	37,41						
P 09-04	3.295	43,06	P 09-01	1.005	43,10			
	3.295	43,31		1.005	42,38			
P 14-01	3.629	30,89	P 14-03	1.326	52,64	P 13-01	1.210	56,91
	3.629	43,67		1.326	56,47		1.210	51,36
P 16-05	4.189	27,79	P 16-01	1.192	45,09	P 16-04	1.167	44,52
	4.189	32,02		1.192	60,45		1.167	44,08
Medias	3.528	36,54	Medias	1.174	50,02	Medias	1.189	49,22
Desv estándar	472	6,26	Desv estándar	144	7,59	Desv estándar	25	6,12
Int conf. 90%	275	3,64	Int conf. 90%	97	5,09	Int conf. 90%	20	5,03
IW	ultras	R.Com	IW	ultras	R.Com	IW	ultras	R.Com
P 12-02	3.933	51,91						
	3.933	52,76						
P 12-05	4.013	45,71	P 12-06	1.130	52,03	P 23-01	1.014	25,93
	4.013	45,54		1.130	52,86		1.014	30,74
P 25-01	3.739	41,90				P 25-03	995	19,96
	3.739	41,44					995	23,24
P 24-01	4.116	47,55	P 24-04	1.359	42,88	P 24-05	1.173	35,82
	4.116	47,90		1.359	41,09		1.173	48,18
Medias	3.950	46,84	Medias	1.245	47,22	Medias	1.061	30,65
Desv estándar	147,98	4,12	Desv estándar	132	6,09	Desv estándar	87	10,25
Int conf. 90%	86,05	2,40	Int conf. 90%	109	5,01	Int conf. 90%	59	6,88
IS	ultras	R.Com	IS	ultras	R.Com	IS	ultras	R.Com
P 11-04	4.511	70,41						
	4.511	65,16						
P 22-05	3.925	54,17	P 22-02	1.418	57,71	P 22-01	1.211	68,51
	3.925	49,69		1.418	52,96		1.211	60,42
P 27-05	3.306	34,41	P 27-05	1.358	27,91	P 21-05	874	20,83
	3.306	30,03		1.358	33,18		874	17,69
P 03-03	3.409	33,78						
	3.409	40,61						
Medias	3.788	47,28	Medias	1.388	42,94	Medias	1.043	41,86
Desv estándar	512,11	15,11	Desv estándar	35	14,60	Desv estándar	195	26,34
Int conf. 90%	297,81	8,79	Int conf. 90%	28	12,01	Int conf. 90%	160	21,66

TABLA XLIII: *Ensayo de ultrasonido y valores de resistencia a compresión para probetas prismáticas de control y sometidas a la intemperie. Valores medios. Valores de ultrasonido en cm/sg.*

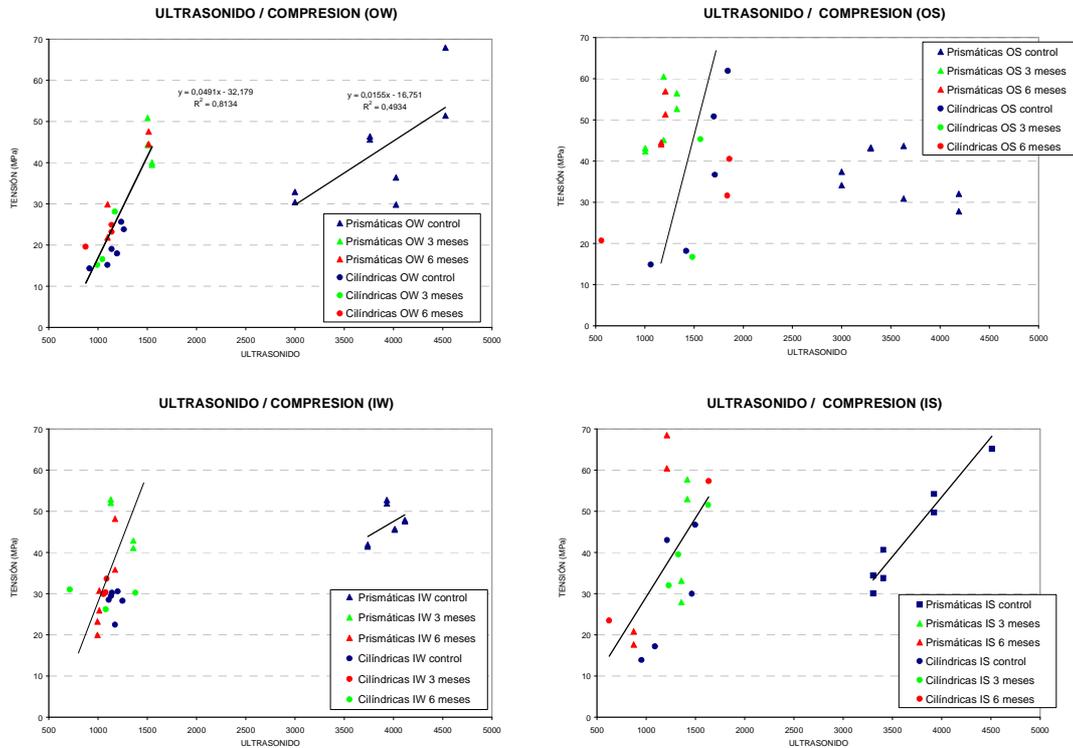


Figura 58. Correlación entre ultrasonidos y resistencias de probetas a compresión obtenidas para probetas cilíndricas y prismáticas

En la Figura 58 se expresan gráficamente los valores de correlación entre los datos obtenidos de resistencia a compresión, tanto para probetas prismáticas como cilíndricas, con el valor de ultrasonido. En las probetas cilíndricas las tomas de ultrasonido son realizadas en el sentido longitudinal de la probeta, que es el sentido de aplicación de la carga en este caso. Para las probetas prismáticas se han realizado tres tomas transversales, es decir en el sentido de aplicación de la carga a compresión. Se ha tomado como valor de velocidad de ultrasonido de la probeta prismática el valor medio de los tres datos tomados.

Además, en las gráficas se han representado las probetas con diferentes colores para indicar la edad de la muestra.

PRISMATICAS CONTROL			INTEMPERIE 3 MESES			INTEMPERIE 3 MESES		
OW	ultras	R.Flex	OW	ultras	R.Flex	OW	ultras	R.Flex
P 05-01	2.329	6,72	P 05-03	1.381	8,17			
P 10-03	2.492	7,97				P 20-05	978	4,51
P 20-02	2.707	4,52				P 31-01	1.730	14,91
P 31-04	3.161	13,68	P 31-03	1.672	12,78	P 17-05	1.737	9,33
P 17-03	3.605	17,51						
P 15-01	3.313	13,36	P 15-06	2067	16,02			
Medias	2.935	10,63	Medias	1.707	12,32	Medias	1.482	9,58
Desv estándar	502	4,98	Desv estándar	344	3,94	Desv estándar	436	5,20
Int conf. 90%	337	3,34	Int conf. 90%	327	3,75	Int conf. 90%	414	4,94
OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex
P 08-06	2.886	12,59						
P 09-04	3.118	11,67						
P 14-01	3.292	15,26	P 14-03	2.149	17,11	P 13-01	2.033	15,58
P 16-05	3.333	11,39	P 16-01	1.926	15,89	P 16-04	1.913	12,89
Medias	3.157	12,73	Medias	2.038	16,50	Medias	1.973	14,24
Desv estándar	204	1,76	Desv estándar	158	0,86	Desv estándar	85	1,90
Int conf. 90%	168	1,45	Int conf. 90%	150	0,82	Int conf. 90%	99	2,21
IW	ultras	R.Flex	IW	ultras	R.Flex	IW	ultras	R.Flex
P 12-02	3.200	13,98	P 12-06	1.674	16,42			
P 12-05	3.174	13,10						
P 25-01	3.011	13,01						
P 23-02	2.917	9,58				P 23-01	1.712	10,16
P26-05	2.025	7,49	P26-01	1.292	8,38	P 25-03	1.737	7,54
P 24-01	3.174	14,07	P 24-04	1965	17,23	P 24-05	1858	17,81
Medias	2.917	11,87	Medias	1.644	14,01	Medias	1.769	11,84
Desv estándar	451	2,70	Desv estándar	338	4,89	Desv estándar	78	5,34
Int conf. 90%	303	1,82	Int conf. 90%	321	4,65	Int conf. 90%	74	5,07
IS	ultras	R.Flex	IS	ultras	R.Flex	IS	ultras	R.Flex
P 11-04	3.698	18,26						
P 22-05	3.292	15,88	P 22-02	2.126	19,19	P 22-01	2.038	21,63
P 28-02	2.917	8,96	P 28-03	1.477	7,33	P 28-01	1.614	7,53
P 27-05	2.938	10,22	P 27-06	1.914	11,23			
P 03-03	2.837	9,38				P 21-05	1.588	7,52
Medias	3.051	12,54	Medias	1.839	12,58	Medias	1.747	12,22
Desv estándar	384	4,24	Desv estándar	331	6,04	Desv estándar	253	8,14
Int conf. 90%	258	3,12	Int conf. 90%	314	5,74	Int conf. 90%	240	7,73

TABLA XLIV: Ensayo de ultrasonido y valores de resistencia a flexión para probetas prismáticas de control y sometidas a la intemperie. Valores medios. Valores de ultrasonido en cm/sg.

CAMARA CICLO 1-VERANO			CAMARA CICLO 2-INVIERNO			CAMARA CICLO 1+2 (ANUAL)		
OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex
P 05-05	2.299	7,55	P 01-01	2.500	8,03	P 05-04	2.302	5,08
P 10-06	2.536	8,50	P 17-01	3.206	9,54	P 10-05	2.469	8,46
P 31-06	3.265	15,85	P 15-02	3.516	12,27	P 17-04	3.259	8,51
P 31-05	3.259	16,56	P 15-03	3.340	11,47	P 15-04	3.556	16,61
Medias	2.840	12,12	Medias	3.141	10,33	Medias	2.897	9,67
Desv estándar	497	4,75	Desv estándar	445	1,91	Desv estándar	606	4,90
Int conf. 90%	409	3,90	Int conf. 90%	366	1,57	Int conf. 90%	499	4,03
OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex	OS	ultras	R.Flex
P 08-03	2.996	7,13	P 08-01	3.113	13,53	P 08-05	2.698	10,91
			P 09-02	3.019	11,29	P 09-05	3.119	13,58
P 13-03	3.259	9,50	P 14-02	3.333	13,42	P 09-06	3.125	12,72
						P 16-06	3.548	12,91
Medias	3.127	8,32	Medias	3.155	12,75	Medias	3.123	12,53
Desv estándar	186	1,68	Desv estándar	161	1,26	Desv estándar	347	1,14
Int conf. 90%	216	1,95	Int conf. 90%	153	1,20	Int conf. 90%	285	0,94
IW	ultras	R.Flex	IW	ultras	R.Flex	IW	ultras	R.Flex
P 12-04	3.107	14,74	P 12-03	3.200	14,69	P 26-04	2.089	13,67
P 25-04	3.113	16,07	P 04-02	2.435	7,71	P 24-06	3.272	7,99
P 25-06	3.150	12,98	P 04-03	2.402	8,48	P 24-03	3.226	14,93
P 26-03	2.162	9,25	P 23-03	3.095	10,91	P 23-04	2.968	8,93
Medias	2.883	13,26	Medias	2.783	10,45	Medias	2.889	11,38
Desv estándar	481	2,96	Desv estándar	423	3,14	Desv estándar	550	3,43
Int conf. 90%	395	2,43	Int conf. 90%	348	2,58	Int conf. 90%	452	2,82
IS	ultras	R.Flex	IS	ultras	R.Flex	IS	ultras	R.Flex
P 22-06	3.354	18,02	P 11-01	3.721	19,20	P 11-05	3.738	21,91
P 28-06	2.703	7,22	P 27-01	3.107	10,63	P 22-03	3.463	18,70
P 28-05	2.802	6,76	P 27-02	3.053	10,03	P 27-04	3.065	10,14
P 03-06	2.883	13,09	P 21-02	2.749	6,69	P 21-04	2.568	6,42
Medias	2.935	11,27	Medias	3.158	11,64	Medias	3.209	14,29
Desv estándar	289	5,34	Desv estándar	407	5,33	Desv estándar	509	7,23
Int conf. 90%	237	4,39	Int conf. 90%	335	4,38	Int conf. 90%	418	5,94

TABLA XLV: Ensayo de ultrasonido y valores de resistencia a flexión para probetas prismáticas sometidas a cámara climática. Valores medios.

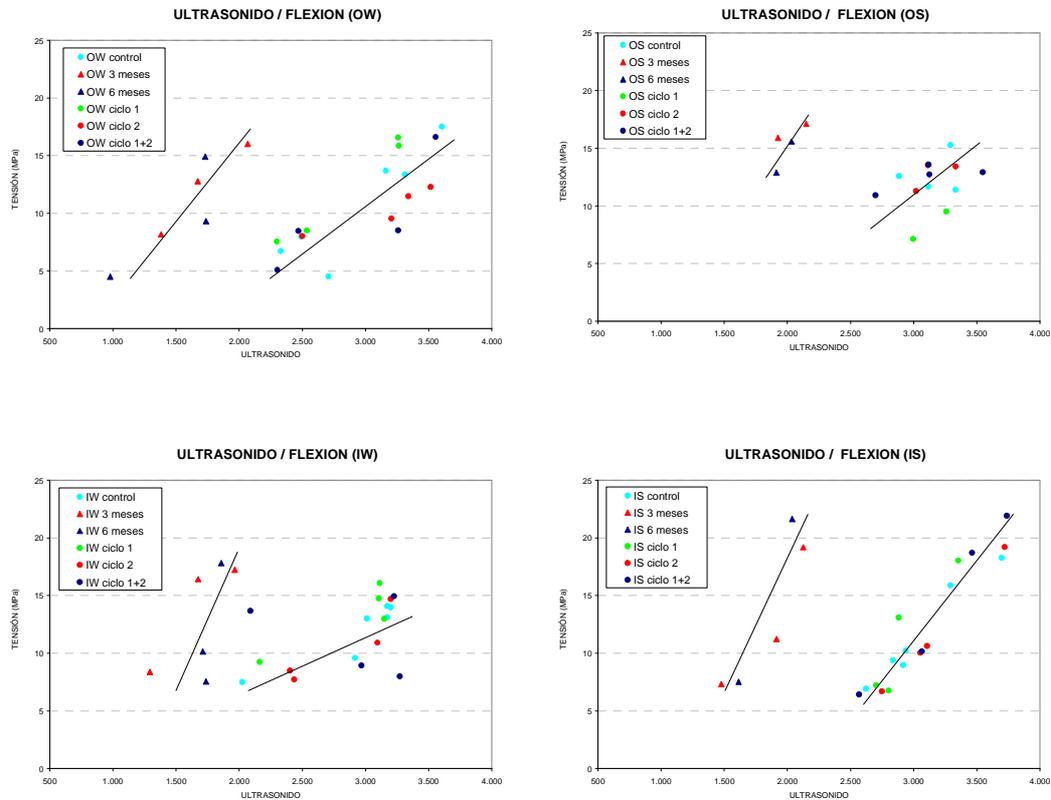


Figura 59. Correlación entre ultrasonidos y resistencias a flexión obtenidas para probetas prismáticas y cilíndricas

Un análisis similar se ha realizado para los valores de resistencia a flexión en el caso de las probetas prismáticas. En este caso el valor de ultrasonido tomado ha sido siempre el valor obtenido en la medición longitudinal de la probeta, prismática en todos los casos.

Hay que señalar que los valores de ultrasonido de las probetas ensayadas tras la cámara climática corresponden a tomas de ultrasonido en las mismas antes de introducirlas en la cámara, por haberse realizado en Sevilla antes de enviar las probetas a Oporto. Los datos de carga de rotura a flexión sí son los obtenidos tras el envejecimiento, manteniéndose una correlación similar a la obtenida para las probetas de control.

En cualquier caso, la dispersión de valores para resistencia a flexión es mucho mayor, siendo las rectas dibujadas sólo una aproximación gráfica y no el resultado de una correlación de datos estadística.

Buscando quizás una similitud de comportamiento entre este material y los morteros u hormigones de cemento se realizó esta misma sistemática para valores de velocidad de ultrasonido frente a valores de densidad aparente, observándose una gran disparidad de resultados. Véase, por ejemplo, las probetas IW, donde para el mismo valor de ultrasonido se obtienen densidades que varían de 1,65-1,90, por lo que se desestimó esa vía. Los gráficos obtenidos se muestran en la Figura 60.

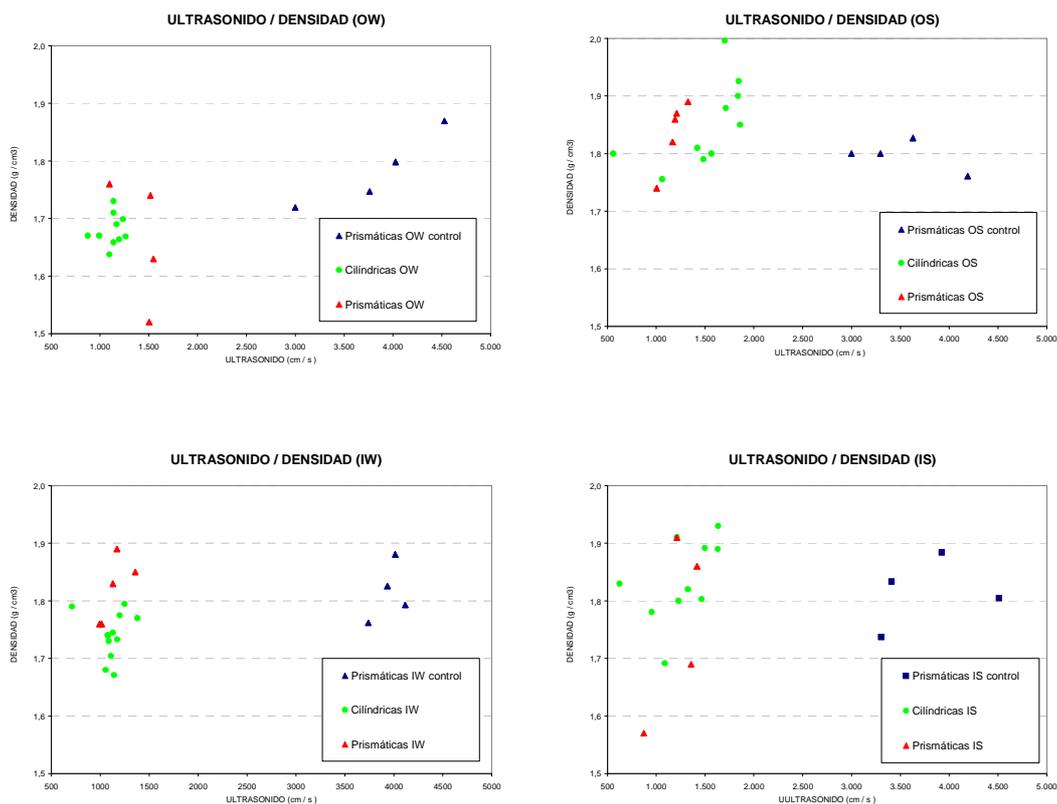


Figura 60. Correlación entre ultrasonidos y densidades aparentes obtenidas para probetas prismáticas y cilíndricas

III.7.4. *Discusión de resultados*

Con los resultados obtenidos se pretendía validar la hipótesis de una correlación entre la velocidad de propagación de ultrasonidos y la resistencia del PM, ya sea a compresión o a flexión o ambas.

Para los valores de resistencia a compresión en probetas de resina ortoftálica y albero húmedo sí es posible encontrar una recta (representada en la gráfica correspondiente OW de la Figura 58) que asegure una correspondencia bastante precisa (para esa recta de correlación el valor de $R^2 = 0,81$) entre los valores de resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido.

Sin embargo, para las demás dosificaciones, las rectas representadas no pueden ser calculadas matemáticamente. Han sido dibujadas a la vista de lo que parece una cierta tendencia de agrupación de los datos, pero no podemos determinar esa correlación de manera que sea un parámetro que de validez al ensayo no destructivo.

Por otra parte, para los datos de resistencia a flexión, tras el análisis de los datos obtenidos podemos decir que, si bien existe una cierta relación entre el valor ultrasonido y la resistencia a flexión, no puede determinarse una correlación exacta que permitiera determinar a través del valor de ultrasonido de la probeta su probable valor de resistencia a flexión.

Se ha pretendido también realizar un paralelismo con el comportamiento de otros materiales buscando una correspondencia entre los valores de densidad y velocidad de ultrasonido, pero a la vista de los datos obtenidos no se puede establecer tal relación para el mortero polimérico de albero.

a) Comparación árido seco / árido húmedo

La dispersión de los datos es mucho mayor tanto para valores de resistencia a compresión como para valores de resistencia a flexión para probetas realizadas con árido seco que para probetas realizadas con árido húmedo (para árido húmedo los datos están mucho más agrupados).

Esto hace que la correlación de valores sea factible e incluso sea posible, en uno de los casos, la interpolación de los mismos lo cual nos permite definir una ecuación que relacione los valores de ultrasonidos con las resistencias obtenidas, como se puede observar en la gráfica de resistencias a compresión para resina ortoftálica y árido húmedo.

En los restantes casos la dispersión de valores es mayor, provocada por la dispersión de los valores de resistencia comentadas en los ensayos anteriores.

b) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, no se detectan diferencias entre los resultados obtenidos para una u otra

c) Efecto de la exposición a la intemperie

En las Figuras 58 y 59 se puede detectar claramente que el valor de la velocidad de ultrasonido de las probetas ensayadas a lo largo del tiempo es variable: los valores de ultrasonido disminuyen enormemente tras la exposición a la intemperie (aproximadamente un 50%), lo que no se corresponde con una disminución de la resistencia sino con un desplazamiento hacia la izquierda de la recta de correlación. Este desplazamiento de la recta es de hecho la característica más llamativa de todo el gráfico, repitiéndose este comportamiento en todas las dosificaciones.

Esto es tan llamativo que en todas las gráficas representadas se dan dos agrupaciones de puntos: una con valores de ultrasonido mayores, situada a la derecha en cada gráfica y correspondiente a los valores de las probetas de control, y un descenso de dicho valor de ultrasonido en las edades de tres y seis meses a la intemperie.

Este descenso del valor de ultrasonido ha sido comprobado a su vez probeta por probeta en cada una de ellas, puesto que todas fueron medidas en el laboratorio antes de ser expuestas a la intemperie y nuevamente medidas antes de ser ensayadas en la prensa. Se comprobó el mismo porcentaje de descenso en probetas cilíndricas y prismáticas, tanto en valores longitudinales y transversales. Sin embargo, ese descenso del valor no se corresponde con un descenso de sus características resistentes.

Por eso lo que se produce en la gráfica es un desplazamiento de las agrupaciones de puntos hacia la izquierda. Y también por la misma razón en las probetas de la cámara, donde los valores de ultrasonidos son similares a los de las probetas de control (puesto que fueron tomados antes del inicio de los ensayos) y los valores de rotura posteriores al envejecimiento, los resultados se adaptan a las agrupaciones de puntos (que no rectas de interpolación) válidas para las probetas de control.

No se conoce la causa de este brusco descenso del valor de ultrasonido. Pero a la vista de los resultados y por todo lo anteriormente expuesto, entendemos que el análisis ultrasónico no es un ensayo válido para caracterizar a este material.

III.8. COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA: ABSORCIÓN, SUCCIÓN Y SECADO

III.8.1. *Introducción*

La succión capilar suele ser una causa muy frecuente del deterioro de los materiales de revestimiento. El agua de capilaridad asciende desde las aguas presentes en el terreno, ya sean aguas colgadas o freáticas. Las denominadas aguas colgadas proceden de los saneamientos y las conducciones de agua potable que por rotura o defecto de colocación filtran aguas. En el caso de Sevilla pueden llegar a ser hasta el 20-30% del caudal circulatorio. En épocas lluviosas este nivel se incrementa hasta el punto de alcanzar la cota -1m con respecto al acerado. Las aguas freáticas van cargadas de sales agresivas de diversa naturaleza, desde aquellas procedentes de la descomposición de la materia orgánica que se filtra de los saneamientos por rotura o mala conexión de los mismos, hasta las originadas por los morteros, productos empleados en reparaciones, sellado de elementos, etc. No debe olvidarse que el agua capilar solo necesita para ascender que el terreno o elemento de apoyo esté húmedo, sin que sea necesario el contacto directo con el agua para que se materialice este ascenso.

El agua asciende por los capilares o conductos finos, como consecuencia de la alta porosidad del árido y de la estructura del material. La altura o alcance de la ascensión es función, entre otros factores, del diámetro del capilar verificándose que, a menor diámetro, mayor es la altura alcanzada. Otro factor de elevada influencia es la presencia de fisuras o coqueas en la probeta (Rodríguez, 1999).

De acuerdo con la bibliografía consultada, el método de absorción capilar es adecuado para medir el volumen real de huecos y el volumen de los poros capilares para rocas, morteros y hormigones de cemento, pero según algunos estudios experimentales realizados, ha resultado muy limitado para medir la porosidad total y el volumen de poros capilares accesibles en un determinado tiempo de absorción para morteros y hormigones con polímeros (Justnes *et al.*, 1995).

También en la bibliografía consultada podemos encontrar (Mebarkia *et al.*, 1995) que la resistencia a compresión de un PM de poliéster sumergido en agua durante un año descendió de 66 MPa a 47,5 Mpa. En los mismos ensayos se incluían probetas de control sólo de resina. Éstas sólo sufrieron un descenso del 5% en su resistencia a compresión, por lo que se concluye señalando la fuerte degradación que sufre la interfase entre la resina y el árido debido a la acción del agua. No obstante, esta acción del agua es reversible porque si las probetas son secadas previamente a la realización del ensayo se produce una recuperación completa de su resistencia.

De acuerdo con los objetivos del trabajo y según la bibliografía consultada, el estudio del comportamiento hídrico se ha planteado de forma tal que permita determinar como aspectos más importantes:

- Absorción libre de agua por inmersión total a presión atmosférica.
- Succión de agua por capilaridad.
- Desorción de agua.

Los tres ensayos se han realizado sobre probetas cilíndricas de aproximadamente 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Para la realización de los ensayos de agua por inmersión y de succión de agua por capilaridad, las probetas se desecaron previamente en estufa a 60° C durante 24 horas, ya que con esta temperatura se evitan alteraciones inducidas en el material. A continuación se introducen en un desecador y se dejan enfriar hasta peso constante, es decir, hasta que la diferencia entre dos pesadas consecutivas separadas 24 horas sea menor o igual al 0,01 % de la masa inicial de la probeta. De este modo se obtiene el peso seco (Ps).

Las normas de RILEM PC-11 TC-113 únicamente contienen ensayos de absorción, por lo que en lo que se refiere a los restantes parámetros han sido determinados con normas no específicas para morteros poliméricos, normas españolas e italianas (UNE 22-172-85 y CNR – ICR Normal F/1 – 7/81, 1981, respectivamente).

Los tres ensayos han sido realizados con las probetas de control hasta saturación de agua o peso constante. A la vista de los datos obtenidos para estas primeras probetas, en las probetas restantes de tres y seis meses a la intemperie se han finalizado los ensayos a las 48 horas, tal y como especifican las normas de ensayos.

III.8.2. Absorción libre de agua por inmersión total a presión atmosférica. Metodología

El contenido en agua debido a la absorción libre, $W(t)$, se define como la masa de agua desionizada absorbida por la probeta referida a su estado seco por unidad de masa de probeta seca.

Para obtener la masa de agua absorbida por la probeta se sumergen lentamente en un baño de agua desionizada a temperatura ambiente (20 a 25° C) y se determina el peso de éstas a intervalos regulares de la raíz cuadrada del tiempo. Antes de realizar las pesadas se elimina el exceso de agua superficial con un paño húmedo. De esta forma se obtiene el peso de la probeta para un cierto estado húmedo en función del tiempo de inmersión $P(t)$.

El contenido del agua debido a la absorción libre para un cierto estado húmedo se determina según la expresión:

$$W(t) = [P(t) - P_s] / P_s \times 100$$

Siendo $P(t) - P_s$ la masa de agua absorbida por la probeta.

Los tiempos de referencia varían según las distintas normas, aunque el concepto más aceptado es el contenido en agua a los dos días del ensayo. La norma utilizada para este ensayo es la RILEM PC-11 TC-113.

El contenido de agua para tiempos largos corresponde a los valores de equilibrio y éstos se alcanzan cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas espaciadas 24 horas, es menor que el 0,1%.



Figura 61. Ensayo de absorción de agua por inmersión a presión atmosférica

III.8.3. Succión de agua por capilaridad. Metodología

La determinación de la cinética del proceso de absorción de agua por capilaridad de los materiales de revestimiento tiene gran importancia. Para estimar este proceso se ha diseñado el ensayo colocando las probetas en bandejas de plástico disponiendo un soporte poroso que asegure un buen contacto entre el agua y la superficie de apoyo de la probeta, una cama de arena silíceo de 3 cm de espesor.

Seguidamente se sumergen las bases de las probetas secas hasta una altura de unos 2 mm de agua desionizada y se añade, lentamente, más agua desionizada evitando que el

nivel supere el borde del soporte. Este nivel de agua, así como la temperatura y humedad relativa (20 – 25 °C y 70% HR), deben permanecer constantes durante la realización del ensayo.



Figura 62. Ensayo de succión de agua por capilaridad

La ganancia de peso se controla a intervalos de tiempo regulares (expresados en minutos), pesando las probetas tras retirar con un paño húmedo el exceso de agua superficial en la base de la probeta. Así se obtiene el peso de la probeta para un cierto estado húmedo en función del tiempo de succión, $P_c(t)$.

Realizado este ensayo puede determinarse el contenido de agua por capilaridad, $W_c(t)$

$$W_c(t) = [P(t) - P_s] / P_s \times 100$$

siendo P_s el peso de la probeta al inicio del ensayo.

III.8.4. Desorción de agua. Metodología

Cuando se afronta el comportamiento ante el agua de un material no sólo debe estudiarse la capacidad del material para absorber y retener agua en su interior, sino también el proceso de secado del mismo. En rocas de baja porosidad el secado se manifiesta rápidamente sobre la superficie, aparecen zonas secas que van creciendo hasta ponerse en contacto, lo que ocasiona manchas, relacionada con ciertos rasgos texturales, como contacto entre granos y fisuras.

Para realizar el ensayo se han introducido las probetas, saturadas de agua a presión atmosférica, la estufa a 40 °C y posteriormente en desecador a temperatura ambiente, 20-25 °C y 70% de humedad. El peso de las probetas se determina a intervalos regulares de tiempo, obteniendo así el peso para un cierto estado húmedo, $P'(t)$, finalizando el ensayo cuando dos pesadas consecutivas, separadas 24 horas difieren menos del 0,1%.

Con estos datos se elaboran las curvas de desorción de agua, ya que éste es un buen indicador de la capacidad respiratoria de un material (Villegas *et al.* 1992). El contenido de agua presente en el material $W_s(t)$ se determina mediante la expresión:

$$W_s(t) = [P'(t) - P_s] / P_s \times 100$$

III.8.5. Resultados Absorción

Se expresan a continuación en la Tabla XLVI los resultados obtenidos en ensayos de absorción de agua (en %), expresando además valores medios y los parámetros estadísticos correspondientes.

Para ello se han dispuesto en primer lugar los datos de los ensayos hasta las 48 horas, tal y como especifica la norma RILEM PC-11 TC-113, realizados para probetas de control.

PROBETAS DE CONTROL			INTEMPERIE 3 MESES		INTEMPERIE 6 MESES	
OW	Absorción 48 h %	Absorción equilibrio	OW	Absorción 48 h %	OW	Absorción 48 h %
C 05-03	5,31	5.89	C 03-02	5,58	C 21-15	6,45
C 03-04	5,86	6.92	C 27-15	5,94	C 06-02	5,82
C 27-11	4,40	6.01	C 21-09	5,77	C 27-03	4,93
C 14-08	6,08	7.35				
Medias	5,41	6,54	Medias	5,76	Medias	5,73
Desv.	0,75	0,71	Desv.	0,18	Desv.	0,76
Int. Conf 90%	0,62	0,58	Int. Conf 90%	0,17	Int. Conf 90%	0,72
OS	Absorción 48 h %	Absorción equilibrio	OS	Absorción 48 h %	OS	Absorción 48 h %
C 22-10	1,14	2.31	C 10-06	2,60	C 25-08	0,29
C 20-01	4,67	7.65	C 19-03	5,16	C 10-05	2,80
C 10-01	4,00	5.42	C 25-11	0,17	C 19-13	3,90
Medias	3,97	5,13	Medias	2,65	Medias	2,33
Desv.	2,07	2,68	Desv.	2,50	Desv.	1,85
Int. Conf 90%	1,71	2,55	Int. Conf 90%	2,37	Int. Conf 90%	1,76
IW	Absorción 48 h %	Absorción equilibrio	IW	Absorción 48 h %	IW	Absorción 48 h %
C 11-02	0,92	2.12	C 12-11	5,95	C 08-12	5,47
C 23-17	6,54	7.19	C 11-11	4,28	C 11-03	4,11
C 00-00	3,74	5.13	C 08-08	5,50	C 24-06	6,27
C 15-01	6,20	6.59				
Medias	4,35	5,41	Medias	5,24	Medias	5,28
Desv.	2,60	2,45	Desv.	0,86	Desv.	1,09
Int. Conf 90%	2,14	2,01	Int. Conf 90%	0,82	Int. Conf 90%	1,04
IS	Absorción 48 h %	Absorción equilibrio	IS	Absorción 48 h %	IS	Absorción 48 h %
C 26-03	0,13	1.38	C 26-06	0,39	C 26-19	0,38
C 18-03	1,31	3.02	C 18-05	1,46	C 18-10	1,84
C 26-05	0,52	0.97	C 26-11	0,27		
Medias	0,66	1,79	Medias	0,71	Medias	1,11
Desv.	0,60	1,08	Desv.	0,65	Desv.	1,03
Int. Conf 90%	0,57	1,03	Int. Conf 90%	0,62	Int. Conf 90%	1,20

TABLA XLVI: Ensayo de absorción de agua probetas cilíndricas. Valores medios a 48 horas y en el equilibrio.

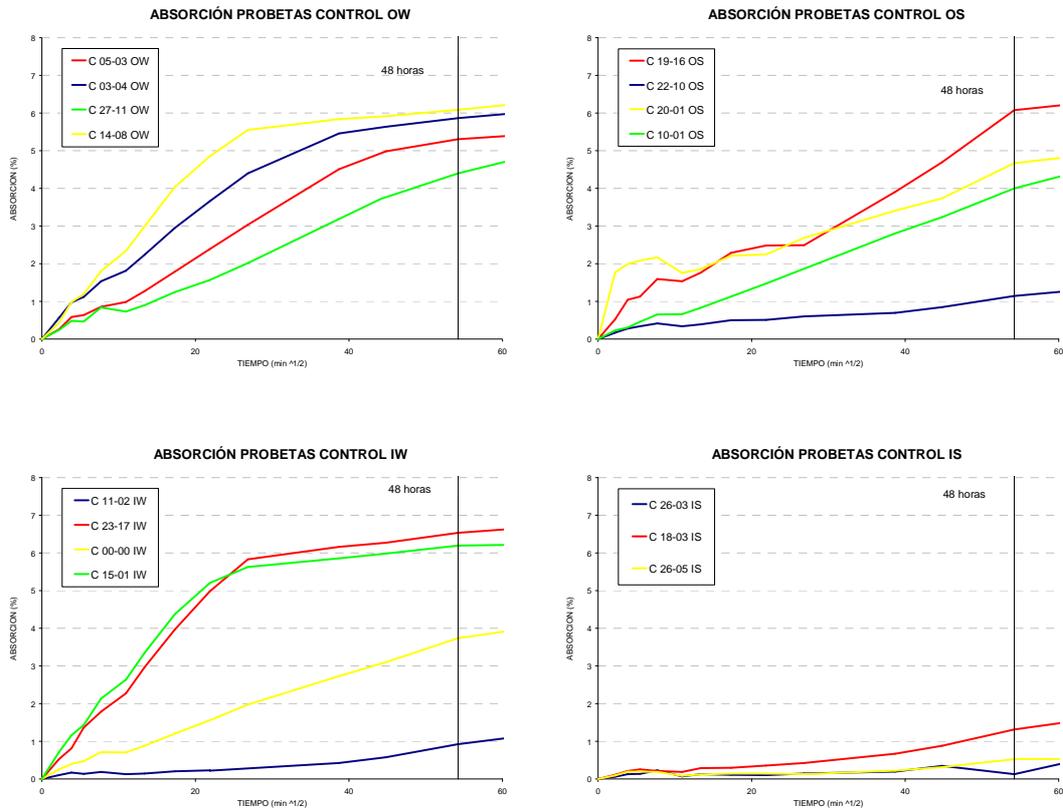


Figura 63. Curvas de absorción de agua a 48 horas, de probetas de control

Se muestran los resultados de absorción para todas las probetas ensayadas. Además, en las probetas de control se ha continuado el ensayo hasta determinar el contenido de agua para tiempos largos, correspondiente a los valores de equilibrio, es decir cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas, espaciadas 24 horas es menor que el 0.1%. Esto permite conocer la absorción real del material y contrastados con los datos de absorción a 48 horas, saber si éstos no son más que un valor teórico o se aproximan a la absorción total realizada por este material.

Pretendemos así comprobar las pautas del comportamiento del material y en los ensayos restantes continuar o no con los ensayos más allá de las primeras 48 horas.

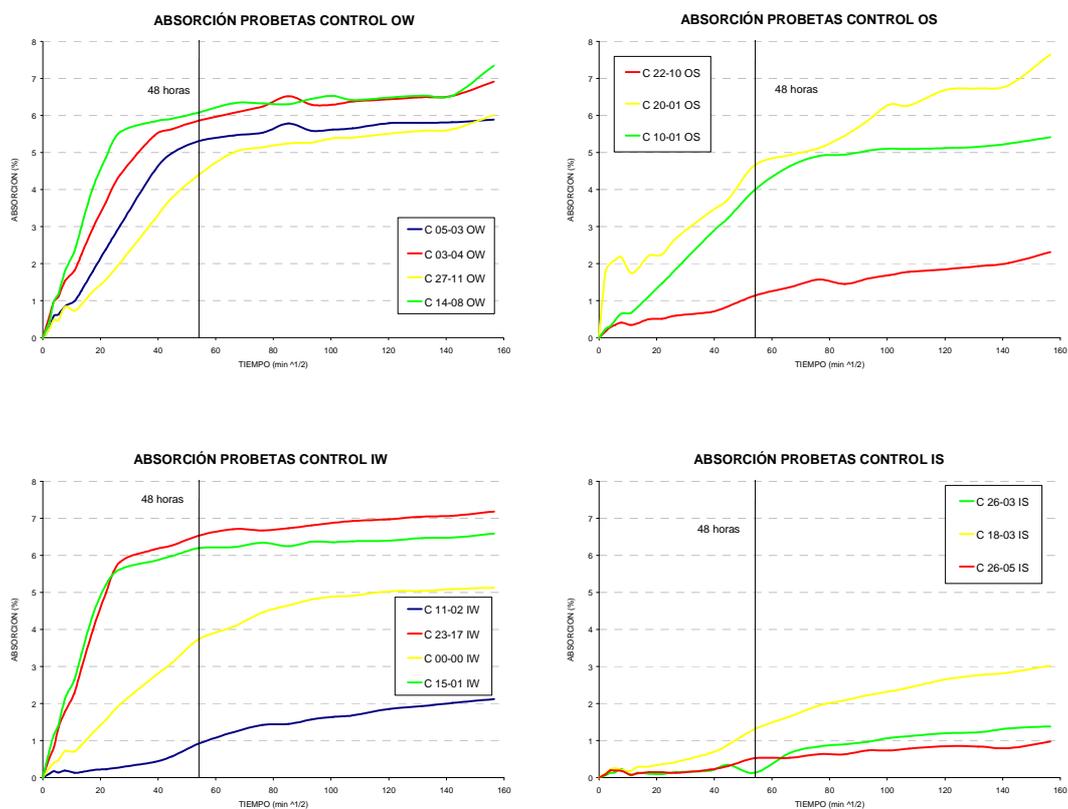


Figura 64. Curvas de absorción de agua hasta peso constante de probetas de control

En la Figura 63 se presentan las curvas de absorción de las probetas hasta las 48 horas, expresadas en absorción de agua, en porcentaje, frente al tiempo (el tiempo se muestra en raíz cuadrada de minutos, según especifica la norma RILEM PC-11 TC-113).

Estas curvas se encuentran agrupadas, al igual que en ensayos anteriores, según la edad de las probetas (probetas de control y probetas ensayadas tras tres y tras seis meses a la intemperie).

En cada caso se han dividido según la dosificación de resina (ortoftálica o isoftálica) y árido utilizado (seco / húmedo), denominadas: OW / OS / IW / IS.

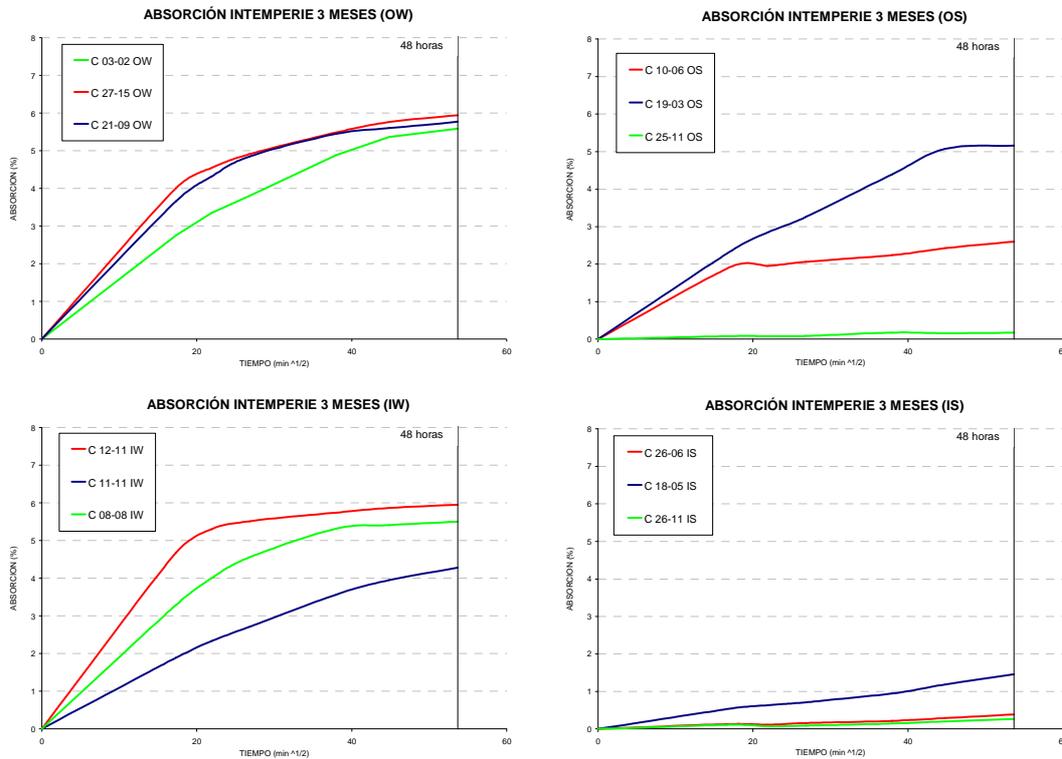


Figura 65. Curvas de absorción de agua a 48 horas, de probetas tras tres meses a la intemperie

En la Figura 64 podemos observar (a menor escala) el comportamiento de dichas probetas hasta alcanzar el equilibrio, esto es, 21 días después de haberse iniciado el ensayo. En la mayoría de las probetas los rangos de absorción son muy parecidos a los obtenidos a las 48 horas. Podemos afirmar que no hay grandes diferencias entre el comportamiento a 48 horas y el valor obtenido al finalizar el ensayo. Es decir, en general se puede concluir que se trata de materiales que se saturan pronto.

A la vista de lo anterior y de la excesiva duración de los ensayos hasta equilibrio, los restantes ensayos de probetas tras tres y seis meses a la intemperie (Figuras 65 y 66) se han realizado únicamente hasta las 48 horas.

El objetivo de estos ensayos es evaluar si se produce variabilidad del comportamiento del material ante el agua cuando se degrada al exponerse a la intemperie.

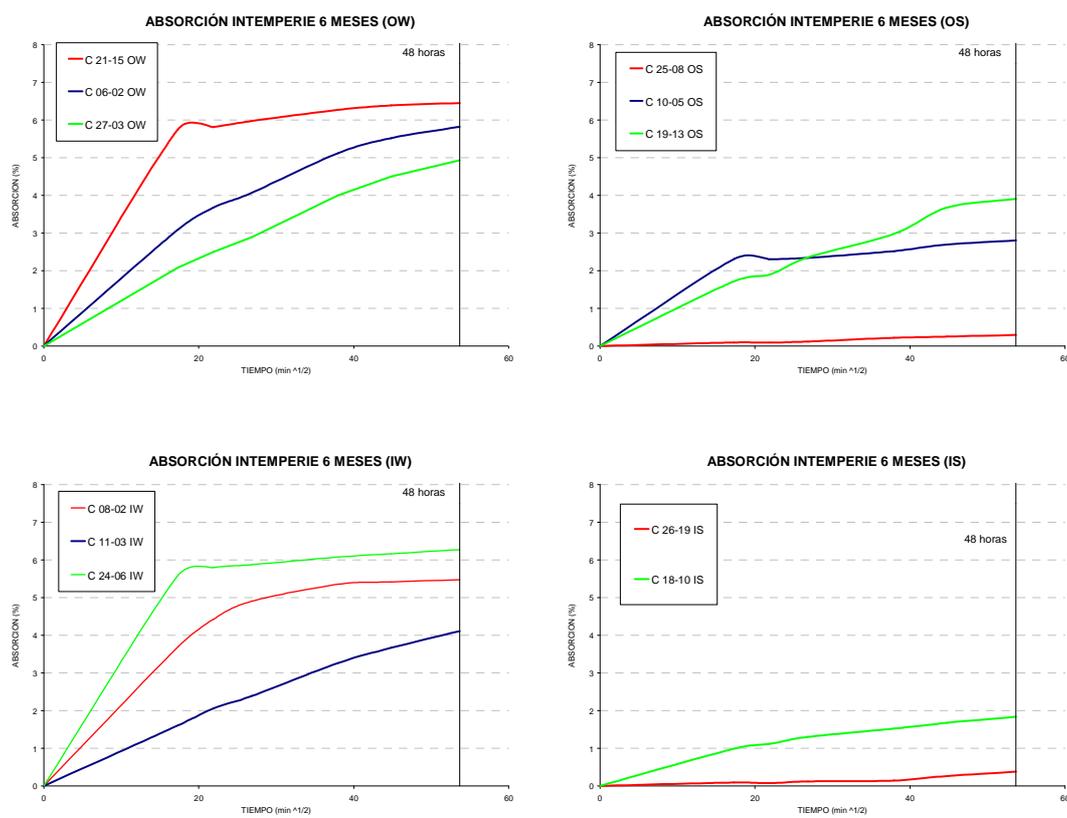


Figura 66. Curvas de absorción de agua a 48 horas, de probetas tras seis meses a la intemperie

III.8.6. Resultados Succión

En la Tabla XLVII se muestran los resultados obtenidos en ensayos de succión de agua (en %), expresando además valores medios y los parámetros estadísticos correspondientes.

Para ello se han dispuesto en primer lugar los datos de los ensayos hasta las 48 horas, tal y como especifica la norma UNE 22-172-85, realizados para probetas de control.

PROBETAS DE CONTROL			INTEMPERIE 3 MESES		INTEMPERIE 6 MESES	
OW	Succión 48 h %	Succión equilibrio	OW	Succión 48 h %	OW	Succión 48 h %
C 21-08	2,70	6,66	C 27-09	1,03	C 27-01	1,47
C 14-06	1,91	5,79	C 14-04	2,36	C 05-02	1,67
C 06-08	1,24	3,67	C 06-11	1,06	C 14-09	1,77
C 06-04	1,19	3,60				
Medias	1,76	4,93	Medias	1,48	Medias	1,64
Desv.	0,71	1,54	Desv.	0,76	Desv.	0,15
Int. Conf 90%	0,58	1,26	Int. Conf 90%	0,72	Int. Conf 90%	0,15
OS	Succión 48 h %	Succión equilibrio	OS	Succión 48 h %	OS	Succión 48 h %
C 10-02	0,91	2,66	C 19-07	1,38	C 22-19	0,95
C 25-07	0,10	0,36	C 25-03	0,06	C 25-01	0,13
C 04-06	1,57	4,12	C 25-13	0,13	C 20-04	0,70
C 22-16	0,62	0,99				
Medias	0,80	2,03	Medias	0,52	Medias	0,59
Desv.	0,61	1,70	Desv.	0,74	Desv.	0,42
Int. Conf 90%	0,50	1,40	Int. Conf 90%	0,70	Int. Conf 90%	0,40
IW	Succión 48 h %	Succión equilibrio	IW	Succión 48 h %	IW	Succión 48 h %
C 08-02	1,37	4,25	C 24-19	4,99	C 15-03	3,95
C 12-12	3,61	6,25	C 15-07	3,61	C 12-10	2,99
C 24-14	4,16	7,03	C 12-07	2,89	C 23-14	4,41
C 24-18	4,79	7,29				
Medias	3,48	6,21	Medias	3,83	Medias	3,78
Desv.	1,49	1,38	Desv.	1,07	Desv.	0,73
Int. Conf 90%	1,22	1,13	Int. Conf 90%	1,02	Int. Conf 90%	0,69
IS	Succión 48 h %	Succión equilibrio	IS	Succión 48 h %	IS	Succión 48 h %
C 07-12	0,92	3,24	C 26-12	0,09	C 26-10	0,08
C 09-04	0,39	1,17	C 18-11	0,51	C 09-07	0,24
C 15-07	0,89	2,25	C 09-11	0,20		
C 26-04	0,15	0,42				
Medias	0,59	1,77	Medias	0,27	Medias	0,16
Desv.	0,38	1,23	Desv.	0,22	Desv.	0,11
Int. Conf 90%	0,31	1,02	Int. Conf 90%	0,21	Int. Conf 90%	0,13

TABLA XLVII: Ensayo de succión de agua en probetas cilíndricas. Valores medios a 48 horas y en el equilibrio.

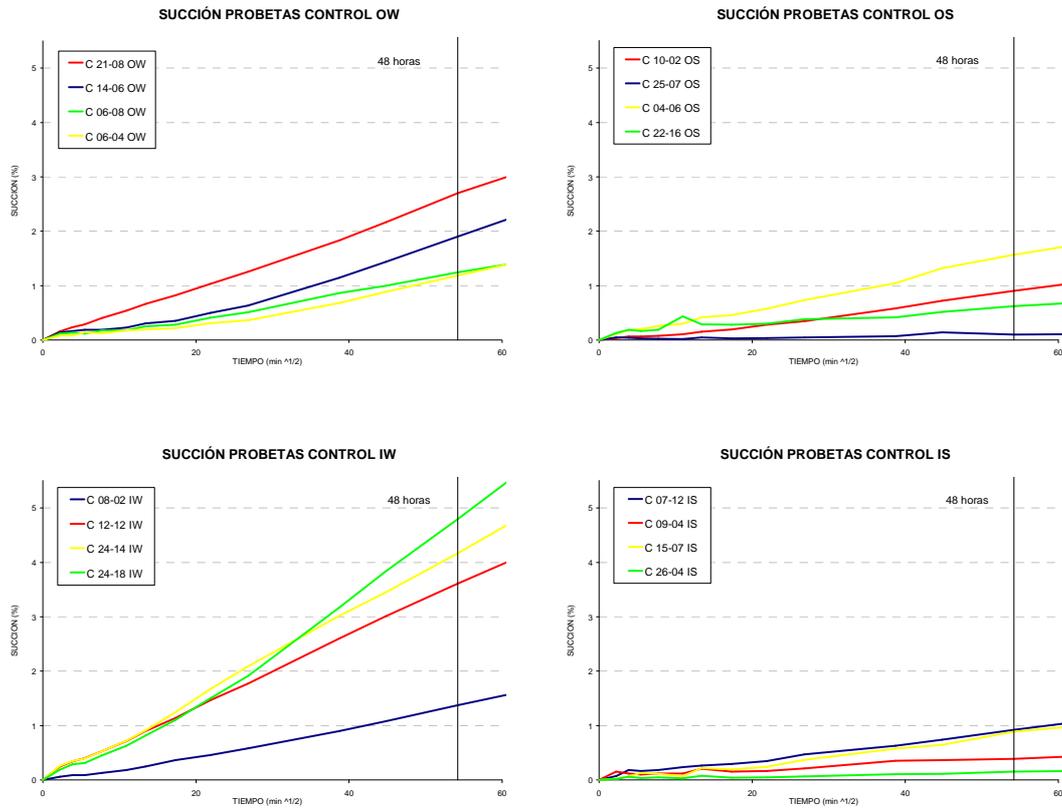


Figura 67. Curvas de succión de agua a 48 horas, de probetas de control

Se muestran los resultados para todas las probetas ensayadas. También en estas primeras probetas de control se ha continuado el ensayo hasta determinar el contenido de agua correspondiente a los valores de equilibrio, es decir cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas, espaciadas 24 horas es menor que el 0.1%. Esto permite conocer la succión real del material y, una vez contrastados con los datos de succión a 48 horas, saber si éstos no son más que un valor teórico o se aproximan a la succión por capilaridad total realizada por el mortero.

Pretendemos así comprobar las pautas del comportamiento del material y en los ensayos restantes continuar o no con los ensayos más allá de las primeras 48 horas, como en el caso de los ensayos de absorción.

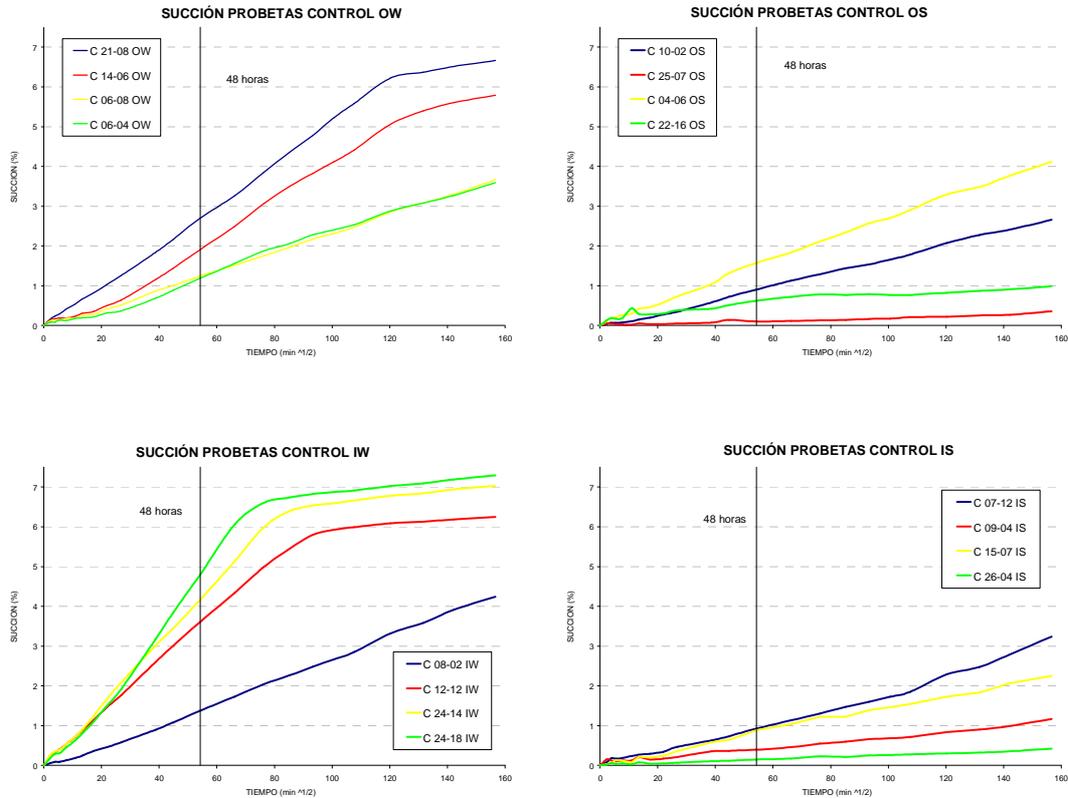


Figura 68. Curvas de succión de agua hasta peso constante, de probetas de control

En la Figura 67 de la página anterior se presentan las curvas de absorción de las probetas hasta las 48 horas, expresadas en absorción de agua, en porcentaje, frente al tiempo (el tiempo se muestra en raíz cuadrada de minutos, según especifica la norma RILEM PC-11 TC-113).

En la Figura 68 se puede observar el comportamiento de las mismas probetas cuando son llevadas hasta el equilibrio. Podemos observar que en este caso sí son mayores las diferencias en el comportamiento a 48 horas y el valor obtenido al finalizar el ensayo a los 21 días.

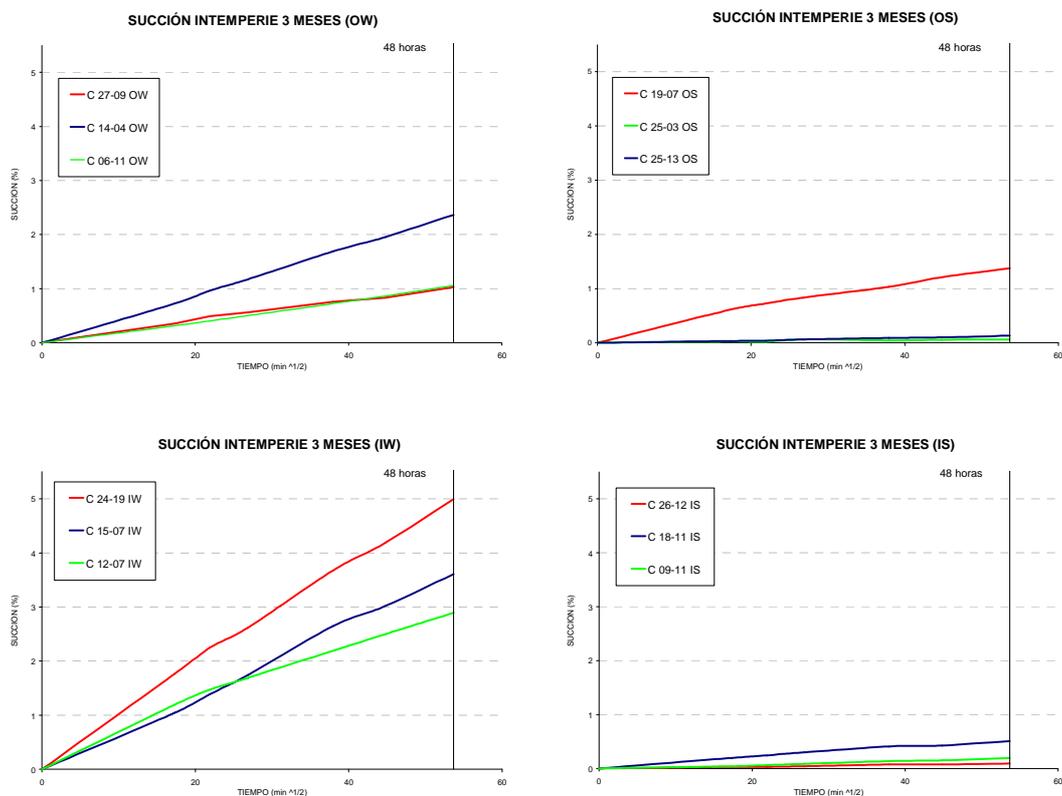


Figura LXIX. Curvas de succión de agua a 48 horas de probetas tras tres meses a la intemperie

Transcurrido ese plazo, podemos afirmar que los morteros de árido húmedo alcanzan el equilibrio, no así la totalidad de las probetas de los realizados con áridos secos que, presentando a priori un comportamiento mejor, algunas continúan sin alcanzar el equilibrio.

Como en el ensayo anterior, los restantes ensayos de probetas tras tres y seis meses a la intemperie (Figuras 69 y 70) se han realizado únicamente hasta las 48 horas. Puesto que la succión de agua se estabiliza, pero no a las 48 horas, hemos determinado en la Tabla XLVIII un factor de incremento de succión de agua (para aplicar a valores de 48 horas y poder estimar los valores de equilibrio) que puede ser aplicado si se desea a las restantes probetas ensayadas tras estar expuestas a la intemperie, para conocer los valores finales de contenido de agua por capilaridad y se desea evitar una excesiva dilatación de los ensayos en el tiempo.

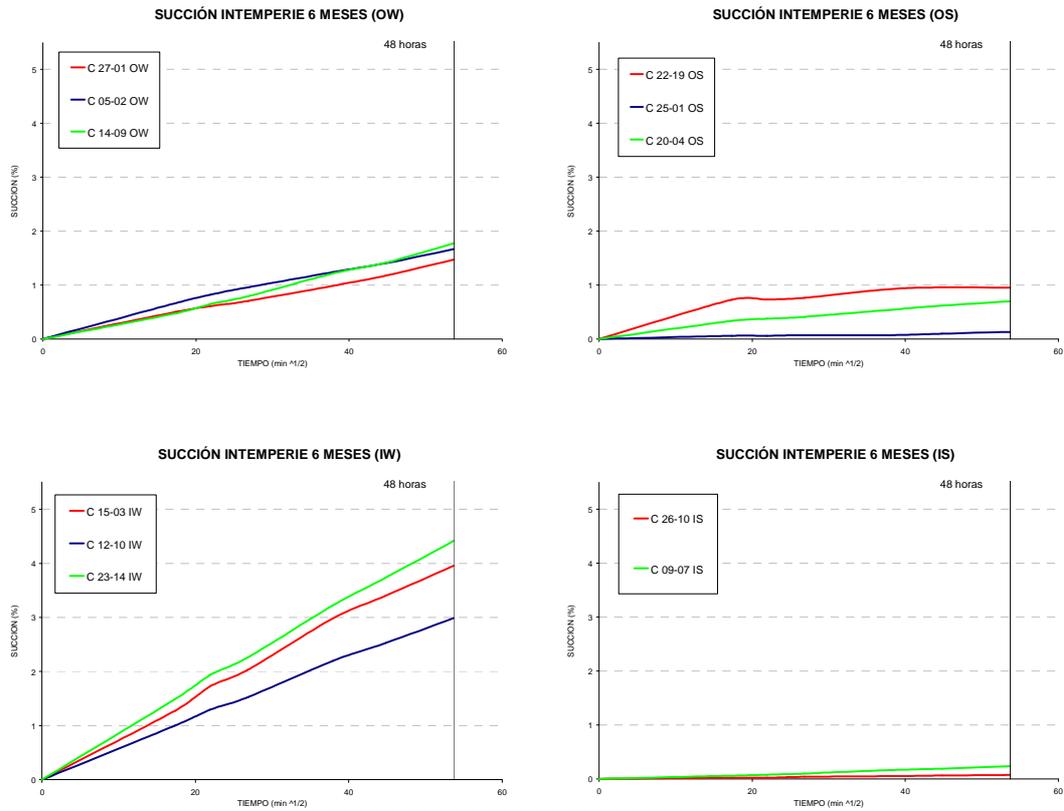


Figura LXX. Curvas de succión de agua a 48 horas, de probetas tras seis meses a la intemperie

PROBETAS DE CONTROL

OW			OS			IW			IS		
Valores obtenidos											
2,7	6,66	2,47	0,91	2,66	2,92	1,37	4,25	3,10	0,92	3,24	3,52
1,91	5,79	3,03	0,1	0,36	3,60	3,61	6,25	1,73	0,39	1,17	3,00
1,24	3,67	2,96	1,57	4,12	2,62	4,16	7,03	1,69	0,89	2,25	2,53
1,19	3,6	3,03	0,62	0,99	1,60	4,79	7,29	1,52	0,15	0,42	2,80
Succ 48 h	Succ Final	Factor	Succ 48 h	Succ Final	Factor	Succ 48 h	Succ Final	Factor	Succ 48 h	Succ Final	Factor
1,76%	4,93%	2,80	0,8%	2,03%	2,54	3,48%	6,21%	1,78	0,59%	1,77%	3,00

TABLA XLVIII: Ensayo de succión de agua en probetas cilíndricas. Factor de correlación entre succión a 48 horas y succión en el equilibrio para probetas de control.

III.8.7. Resultados Secado

SECADO DE PROBETAS DE CONTROL

DESORCIÓN			DESUCCIÓN		
OW	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)	OW	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)
C 05-03	1,70	0,81	C 21-08	0,29	0,00
C 03-04	1,04	0,81	C 14-06	0,00	0,00
C 27-11	1,18	0,28	C 06-08	0,70	0,38
C 14-08	0,58	0,00	C 06-04	0,35	0,07
Medias	1,13	0,48	Medias	0,34	0,11
Desv.	0,46	0,40	Desv.	0,29	0,18
Int. conf. 90%	0,38	0,33	Int. conf. 90%	0,24	0,15
OS	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)	OS	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)
C 22-10	0,00	0,00	C 10-02	0,26	0,00
C 20-01	0,00	0,00	C 25-07	0,00	0,00
C 10-01	1,41	0,64	C 04-06	0,00	0,00
			C 22-16	0,00	0,00
Medias	0,47	0,21	Medias	0,07	0,00
Desv.	0,81	0,37	Desv.	0,13	0,00
Int. conf. 90%	0,77	0,35	Int. conf. 90%	0,11	0,00
IW	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)	IW	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)
C 11-02	0,36	0,08	C 08-02	0,42	0,04
C 23-17	1,12	0,01	C 12-12	0,00	0,00
C 00-00	1,74	0,86	C 24-14	0,00	0,00
C 15-01	0,83	0,00	C 24-18	0,00	0,00
Medias	1,01	0,24	Medias	0,10	0,01
Desv.	0,58	0,41	Desv.	0,21	0,02
Int. conf. 90%	0,47	0,34	Int. conf. 90%	0,17	0,02
IS	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)	IS	Desorción 48 h (%)	Desorción 90 h (%)
C 26-03	0,01	0,00	C 07-12	0,00	0,00
C 18-03	0,78	0,42	C 09-04	0,00	0,00
C 26-05	0,01	0,00	C 15-07	0,00	0,00
			C 26-04	0,00	0,00
Medias	0,27	0,14	Medias	0,00	0,00
Desv.	0,44	0,24	Desv.	0,00	0,00
Int. conf. 90%	0,42	0,23	Int. conf. 90%	0,00	0,00

TABLA XLIX: Ensayo de secado de agua en probetas cilíndricas. Valores medios a 48 y 90 horas para probetas de control.

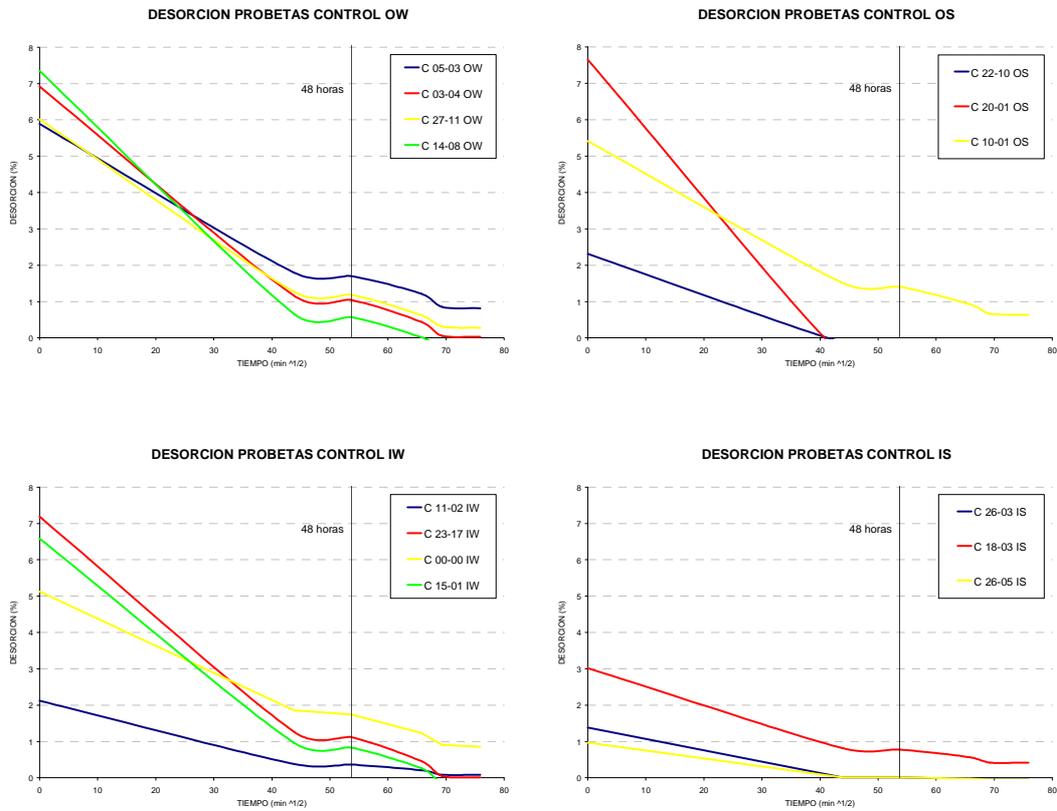


Figura 71. Curvas de desorción de agua de probetas de control

Se expresan en la Tabla XLIX los resultados de secado de absorción y succión únicamente de las probetas de control, expresados para las cuatro dosificaciones analizadas.

A continuación se muestran las curvas de secado, al igual que en ensayos anteriores expresadas en porcentaje de contenido de agua, frente al tiempo (el tiempo se muestra en raíz cuadrada de minutos, según especifica la norma RILEM PC-11 TC-113).

Estas curvas se encuentran clasificadas según la dosificación de resina (ortoftálica o isoftálica) y árido utilizado (seco / húmedo), denominadas: OW / OS / IW / IS.

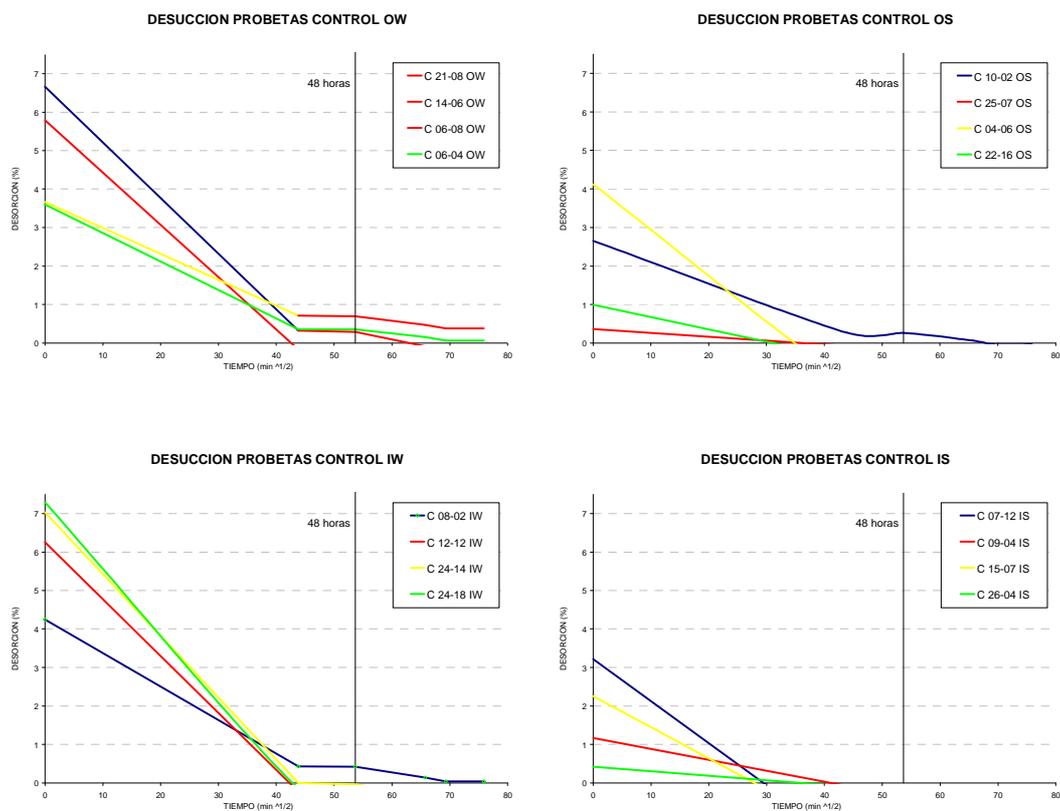


Figura LXXII. Curvas de desucción de agua de probetas de control

La evolución de las curvas de secado se puede observar en las Figuras 71 y 72, donde observamos que la mayoría de las probetas recuperan su peso seco y en un breve plazo de tiempo.

A la vista de los resultados, se puede observar que el material pierde el agua fácilmente. Por ello no se presentan los datos de secado de probetas de las restantes edades, puesto que son curvas muy similares y resultaría tedioso.

III.8.8. Discusión de resultados.

Se expresan a continuación los resultados de todos los ensayos anteriormente descritos, evaluados según los mismos parámetros contrastados para ensayos anteriores.

a) Comparación árido seco / árido húmedo

Las probetas realizadas con árido húmedo tienen en general, al igual que ocurre con los ensayos mecánicos, un comportamiento frente al agua más homogéneo que las probetas realizadas con árido seco.

Sin embargo, para la absorción de agua a 48 horas en este caso sí existe un comportamiento claramente mejor para las probetas de árido seco (absorción en torno al 1-2 % en todos los casos), que las de árido húmedo (absorción entre 5-6 %).

Esta diferencia también es visible para la succión: las probetas de árido húmedo presentan porcentajes del 1,5-4 %, mientras que las probetas secas no superan nunca el 0,9 % de succión a 48 horas.

No obstante, en el comportamiento a largo plazo, las probetas realizadas con árido húmedo, alcanzan el equilibrio en los tiempos de ensayo estudiados y las realizadas con áridos secos continúan incrementando su succión con el tiempo, por lo que pueden incrementar mucho más sus valores iniciales (Tabla XLVIII). Esta diferencia de parámetros no es tan evidente en el secado puesto que tanto las probetas realizadas con árido húmedo como las realizadas con árido seco pierden el agua rápidamente (sólo algo más rápidas las de árido seco, que, al contener menos agua, secan en menos de 24 horas) y logran alcanzar su peso original al inicio del ensayo.

b) Comparación resina ortoftálica / resina isoftálica

En lo que se refiere a los dos tipos de resina utilizados, su efecto más llamativo es en las propiedades de succión: las probetas realizadas con árido húmedo y resina ortoftálica presentan grados de succión en torno a 1,5 %, mientras que las realizadas con árido húmedo y resina isoftálica presentan grados de succión de más del doble del anterior: en torno al 3,6 %.

Pero sin embargo si los áridos utilizados están secos, las propiedades de succión de ambos tipos de morteros OS / IS son más similares, inferiores al 1 % de succión.

Para la absorción ambas resinas presentan un comportamiento similar en el caso de áridos húmedos, los OW un grado de absorción en torno al 5,5-5,7 % y los IW de 4,4-5,3 % a las 48 horas.

El comportamiento de las probetas a absorción de agua a 48 horas si se trata de áridos secos es algo mejor para las probetas de resina isoftálica (0,6-1,1 %) que ortoftálica (2-4 %), una diferencia tan significativa como en el caso de la succión.

No existe diferencia alguna en el proceso de secado entre las probetas realizadas con uno u otro tipo de resina.

c) Efecto de la exposición a la intemperie

Con respecto al tiempo, el comportamiento del material no cambia desde el punto de vista hídrico en los periodos estudiados.

d) Duración de los ensayos

Tal y como indican las normas, para un mortero polimérico resulta ser significativo el valor de absorción de agua por inmersión durante 48 horas, no existiendo una gran diferencia entre esta valor y el del equilibrio. De los datos obtenidos puede preverse que esta diferencia será de un punto más de absorción porcentual obtenida a 48 h.

Sin embargo para los ensayos de capilaridad de este tipo de morteros se entiende que sí es necesario realizar ensayos de larga duración para conocer la cantidad de agua que puede ser absorbida por el material. En su defecto, y para acortar la duración de los mismos se propone utilizar los factores de corrección de la Tabla XLVIII, que señalan

que el agua total absorbida por capilaridad para este tipo de materiales está entre dos y tres veces el agua absorbida a 48 horas.



Figura 73. Ensayo de succión de agua por capilaridad. Subida del frente capilar

En general podemos decir que el material tiene un coeficiente de absorción bajo y de succión aún más bajo. Y a la vista del proceso de secado del material podemos afirmar que el material seca bien, y además es posible alcanzar el peso cero, es decir, que es capaz de perder todo el contenido de agua, no se queda con agua retenida. Por lo tanto el proceso de absorción y succión de agua por este material es un proceso reversible.

Hay que señalar que al tratarse de un proceso rápido y sin retención de agua, el material no se verá afectado por el agua retenida en su interior. Por lo tanto el proceso de secado del material es un factor más que nos permite asegurar la bondad del mismo para ser utilizado en revestimientos.

III.9. COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

III.9.1. *Introducción*

Una de las propiedades que más restringe el uso de los PM en construcción es su resistencia al fuego (Browne *et al.*, 1975). Tanto la resina de poliéster como la epoxi son altamente inflamables y combustibles, pero los morteros realizados con ellas no arden tan fácilmente debido al alto contenido de árido.

Conocer el comportamiento de un específico PM ante el fuego es de primordial importancia para asegurar su aplicabilidad en materiales o elementos de construcción, tanto desde el punto de vista de la seguridad estructural como de la seguridad de los ocupantes del edificio.

Dado que los PM contienen un elemento inflamable y fácilmente combustible, la resina, en general producen una gran cantidad de humo y gases peligrosos al arder.

En uno de los primeros trabajos en enfocar este problema (Suzuki *et al.*, 1975) se llevan a cabo ensayos de acuerdo con las normas JIS (*Japanese Industrial Standards*). Tras los primeros ensayos se observa el colapso del material y se recomienda el uso de retardantes inhibidores de la combustión tales como los elementos halógenos (flúor por ejemplo). En el caso de utilización de los PM en elementos estructurales propone que sean recubiertos por otros materiales resistentes al fuego.

En este mismo artículo se comenta que tras los primeros ensayos se propone el uso de *Dawsonita* (mineral modificado mediante pirólisis, formulado $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$) como agente retardante del fuego según la información facilitada por el fabricante, y que disminuye la generación de gas Cl_2 . También se evalúa el efecto del trióxido de antimonio (Sb_2O_3) en la mezcla, pues actúa como inhibidor de la ignición. Sin embargo el estudio concluye que el efecto de retardante del fuego está limitado a los 550°C , lo cual no es suficiente para garantizar una buena resistencia al fuego en caso de incendio y plantea la necesidad de evaluar otros agentes retardantes más efectivos.

De acuerdo con los autores anteriormente citados (Browne *et al.* 1975) los PM habitualmente se clasifican como Clase 1 o Clase 2 (de acuerdo con las normas británicas BS. 476, parte 7) en lo que se refiere a difusión de la llama. En cualquier caso sí señalan que la exposición prolongada al calor produce degradación de la resina y pérdida de resistencia del material. Una temperatura máxima de servicio que se puede considerar segura son los 60 °C, incluso 100-120°C serían admisibles para cortos periodos de tiempo, por ejemplo en una limpieza al vapor.

En cualquier caso parece difícil conocer las equivalencias exactas de los diferentes resultados debido a la gran cantidad de normas y ensayos existentes, que difieren de un país a otro. Recientemente, algunos autores (Troitzsch *et al.* 1990) han intentado recopilar todas las normas y procedimientos de ensayos a fin de simplificar esta tarea.

III.9.2. Metodología

Las exigencias de comportamiento ante el fuego de los materiales se definen fijando la clase que deben alcanzar. Estas clases se denominan M0, M1, M2, M3 y M4 de acuerdo con la norma UNE 23727-90, clasificación recogida además en la NBE-CPI/96. El número de denominación de cada clase indica la magnitud relativa con la que los materiales correspondientes pueden favorecer el desarrollo de un incendio. Según se indica en dicha norma básica (Artículo 13.2), la clase M0 indica que un material no es combustible ante la acción térmica normalizada del ensayo correspondiente. Un material de clase M1 es combustible pero no inflamable, lo que implica que su combustión no se mantiene cuando cesa la aportación de calor desde un foco exterior. Los materiales de clase M2, M3 y M4 pueden considerarse con un grado de inflamabilidad moderada, media o alta respectivamente.

Los materiales de clasificación M0 son de naturaleza inorgánica al cien por cien o con un muy pequeño porcentaje de algún compuesto orgánico de muy baja combustibilidad como las resinas fenólicas. Para materiales de naturaleza orgánica M1 es la mejor

clasificación posible, pero sólo es posible obtenerla (Alonso, 1996) cuando se emplean determinadas matrices orgánicas como resinas fenólicas, melamina-formaldehido o urea-formaldehido y con unos niveles de carga inorgánica determinados. Un PVC rígido por ejemplo tendría una clasificación de M2. Los materiales compuestos realizados empleando como matriz orgánica resinas termoestables de poliéster, epoxi, vinil-éster, poliuretano, etc. tienen una clasificación de M4, lo que da una idea de su comportamiento ante el fuego.

Para determinar la resistencia al fuego del material se han realizado ensayos de acuerdo con las normas UNE 23-721-90, “Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo por radiación aplicable a los materiales rígidos o similares (materiales de revestimiento) de cualquier espesor y a los materiales flexibles de espesor superior a los 5 mm”. La metodología para la clasificación del material se basó en la norma UNE 23-727-90, “Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Clasificación de los materiales utilizados en la construcción”.



Figura 74. Probetas losas preparadas en los laboratorios de la E.T.S.A. para ser enviadas a ensayo en cámara de radiación

Según dicha norma los materiales se ensayan respetando las condiciones de utilización previstas, su forma de aplicación y teniendo en cuenta sus características físicas y geométricas, su composición, color, etc., sabiendo que los ensayos sólo pueden realizarse sobre probetas planas.

El ensayo consiste en someter las probetas a la radiación de una fuente de calor constante en un recinto definido, provocando eventualmente la inflamación de los gases desprendidos y la propagación de la combustión. Se miden los tiempos de inflamación, las longitudes de las llamas y las variaciones del equilibrio térmico de la cámara de ensayo.

Estos ensayos se han realizados en el *Laboratório de Ensaios de Reacção ao Fogo* en las instalaciones del Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) de Oporto (Portugal), cuyo personal y medios han colaborado para el desarrollo de las presentes investigaciones

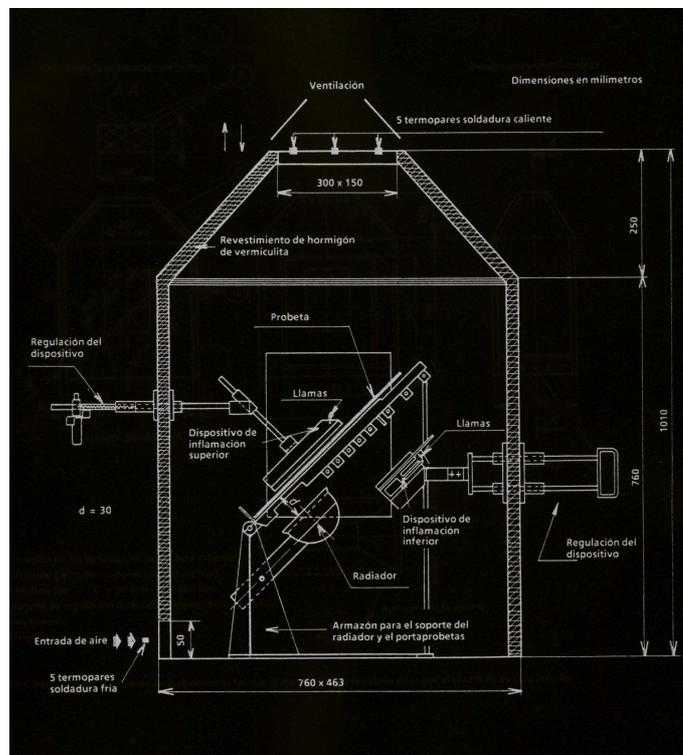


Figura 75. Cámara de ensayos de radiación según normas UNE

El equipo de ensayo comprende:

- una cámara de ensayo, provista de chimenea para la evacuación de humos, y dispositivo de aspiración forzada (Figura 75)
- una fuente de calor radiante, radiador de potencia nominal 500W cuya superficie radiante es un disco de cuarzo transparente de 100 mm de diámetro.
- un soporte para probetas, montado de tal modo que forme un ángulo de 45° con el plano horizontal y su base esté a 250 mm del suelo de la cámara de ensayo. El disco radiante se coloca en un plano paralelo al marco-soporte a 30 mm de su plano superior. En el plano del soporte se colocará una rejilla de hilo de acero.
- dos dispositivos de inflamación inferior y superior. Deben ser móviles, deslizantes, manejables desde el exterior y alimentados con gas butano o propano. Durante el ensayo pueden ponerse en contacto con la probeta o separarse de ella.
- un dispositivo de medida de la diferencia de temperatura entre la salida de gases y la entrada de aire, formado por 5 termopares de cromel-alumel.

Probeta	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)	Dens aparente (g/cm ³)
OW					
B 02-08 OW	398	298	11.28	2395.0	1,79
B 01-02 OW	400	301	9.05	1857.3	1,70
B 02-07 OW	399	300	10.65	2213.6	1,74
OS					
B 03-03 OS	398	298	10.01	2440.7	2,06
B 03-01 OS	400	300	9.89	2200.4	1,85
B 03-05 OS	398	299	10.75	2480.2	1,94
IW					
B 06-02 IW	397	298	9.35	2297.1	2,08
B 06-05 IW	399	299	10.60	2471.3	1,95
B 06-04 IW	399	300	12.09	2876.0	1,99
IS					
B 04-04 IS	396	297	10.23	2306.5	1,92
B 04-05 IS	398	299	10.59	2245.5	1,78
B 04-03 IS	397	298	12.33	2695.4	1,85

TABLA L: Probetas ensayadas en cámara radiante, UNE 23-721-90



Figura 76. Inicio del ensayo en cámara de radiación



Figura 77. Momento de inflamación de la probeta

Se toman cuatro probetas según la forma y dimensiones definidas en dicha norma. Se ensayaron un total de tres probetas de cada una de las dosificaciones (OW / OS / IW / IS), manteniendo en todo momento una cuarta probeta de control. Las dimensiones de cada una de las probetas se expresan en la Tabla L.

Antes de ser ensayadas las probetas fueron mantenida durante 801 horas a temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de $50 \pm 5\%$, hasta la obtención de peso constante.

Para el ensayo propiamente dicho se colocan las probetas durante 20 minutos en el interior de la cámara, previamente calentada y conseguido el equilibrio térmico del aparato. Se deben anotar: los periodos de tiempo necesarios para la inflamación de las caras inferior y superior de la probeta, la longitud de las llamas, fenómenos de fluencia o fusión, caída de gotas del material, inflamadas o no y la persistencia de la combustión con o sin llama después de finalizar el ensayo.



Figura 78. Combustión de la probeta

La evolución del fuego se sigue a través de una serie de parámetros que determinan la inflamabilidad, combustibilidad, propagación de la llama, goteo y desprendimiento de calor. Esto constituye básicamente lo que se conoce como *reacción al fuego* del material, definido en la norma UNE 23026 como “la respuesta de un material frente al fuego al que está expuesto y alimenta”, a diferencia del término *resistencia al fuego* que la misma norma define como “el tiempo en minutos que un elemento de construcción mantiene su estabilidad mecánica, la estanqueidad a las llamas, el aislamiento térmico y la no-emisión de gases inflamables”.

Con la ayuda de la hoja de datos tomados durante el ensayo se calculan para cada probeta los índices siguientes, definidos en la UNE 23-721-90

- i: índice de inflamabilidad
- s: índice de desarrollo de llamas
- h: índice de la longitud máxima de las llamas
- c: índice de combustibilidad

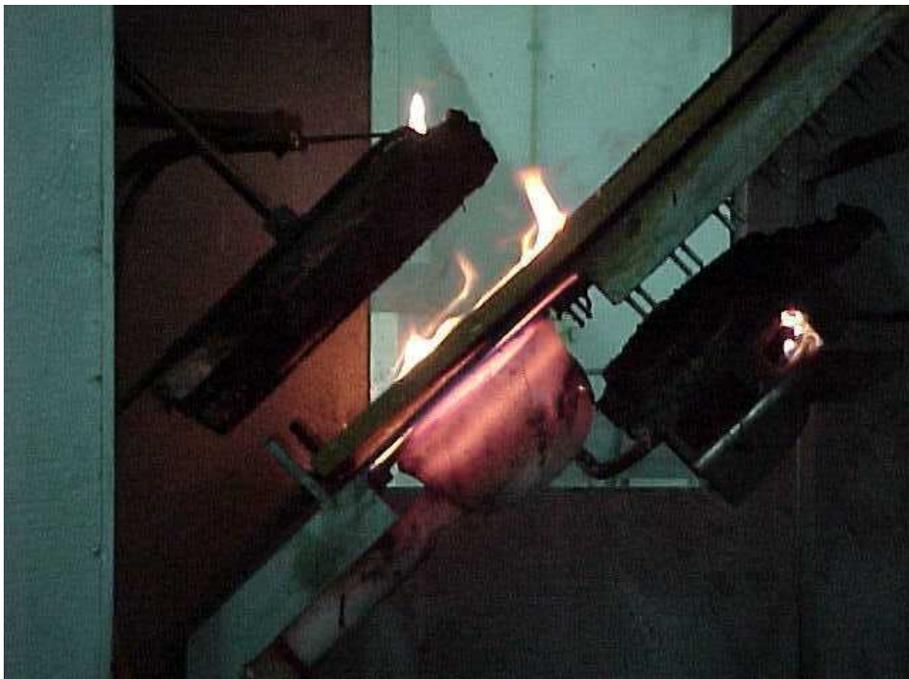


Figura 79. Fin del ensayo



Figura 80. Estado de la probeta después del ensayo

III.9.3. Resultados

Una vez realizados los ensayos en cabina de radiación, se obtuvieron los resultados expresados en la Tabla LI.

A la vista de los parámetros obtenidos en los ensayos y atendiendo a que no se observó caída de gotas inflamadas, se determina, de acuerdo con los criterios de clasificación establecidos en la tabla 2 de la UNE 23-727-90 para materiales rígidos, que el material debe ser incluido en la clase de reacción al fuego denominada M-4.

Durante el transcurso de los ensayos se liberaron humos negros en cantidad muy abundante. Las probetas (OW) colapsan en torno a los 13 minutos, 14 minutos para las IW. Las OS colapsan a los 18 minutos y las IS lo hacen a los 19.

Con los resultados anteriormente expuestos el material ha sido clasificado como M4, esto es grado de inflamabilidad alta.

Probeta	Índice i	Índice s	Índice h	Índice c
OW				
B 02-08 OW	0.65	8.08	2.05	8.30
B 01-02 OW	0.84	5.87	2.05	7.48
B 02-07 OW	0.66	7.21	2.05	8.60
Valor medio índice	0.72	7.05	2.05	8.13
OS				
B 03-03 OS	0.56	6.52	1.80	10.15
B 03-01 OS	0.74	7.13	1.80	10.97
B 03-05 OS	0.69	7.94	2.05	8.15
Valor medio índice	0.66	7.20	1.88	9.76
IW				
B 06-02 IW	0.54	7.64	2.05	6.42
B 06-05 IW	0.51	7.39	2.05	6.87
B 06-04 IW	0.52	7.35	2.05	6.39
Valor medio índice	0.52	7.46	2.05	6.56
IS				
B 04-04 IS	0.57	7.52	1.80	7.42
B 04-05 IS	0.70	7.65	2.05	7.75
B 04-03 IS	0.50	7.41	2.05	5.23
Valor medio índice	0.57	7.53	1.97	6.80

TABLA LI: Resultados de probetas ensayadas en cámara radiante, UNE 23-721-90

III.9.4. Discusión de resultados

Los materiales compuestos de matriz orgánica son generalmente combustibles. Es necesario conocer el comportamiento de los mismos frente al fuego y determinar si cumplen con las exigencias establecidas por la normativa vigente y adecuar el tipo de material a cada aplicación concreta. No obstante la investigación en nuevos materiales ha hecho posible el desarrollo de materiales compuestos de matriz orgánica con buen comportamiento ante el fuego en base a ignifugación de las resinas tradicionales o al desarrollo de nuevas matrices ignífugas.

De esta manera es posible mejorar un material por ejemplo de una clasificación M4 a una clasificación M1 sin apenas detrimento de otras propiedades (Alonso *et al.* 1996).

De acuerdo con la norma NBE-CPI 96, (Artículo 16.1) los materiales susceptibles de ser utilizados como revestimiento o acabado superficial en pasillos, escaleras y en las zonas por las que discurran los recorridos de evacuación deben pertenecer a la clase M3 como mínimo para recorridos normales excepto en usos hospitalarios. Pero en la misma norma se especifica que no se establecen en el articulado restricciones a elementos lineales como cantoneras, tapajuntas, pasamanos o rodapiés, ni puntuales como topes, apliques, rótulos, etc.

En cuanto a materiales para revestimiento en otras zonas del edificio únicamente se establece (Artículo 16.3) que en uso residencial (aplicables a hoteles, hostales, etc., no a vivienda) se exigirá clasificación mínima M-3 para materiales de revestimiento o acabado superficial en suelos y M-2 en paredes y techos.

De acuerdo con lo anterior, parece que excepto si se pretende utilizarlo en los elementos anteriormente enunciados (recorridos de evacuación, por ejemplo, u otros aún más exigentes: hospitales, locales públicos, etc.) donde las exigencias de la norma son claras, en principio el material podría ser utilizado con las características actuales, puesto que no se especifican mayores exigencias para el mismo.

En cualquier caso no parece recomendable su utilización sin adiciones o aditivos que mejoren convenientemente su comportamiento ante el fuego. Para este tipo de material existen diversos modos de ignifugación, por lo que deberán ser estudiados y realizar los correspondientes ensayos que corroboren sus resultados.

Atendiendo al modo de aplicación se clasifican en:

- Ignifugación superficial: consiste en la aplicación de una sustancia química denominada ignifugante sobre la superficie del material de tal forma que ante la acción de un fuego, foco de calor, chispa, etc. externo, esa sustancia reacciona mejorando el comportamiento del material ante el fuego. Suele ser utilizada en

materias textiles (cortinas, moquetas, etc.). Este tipo de ignifugación es efectiva pero tiene el inconveniente de que no suele ser permanente con el tiempo ya que por la acción del roce, barrido, aspirado, lavado u otros tratamientos va desapareciendo el producto y por lo tanto su acción.

- Ignifugación en masa o composición: consiste en la adición de sustancias químicas en la fabricación del material. La ignifugación en composición o reactiva consiste en la introducción de moléculas en la cadena polimérica de las materias primas utilizadas para la fabricación de los materiales. Los efectos a conseguir son la inhibición o supresión del proceso de combustión ante la acción exterior que lo produzca. Este tipo de ignifugación es efectiva y además es permanente puesto que forma parte intrínseca del material. Es el tipo de ignifugación que habitualmente se emplea para mejorar la reacción al fuego de los materiales compuestos de matriz orgánica. Los tipos más comunes son compuestos inorgánicos hidratados (acción física), derivados halogenados, fosforados y nitrogenados (acción química).

Otra posibilidad a investigar sería la utilización directamente de resinas mejoradas en su resistencia al fuego, pues existen en el mercado resinas con clasificación M2 o incluso M1 (clasificaciones que mejorarían al añadirle los áridos del PM). Algunos ejemplos de esta resina son los tipos de resina UP retardante al fuego (ver tabla IX), cuyos precios son similares a las ortoftálicas e isoftálicas utilizados en estos ensayos. Algunos ejemplos de estas resinas son F 207 TPE, F 240 TF, F 820, O F 804 TF de la casa NESTE Chemicals.

IV. ANÁLISIS DE COSTO

IV.1. ANÁLISIS DE COSTO

A la vista de los resultados expuestos en el capítulo anterior, la diferencia fundamental que hemos detectado entre ambas resinas, y que puede afectar más a su utilización como material de construcción, es el dato contenido en la Tabla LII: su precio.

Consideramos que éste sí podría ser también uno de los factores decisivos a la hora de determinar que la resina ortoftálica es más idónea para fabricar este tipo de mortero. Como con cualquier otro material de construcción, antes de pensar en su posible fabricación será necesario hacer una estimación real de su coste.

Los precios de los componentes del mortero (resina y áridos) varían considerablemente en función del tamaño del suministro, es por eso que hemos expuesto ambas posibilidades: para pequeñas cantidades el albero se suministra en sacos de 25 Kg. Su precio es considerablemente menor por toneladas. Lo mismo ocurre con las resinas: en bidones su precio es algo más barato que en garrafas o envases pequeños, adecuados para pequeñas producciones (el tipo de suministro que hemos utilizado en esta investigación).

Tipo de presentación		Envase 5 Kg	Garrafa 25 Kg	Bidón 230 Kg	
Material	Resina Ortoftálica	455 ptas/Kg	426 ptas/Kg	344 ptas/Kg	
	Resina Isoftálica	No se sirve	571 ptas/Kg	468 ptas/Kg	
	Albero fino	Presentación		saco 25 Kg	Por toneladas
				4 ptas/Kg	0,6 ptas/Kg
	Polialbero	Con resina Ortoftálica		89 ptas/Kg	73 ptas/Kg
		Con resina Isoftálica		118 ptas/Kg	98 ptas/Kg

TABLA LII: Precios de los componentes y del material polialbero a fecha 1 de Octubre de 2001. (precios sin IVA)

V. CONCLUSIONES

V.1. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Se señalan a continuación las conclusiones más importantes acerca de características del mortero polimérico de albero, señalando aquellas más relevantes y que pueden afectar a su potencial uso como material de construcción. Tras ellas se añaden otras conclusiones relativas al proceso de fabricación del mismo.

a) Resistencia a compresión

- Una de las conclusiones más significativas con respecto a este parámetro es que para el estudio del polialbero resulta más idóneo la realización de probetas prismáticas que cilíndricas (las que recomienda la norma). Los datos obtenidos para resistencia a compresión de prismáticas son mucho más homogéneos que los obtenidos para probetas cilíndricas, sobre todo en el caso de áridos húmedos. Si se utilizan áridos secos la variabilidad es menor. Esto es debido a la mayor dificultad de colocación y compactación de los morteros realizados con árido húmedo (a pesar de su mayor facilidad de amasado), patente sobre todo en los moldes cilíndricos. Además, la utilización de probetas prismáticas exclusivamente (puesto que pueden utilizarse las mismas probetas sucesivamente para ensayos de flexión y compresión) redundaría en una mayor economía y simplicidad de fabricación de probetas, deseable para todo proceso de control. No existe un valor de correlación fiable entre los datos obtenidos para probetas prismáticas y cilíndricas, por lo que pensamos que el análisis de la resistencia a compresión debe hacerse (como ya realizan de hecho muchos autores que investigan sobre otros morteros poliméricos) mediante probetas prismáticas.
- Con ambos tipos de probetas se alcanzan los mismos valores máximos pero en el caso de las probetas cilíndricas las resistencias medias son menores debidos a la presencia de mayor número de probetas con baja resistencia a compresión.

- La resistencia a compresión de este material alcanza unos mínimos de 20 MPa (similares a un hormigón, mayores que un mortero de cemento), trabajando con áridos húmedos. Tanto con árido húmedos como con áridos secos es posible alcanzar resistencias en torno a los 70 MPa, mucho más de lo que necesitará el material para ser empleado en revestimientos.
- Los resultados obtenidos para curado de probetas prismáticas en *frío* (a temperatura y humedad ambiente, durante varios días) o en *caliente* (tres horas en estufa a 80 °C) son similares. En ambos casos se dan resistencias que alcanzan las máximas y mínimas indicadas. La resistencia a compresión tampoco resulta ser afectada por la exposición a la intemperie en los periodos estudiados (durante seis meses de abril a septiembre), los de mayor temperatura y radiación solar en nuestra localidad.
- Existe una gran variabilidad de datos obtenidos de resistencia a compresión entre las probetas de distintas amasadas con la misma dosificación, por lo que pensamos que habrá que determinar con exactitud los factores a controlar, comentados posteriormente en el apartado de Conclusiones Generales.
- Los módulos elásticos, de 27 a 40 GPa están dentro del mismo rango que los obtenidos para un hormigón de similares características resistentes, siendo los más elevados (37-40 GPa) para las probetas realizadas con árido seco y resina isoftálica y los más bajos (27-32 GPa) para las probetas realizadas con resina ortoftálica y albero húmedo, por lo tanto la dosificación OW resulta ser el material más flexible.

b) Resistencia a flexión

- Los valores medios de resistencia a flexión obtenidos son muy similares a los obtenidos por otros autores, con valores medios en torno a los 10-12 MPa. Pero

en nuestro caso, a diferencia de lo comentado en la mayor parte de la bibliografía encontrada, no hay diferencia significativa entre los valores medios obtenidos para áridos húmedos y para áridos secos.

- Esto puede ser debido a que en los áridos de este tipo el agua se deposita en el interior del grano, no queda libre en su superficie y por ello no interfiere en el proceso de polimerización ni en el enlace entre el polímero y el árido.
- Tampoco se detectan diferencias significativas en los resultados obtenidos para morteros preparados con una u otra de las dos resinas utilizadas. No se señalan diferencias debidas al método de curado de las probetas (*frío* a temperatura y humedad ambiente o *caliente*, introduciendo las muestras en estufa 3 horas a 80°C).
- El periodo estudiado de exposición a la intemperie no revela modificaciones en la resistencia a flexión del material.
- Además es contrastable la resistencia a flexión obtenida mediante probetas prismáticas y baldosas, puesto que ambos valores medios son muy similares, confirmándose la validez de los mismos. La idoneidad de uno u otro ensayo dependerá de las probetas disponibles. Por lo tanto, en un proceso de fabricación estandarizado de losas de polialbero será suficiente con la rotura de baldosas para obtener un valor fiable de resistencia a flexión, sin necesidad de fabricar probetas prismáticas suplementarias.
- Como en el caso de la resistencia a compresión, para la resistencia a flexión se dispone de un intervalo de valores muy amplio: de 4,5 a 21,9 MPa.
- La dispersión de valores máximos y mínimos en la resistencia a flexión es similar para probetas prismáticas y baldosas, lo que confirma que la variabilidad del material entre las diferentes hornadas, aun manteniendo las dosificaciones,

es un hecho ajeno a la forma del molde, y por lo tanto a los factores que de él dependen, como son colocación, compactación, espesor del material y superficie del material en contacto con el aire (mucho mayor en las baldosas).

c) Resistencia al desgaste por abrasión

- No se detectan diferencias significativas entre los resultados obtenidos para las cuatro dosificaciones estudiadas, por lo tanto en lo que se refiere a este parámetro no influirá el hecho de utilizar una resina u otra, o utilizar áridos secos o áridos húmedos.
- Sí es significativo que la resistencia al desgaste mejore con el tiempo de exposición a la intemperie, por lo que creemos que este valor debe ser exhaustivamente contrastado en probetas sometidas a periodos de exposición más largos.
- El material se comporta frente al desgaste igual o mejor que otros tipos de baldosas existentes en el mercado (terrazo, losetas y baldosas de hormigón, etc.), lo que confirma sus posibilidades de utilización para fabricación de piezas para suelos.

d) Densidad

- La densidad aparente del material varía de 1,6 a 2,00 g/cm³. Esta variabilidad es menor en los valores de densidad real estudiados, de 1,87 a 2,03 g/cm³, pero sí va correlacionada con la compactación: alcanza valores del 88% en los morteros realizados con árido húmedo y del 93% en los morteros realizados con árido seco.

- Esto es debido a que en las probetas realizadas con árido húmedo el índice de poros es mayor debido al agua presente en el árido durante el amasado. Posteriormente, durante el fraguado, y al tratarse de una reacción exotérmica, parte de ese agua del árido tiende a salir al exterior, dejando pequeñas cavidades en el material.
- Los valores medidos son muy similares ya sean con una u otra resina, y tampoco presenta variaciones significativas en el periodo de tiempo estudiado.

e) Resistencia a manchas y ataque de ácidos

- El polialbero presenta un muy buen comportamiento de resistencia a manchas, situándose en una de las mejores categorías posibles para baldosas, excepto en lo que se refiere a manchas que dejan rastro (óxido de cromo), donde es necesario recurrir a la limpieza con disolución de clorhídrico para intentar eliminarlas. Se consigue su eliminación total en las probetas de resina ortoftálica pero no en las de resina isoftálica, donde sí queda rastro de las mismas.
- En general el material tiene, como era previsible, una muy buena resistencia química. Sorprendentemente sin embargo resulta fuertemente atacado por el ácido cítrico en disolución. Se trata de un ácido muy agresivo para este material, puesto que logra incluso reblandecerlo y disgregarlo, hasta hacerle perder todas sus propiedades. No se han encontrado en la bibliografía estudiada ensayos anteriores con respecto al ataque de este tipo de ácido (probablemente porque se trata de un ácido de presencia doméstica, por lo cual se estudia su posible ataque en baldosas de revestimiento y no es habitual hacerlo para materiales estructurales). Consideramos que debería continuarse este estudio con otros ácidos similares para determinar su posible ataque al material. Además deberán estudiarse posibles adiciones en la mezcla de polialbero que mejoren la resistencia a este ácido.

f) Estudio con ultrasonidos

- En general, no es posible establecer una correlación fiable entre los valores de velocidad de ultrasonido y los valores de resistencia a flexión, compresión o de densidad aparente, como ocurre con otros materiales convencionales.
- En todo caso se puede establecer una correlación válida para las probetas realizadas con resina ortoftálica y albero húmedo, lo que hace de esta mezcla la más idónea para este tipo de estudios.
- Los datos obtenidos son similares para los dos tipos de resina en el caso de áridos secos. Pero sin duda el dato más llamativo es la disminución del valor de velocidad de ultrasonido a lo largo del tiempo: en las probetas medidas tras la exposición a la intemperie (tres o seis meses) se detectó un descenso del valor de velocidad de ultrasonido en torno al 50%, sin que se detectaran variaciones en las características resistentes de las probetas.

g) Comportamiento frente al agua

- Como ya hemos comentado con anterioridad para otras propiedades, el comportamiento frente al agua de las probetas realizadas con árido húmedo es más homogéneo que las realizadas con árido seco.
- Pero en este caso sí hay una diferencia más significativa entre ambos materiales: la absorción de agua para probetas realizadas con árido húmedo varía del 5-6 % mientras que en las realizadas con árido seco solamente alcanza el 3 %. Los valores son mejores para la resina isoftálica sólo en el caso de árido seco.
- En el porcentaje de agua absorbida por capilaridad esto es aún más evidente: con árido seco siempre queda por debajo del 1%, mientras que con áridos húmedos

varía en el intervalo del 1,5-4 %. De estos últimos los valores mayores se corresponden con las probetas IW y los mejores (1,5%) con las probetas OW, por lo que para trabajar con áridos húmedos ésta sí es una diferencia favorable para la resina ortoftálica. No hay diferencia entre las dos resinas si se trata de áridos secos.

- En todos los casos hablamos de valores a las 48 horas. En el caso de los valores de absorción sí se trata de un valor significativo, pero en el caso de los valores de succión hemos visto que la absorción del material por capilaridad puede alcanzar valores entre dos y tres veces mayores.
- En cuanto al secado se trata de un material que seca muy rápido (antes de las 48 horas en casi todos los casos), y que seca completamente, alcanzando su peso inicial, por lo que no se verá afectado por el agua retenida en su interior, y preuponemos que no sufrirá degradación a largo plazo por esta causa.
- En resumen, podemos decir que el comportamiento hídrico del mortero es bueno, en general, y tampoco presenta variación en el periodo de tiempo estudiado.

h) Comportamiento frente al fuego

- El material ha sido clasificado como M4. Es posible su aplicación, pero para su uso en construcción sin restricciones, debidas a la normativa contra incendios de obligado cumplimiento, será necesario ignifugarlo.
- Futuras líneas de investigación deberán centrarse en este parámetro para definir si presenta buen comportamiento simplemente con adiciones en masa (y cuáles son las más idóneas) o si resulta preferible el uso de resinas ignífugas propiamente dichas.

V.2. CONCLUSIONES GENERALES

El hecho de haber tenido una fase experimental tan dilatada en el tiempo, así como amplia en tipo y número de probetas y ensayos realizados hace que posiblemente se hayan sacado menor número de conclusiones definitivas (en lo que a aspectos específicos del comportamiento del material se refiere) y se hayan abierto mayor número de interrogantes, por lo que una de las principales conclusiones sea precisamente el gran número de nuevas líneas de investigación abiertas.

Así pues, consideramos que uno de los logros de esta investigación es haber dado lugar a tanta variabilidad y nuevas cuestiones no consideradas inicialmente, que serán objeto de futuras investigaciones.

En definitiva y como resultado de la presente investigación pueden establecerse las siguientes conclusiones generales:

a) Relativas al proceso de fabricación de las muestras.

- El amasado manual es un factor que provoca gran variabilidad de resultados (sobre todo en resistencias mecánicas y densidad aparente) en el producto final. Se obtienen probetas que duplican o triplican resistencias de otras realizadas con la misma dosificación
- Esta variabilidad no es debida al tipo de resina (se da en ambas), ni al árido (se da entre probetas realizadas con áridos de un mismo acopio), ni a la forma del molde (la dispersión de resultados se da por igual por ejemplo entre valores de resistencia a flexión en probetas prismáticas y baldosas), ni al curado (se da también entre las hornadas curadas en caliente, todas ellas a temperatura controlada), ni debida a la humedad del árido (se da en probetas de albero seco incluso más que en probetas de albero húmedo, donde el amasado es más fácil por la mayor trabajabilidad de la mezcla).

- Otros factores que sí pueden tener influencia son la temperatura y la humedad tanto en el momento del amasado como durante el postcurado.

- Se constata una gran influencia del tipo y forma del molde en las características del material resultante: determinados moldes se rellenan y compactan mejor lo que afecta significativamente a los resultados obtenidos; esto es evidente en la comparación de resultados de resistencia a compresión entre probetas cilíndricas y prismáticas.

- En cuanto a la influencia del proceso de curado podemos decir que es posible obtener las mismas resistencias curando en frío que en caliente, por lo que es posible utilizar uno u otro método de curado según se adapte mejor al proceso de fabricación: para ejecuciones en obra obviamente será utilizado el curado en frío (a temperatura ambiente), aunque el material tarde varios días en endurecer. Para producción en planta de elementos prefabricados puede ser rentable curar en caliente, lo que permitiría una rápida reutilización de los moldes, y en consecuencia una mayor producción. También es factible mezclar en una misma factoría, ubicada en nuestro clima o en otro similar, producciones combinadas de ambos sistemas de curado, por ejemplo en función de la época del año, o del tipo de moldes empleados en cada caso. En épocas secas sería habitual el curado en frío y en época de clima húmedo podría recurrirse al curado en caliente.

- La utilización de unos u otros tipos de moldes dependerá a su vez de las necesidades y plan de funcionamiento de la factoría: los moldes metálicos son más caros pero permiten el calor (desencofrado más rápido) y un mayor número de puestas, mientras que moldes de otros materiales madera, elastómeros, etc. no deben ser sometidos a altas temperaturas pero son mucho más económicos.

b) Relativas a las materias primas utilizadas

- La humedad en los áridos no ha causado en el material un efecto tan importante como se podía suponer (partiendo de los datos de la bibliografía existente), cuando se trabaja con este tipo de áridos y con las humedades (del 5 al 11%) que tiene habitualmente el albero traído directamente de la cantera.
- La variabilidad natural de la granulometría del albero tampoco ha provocado diferencias en los resultados obtenidos para los distintos ensayos. Puesto que no resultan excesivas las variaciones producidas en este material tanto por los procesos de secado (las características del polialbero realizado con áridos secos sólo son algo mejores sólo en algunos casos) o la variación de la granulometría no se ve inconveniente alguno para implementar la utilización del mortero con las características naturales del mismo en lo que se refiere a humedad y granulometría.
- Tampoco resultan significativas las diferencias entre las prestaciones del mortero conferidas por la utilización de una u otra resina, ya sea ortoftálica o isoftálica. En resumen, el mortero realizado con resina ortoftálica resulta ser un material algo más flexible (menor modulo elástico), se comporta mejor ante las manchas y significativamente mejor frente a la succión por capilaridad (esto último sólo si se trata de morteros realizados con áridos húmedos) que el preparado con resina isoftálica.

c) Envejecimiento en cámara. Exposición a la intemperie

- El análisis del envejecimiento no ha producido resultados significativos en los plazos estudiados de exposición a la intemperie ni de ciclos de cámara.

- La radiación solar a la que ha estado expuesto el mortero (la exposición a la intemperie estudiada ha sido precisamente en época de verano, de abril a septiembre) no afecta a sus características, como parecía previsible.
- Es evidente la necesidad de ensayos a más largo plazo que corroboren este buen comportamiento ante el envejecimiento del material, especialmente en lo que se refiere a la resistencia al desgaste por abrasión (factor fundamental para su posible utilización en solerías), donde se observa que los resultados son mejores tras la exposición a la intemperie que en las probetas de control.

A la vista de los resultados de la investigación podemos añadir, en definitiva que el mortero polimérico de albero estudiado tiene propiedades adecuadas para su uso como material de construcción en revestimientos, y en consecuencia, se va a proceder a la patente del mismo, como paso previo a su futura fabricación a nivel industrial.

V.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las investigaciones realizadas hasta ahora son un punto de partida para seguir desarrollando estudios sobre los morteros poliméricos en general, y más concretamente sobre el mortero polimérico de albero. Futuras líneas de investigación serán:

- Continuación de los ensayos en probetas expuestas a intemperie real a más largo plazo, para valorar realmente la durabilidad del material. Para ello se cuenta con las probetas ya fabricadas y actualmente expuestas.
- Control de la variabilidad: influencia del amasado mecánico y otros sistemas de compactación para mejorar la homogeneidad del mortero que afecta sobre todo a sus características mecánicas.
- Mejora de sus características de resistencia al fuego mediante adición de ignifugación en masa o morteros realizados con resinas UP ignífugas, con comportamiento al fuego mejorado.
- Análisis de ultrasonido: si se preparan amasadas más homogéneas existirá una mayor posibilidad de encontrar una correlación fiable. Además es necesario realizar un estudio más exhaustivo de la variabilidad del valor de ultrasonido en el tiempo (bajada del 50% tras la intemperie) y sus posibles consecuencias no detectadas hasta ahora en otras características del material.
- Ensayos de ataque de ácidos: similares al ácido cítrico, y análisis de las posibles adiciones al mortero para reforzarlo frente a este tipo de ataques.
- Adición de fibras u otras armaduras, para mejorar las cualidades del mortero, fundamentalmente su resistencia, con vistas a usos tales como mobiliario urbano u otros elementos prefabricados.

VI. BIBLIOGRAFÍA

VI.1. REFERENCIAS

- ACI Committee 503 SP-21, 1968, *Epoxies with concrete*, American Concrete Institute, Detroit.
- ACI Committee 548 IR-86, 1986, *Guide for the use of polymers in concrete*, American Concrete Institute, Detroit.
- ACI Committee 548 SP-40, 1974, *Polymer in concrete*, American Concrete Institute, Detroit.
- ACI, 1972, *Polymer in concrete*, American Concrete Institute Fall Meeting 1972.
- ACI, 1973, *Polymer in concrete*, American Concrete Institute Annual Meeting 1973.
- Aguado De Cea, A., *et al.*, 1984, Effects of different factors in mixing and placing of polymer concrete, *Proceedings of the IV International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, pp. 299-303.
- Aigrot, A., 1975, Artificial slate with a resin mortar base, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp. 290-295.
- Aldekoa, J., San José, J.T., Rodríguez-Maribona, I., Martín, J., y Urreta, J.I., 1996, Estudio del hormigón polimérico de poliéster y acrílico en estado fresco, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 225-235.
- Alejandro Sánchez, F.J., 1997, *El albero como árido para la fabricación de morteros de color*, Tesis doctoral inédita, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla.

Alonso, F.J., Esbert, R.M., y Ordaz, J., 1987, Comportamiento hídrico de calizas y dolomías, *Boletín Geológico Minero*, 98 (4), pp. 109-130.

Alonso, J.R., Madariaga L., y Vegara F.J., 1996, Reacción al fuego de materiales compuestos de matriz orgánica, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 73-82.

Antequera, P., Jiménez, L. y Miravete, A., 1991, *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

Arizmendi, L.J., 1996, Ventajas de los materiales compuestos en el tratamiento y restauración de fachadas exteriores, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 439-445.

ARQUIMACOM'96, 1996. Libro de Actas de la *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Laffarga, J., Martineaux, P., y Olivares, M. (editores), Sevilla.

ARQUIMACOM'98, 1998. Libro de Actas de la *II Conference Internationale sur les Materiaux Composites en Architecture, Construction et Genie Civil*, Martineaux, P., y Olivares, M. (editores), Burdeos.

Arredondo, F., 1974, Hormigones polimerizados, *I Seminario de Cementos y Hormigones*, Madrid.

Artacho Ruiz, C., 2000, *Modelos diarios de temperatura, humedad relativa y horas de sol*, Publicaciones de la Universidad de Córdoba y Obra Social y Cultural Cajasur, Córdoba.

Arzamasov, B., 1989, *Materials Science*, Mir Publishers, Moscú.

- Bares, R., y Navratil, J., 1967, Some Physical Properties of Resin Concrete, *RILEM SIMPOSIUM: Shintetic resins in building construction*, Paris, pp. 287.
- Barrios, J., 1975, *Preparación y estudio de un cemento PAS a partir de albero de Alcalá de Guadaira (Sevilla)*, Tesis doctoral inédita, Facultad de Ciencias, Universidad de Sevilla.
- Bilurbina, L., y Liesa, F., 1980, *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión. Polímeros termoestables*, Marcombo, Barcelona.
- Bloss, D. R., Hubabard, S. J. y Gray, B.H., 1970, *Development and Evaluation of a High-Strength Polyester Synthetic Concrete*, Technical Report M-2, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, E.E.U.U.
- Boening, H. V., 1957, *Unsaturated polyesters*, Elsevier.
- Browne, R.D., Adams M. , y Frech E. L., 1975, Experience in the use of polymer concrete in the building and construction industry, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp 433-447.
- CCC 2001, 2001, Libro de Actas de *International Conference Composites in Construction*, Figueiras, J., Juvandes, L., Faria R., (editores), Balkema Publishers, Holanda.
- C.C.I., CONGRESOS Y CONFERENCIAS INTERNACIONALES: Actas de los INTERNATIONAL CONGRESS OF POLYMERS IN CONCRETE: 1th (ICPC-1, London,1975), 2th (ICPC-2. Austin, 1978), 3th (ICPC-3, Koriyama, 1981), 4th (ICPC-4, Darmstadt, 1984), 5th (ICPC-5, Brigton, 1987), 6th (ICPC-6, Shangai,1990), 7th (ICPC-7, Moscou, 1992), 8th (ICPC-8, Ostende,1995).
- Caba, K. de la, *et al.*, 1995, Cinética de curado de poliésteres insaturados con diversas composiciones modificados con polímeros líquidos, *I Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, AEMAC, Sevilla, pp. 17-22.

- Crnkovic, B., 1982, Non-destructive method in determination of technical properties of natural stones, *Durability of Building Materials*, 1, pp. 35-47.
- Chawalwala, A. J., 1996, *Materials Characteristics of Polymer Concrete*, Tesis doctoral inédita, Center for Composite Materials, Universidad de Delaware, E.E.U.U.
- Davis, A. y Sims D., 1983, *Weathering of Polymers*, Applied Science Publishers, Essex, Reino Unido.
- Davydov, S.S., 1958, Puti progressa zhelezobetona (Ciertos progresos en el estudio del hormigón armado), *Sroitel'naya Gazeta*, Junio.
- Delmonte, J., 1969, *Furane resins. Modern Plastics Encyclopedia 1969-1970*, McGraw-Hill, Nueva York, E.E.U.U..
- Demura, K. y Ohama, Y., 1995, Properties of polymer-mortar prepared by hand or machine mixing, *RILEM SIMPOSIUM: Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*, Oostende, Bélgica, pp. 13-19.
- Dietz, A. G. H., 1973, *Plásticos para arquitectos y constructores*, Reverté, Barcelona.
- Dikeou, J.T. *et al.*, 1972, *Concrete-polymer materials*, Fourth topical report, BNL 50328 (T-603) & USBR REC- ERC- 72-10.
- Dikeou, J.T. *et al.*, 1971, *Concrete-polymer materials*, Third topical report, BNL 50275 (t-603) & USBR REC-ERC- 71-6.
- Dikeou, J.T., 1975, Review of worldwide developments and use of polymers in concrete, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp 2-8.
- Dikeou, J.T., 1987, Precast Polymer Concrete in the United States, *Proceedings of the V International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, Brighton, Reino Unido, pp 251-255.

- Feldman, D., 1989, *Polymeric building materials*, Elsevier Applied Science.
- Fernández Cánovas, M., 1981, *Las resinas epoxi en la construcción*, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento (ETCC), Madrid.
- Ferreira, A., Tavares, C., y Ribeiro, C., 2000, Flexural properties of polyester resin concretes, *Journal of Polymer Engineering*, 20 (6), pp. 459-468.
- Fowler, D.W. *et al.*, 1981, Low temperature curing of polymer concrete, *Proceedings of the III International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, Koriyama, Japón, pp. 421-434.
- Gay, D., 1991, *Matériaux composites*, Hermes, París, Francia.
- González Díez, M. I., 1986, *Estudio geológico de Sevilla y sus alrededores*, Tesis doctoral inédita, Facultad de Ciencias, Universidad de Sevilla.
- González Vila, V., 1980, *Cementos*, Enciclopedia de Andalucía (Volumen II).
- Gould, D. F., 1959, *Phenolic Resins*, Reinhold Publishers.
- Guerrero, M.A., Vázquez, M.A., Galán, E., y Zezza, F., 1989, The physical-mechanical properties and ultrasonic data as criteria for evaluation of calcareous stone decay, *First International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Editor: F. Zezza, Bari (Italia), pp. 309-313.
- Hammer, R.H., 1980, Advances in Composites Materials, *Third International Conference on Composite Materials*, Volumen 1, p. 1452.
- Happey, F., 1978, *Applied Fiber Science*, Academic Press.
- Hellerich, W., Harsch, G. y Haelen, S., 1992, *Guía de materiales plásticos*, Hanser, Barcelona.
- Hollaway, I., 1993, *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*, BPA.

- Howdysshell, P. A., 1972, *Creep Characteristics of Polyester Concrete*, Technical Report, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, E.E.U.U.
- Hsu, H., 1984, *Flexural Behavior of Polymer Concrete Beams*, Tesis doctoral inédita, Universidad de Texas, Austin, Texas, E.E.U.U.
- Instituto Nacional de Meteorología, 1995, *Valores normales y estadísticos de estaciones principales (1961-1990)*, Observatorio meteorológico de Sevilla Aeropuerto de San Pablo, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, Madrid.
- Jiménez-Montoya, P., García, A., y Morán, F., 1991, *Hormigón Armado*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- Jorquera, P., y Acuña, C., 1996, Material compuesto: propiedades de concreto polimérico a base de resina vinilester, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 93-100.
- Justnes, H., y Oye, B.A., 1995, Capillary suction of water by polymer cement mortars, *RILEM SIMPOSIUM: Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*, Oostende, Bélgica, pp. 29-37.
- Kimball, K.E., 1961, *WADC Technical Report No. 55-319*.
- Koblischek, P. 1975, Synthetic resin-bound concrete, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp 409-419.
- Kyriacou, K.C., 1991, *Accelerated Compression and Flexural Creep Testing of Polymer Concrete*, Tesis doctoral inédita, Universidad de Texas, Austin, Texas, E.E.U.U.

- Laffarga, J., y Olivares, M., 1995, Los materiales composites y su aplicación en la ejecución de obras arquitectónicas, *I Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, AEMAC, Sevilla, pp. 539-542.
- Larrauri, E., Vergara, F.J., y Madariaga, L., 1996, Rotomoldeo de hormigón polímero decorativo, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 363-368.
- Lawrence, J. R., 1960, *Polyester Resins*, Reinhold Publishers.
- Lott, J., Naus, S., y Howsdyhell, P. A., 1973, Polymer Concrete. Reinforced Concrete Composites Beams, *Technical Report ACI SP-40-14*, Detroit, E.E.U.U., pp 295-318.
- Martineaux, P., 1987, *Les Matériaux Composites dans le Bâtiment*, IMC, Burdeos, Francia.
- Mascia, L., 1974, *The Role of Aditives in Plastics.*, Arnold.
- Mebarkia, S., y Vipulanandan C., 1995, Mechanical properties and water diffusion in polyester polymer concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Diciembre, pp. 1359-1365.
- Mikhailov, K.V., Paturuev, V.V. y Kreis, R., 1992, *Polymer concrete and their structural uses*, Balkema, Lisse, Holanda.
- Ministry of Defence, 1982, *British Plastic Federation Report on Weathering of Composites*, PERME, Waltham Abbey, Essex (Reino Unido).
- Moshchanskii, N.A., 1971, The setting of polymer concrete, *Structural Chemically Stable Polymer Concretes*, pp. 6-13, IPST, Jerusalén, Israel.
- Moshchanskii, N.A., *et al.*, 1968, *Usadka Reakoplastov* (Retracción de duroplastos), Sbornik Trudov NHZhB, Sroiizdat.

Moshchanskii, N.A., y Paturoev, V.V. (editores), 1970, *Structural Chemically Stable Polymer Concretes*, IPST, Jerusalén, Israel.

NBE-CPI/96, *Normativa básica de la Edificación: Condiciones de protección contra incendios en los edificios*.

Ohada, K., Koyanagi, W., y Yonezawa, T., 1975, Thermo-dependent properties of poliéster resin concrete, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp 210-215.

Ohama, Y., 1973, Mix Proportions and Properties of Polyester Resin Concrete, *Technical Report ACI SP-40-503*, Detroit, E.E.U.U., pp 283-294.

Okada, E.K., y Ohama, Y., 1987, Recent research and applications of concrete polymer composites in Japan, *Proceedings of the V International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, Brighton, Reino Unido, pp. 13-21.

Olivares, M., 1998, *El mortero polimérico de albero. Análisis de sus características y estudio de sus posibilidades como material de construcción*, Trabajo de investigación no publicado, Universidad de Sevilla.

París, F., y Cañas, J. (editores), 1995, *Materiales Compuestos 95*, I Congreso Nacional de Materiales Compuestos (AEMAC), Sevilla.

Paturoev, V.V., 1971, The Long-Time Strength of Polymer Concretes, *Structural Chemically Stable Polymer Concretes*, pp. 14-24, IPST, Jerusalén, Israel.

Peñaranda, J.A., Miguel, J., y Delojo, G., 1995, Caracterización de defectos en materiales compuestos mediante ultrasonidos y radiografía con agente de contraste, *I Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, AEMAC, Sevilla, pp. 347-352.

- Potapov, Y. B., Zala, L. M., y Zolotukhin, S.N., 1992, Strength and Deformation of Polymer Concrete Composites including Creep and Aggressive Medium, *RILEM SIMPOSIUM: On interfaces in cementious composites*, Tolouse, Francia, pp. 99-106.
- Prieto Carrasco, I., y Alastrue Castillo, E., 1963, *Informe geológico-minero sobre las posibilidades de utilización de las calizas en la Loma de Los Alcores*, Informe del Instituto Geológico-Minero, Sevilla.
- Pritchard, G., 1980, *Developments in reinforced plastics*, Applied Science Publishers, Londres, Reino Unido.
- Quarmby, A., 1974, *Materiales plásticos y arquitectura experimental*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- Ramos, M.A., y De María Ruiz, M.R., 1988, *Ingeniería de los materiales plásticos*, Díaz de Santos, Madrid.
- Rebeiz, K., y Fowler, D. W., 1992, *Structural use de polymer components using unsaturated polyester resins based on recycled poly(ethilene terephthalate) PET*, Research Report, Universidad de Texas, Austin, Texas, E.E.U.U.
- Ribeiro C., Tavares C., Ferreira A., Paulo A., Silva M., 2001, Mechanical behaviour of degradated polymer concrete, *Proceedings of the I International Conference Composites in Constructions*, Oporto, Portugal, Balkema Publishers, Lisse, Holanda, pp. 83-88.
- RILEM Colloque, 1967, *Les résines de synyhése dans la construction*, Eyrolles, París, Francia.
- RILEM PC-1, 1995, *Method of making samples of polymer concrete and mortar in the laboratory*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-10, 1995, *Method of test for bond strength of polymer concrete and mortar to reinforcing steel bars*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-11, 1995, *Method of test for water absorption of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-12, 1995, *Method of test for chemical resistance of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-13, 1995, *Method of test for coefficient of thermal expansion of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-2, 1995, *Method of making polymer concrete and mortar specimens*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-3, 1995, *Method of test for slump and flow of fresh polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-4, 1995, *Determining methods for working life of fresh polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-5, 1995, *Method of test for compressive strength of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-6, 1995, *Method of test for splitting tensile strength of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-7, 1995, *Method of test for flexural strength of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-8, 1995, *Method of test for static elastic modulus of polymer concrete and mortar*, Technical Committee TC-113.

RILEM PC-9, 1995, *Method of test for adhesion of polymer concrete and mortar to cement concrete*, Technical Committee TC-113.

- RILEM PCM-8, 1995, *Method of test for flexural strength and deflection of polymer-modified mortar*, Technical Committee TC-113.
- Rodríguez, M^a A., Rubio, F., Rubio, J., Liso M.J., y Oteo, J.L., Composites de poliéster reforzados con pizarras, *I Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, AEMAC, Sevilla, pp. 181-186.
- Rodríguez, R., 1999, *Características técnicas de rocas ornamentales en la edificación*, Tesis doctoral inédita, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad de Sevilla.
- Rodríguez-Maribona, I., San José, J.T., Urreta J.I., y Martín, J., 1996, Hormigón polímero poliéster armado: adherencia, flexion y durabilidad, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 83-92.
- San José, J.T., 1996, *Hormigón polímero estructural y decorativo. Aplicación a composites para la construcción*, Tesis doctoral inédita, Universidad del País Vasco.
- Sandrolini, F., Rosas Rosas, M., Bonore, V., y Seccan, A., 1992, Mechanical properties and microstructure of polyester-cementious composites, *RILEM SIMPOSIUM: On interfases in cementious composites*, Tolouse, Francia, pp. 207-216.
- Sandrolini, F., y Tassone, P., 1995, New Italian (UNI) Standards for Testing polymer agglomered Natural Stone for Wall and Floor Tiles. Properties of polymer-mortar prepared by hand or machine mixing, *RILEM SIMPOSIUM: Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*, Oostende, Bélgica, pp. 57-62.
- Simon, S., Verges-Belmin, V., Blanc, A., y Snethlage, R., 1994, The marble columns in the cloister of Primatial Church St. Trophime in Arles. Ultrasonic velocity measurements as a tool for anamnesis and diagnosis, *Third International*

Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin,
Editor: F. Zezza, Venecia, Italia, pp. 11-18.

Sreinberg, M., *et al.*, 1968, *Concrete-polymer materials*, First topical report, BNL 50134 (T-509) & USBR General Report No. 41.

Sreinberg, M., *et al.*, 1970, *Concrete-polymer materials*, Second topical report, BNL 50218 (T-560) & USBR REC-OCE-70-1.

Suzuki, H., y Sugahara, S., 1975, Fire Tests on models constructed of resin concrete, *Proceedings of the I International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, The Construction Press, Lancaster, Reino Unido, pp. 306-311.

Tennyson, R. C., 1980, Effects of Various Enviromental Conditions on Polymer Matrix Composites, *AGARD-CP-288*, pp. 2.1-2.21, Atenas, Grecia.

Troitzsch, J., Becker, W., y Bönold, W., 1990, *International Pastics Flammability Handbook*, Hanser Publisher, Munich, Alemania.

UNE 127020:1999 EX, *Baldosas de terrazo uso interior. Resistencia al desgaste por abrasión. Método de ensayo del disco ancho.*

UNE 127021:1999 EX, *Baldosas de terrazo uso exterior.*

UNE 127022:1999 EX, *Baldosas de hormigón uso exterior.*

UNE 127023:1999 EX, *Losetas de hormigón.*

UNE 127024:1999 EX, *Baldosas aglomeradas de cemento.*

UNE 23721:1990, *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo por radiación aplicable a los materiales rígidos o similares (materiales de revestimiento) de cualquier espesor y a los materiales flexibles de espesor superior a los 5 mm.*

- UNE 23727:1990, *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Clasificación de los materiales utilizados en la construcción.*
- UNE 67087:1985, *Baldosas cerámicas para suelos y paredes. Definiciones, clasificación, características y marcado.*
- UNE 83304:1984, *Ensayos de hormigón. Rotura por compresión.*
- UNE 83821:1992 EX, *Morteros. Métodos de ensayo. Morteros endurecidos. Determinación de las resistencias a flexión y a compresión.*
- UNE-EN ISO 10545-1:1997, *Baldosas cerámicas. Parte 1: Muestreo y criterios de aceptación.* (ISO 10545-1:1995).
- UNE-EN ISO 10545-13:1998. *Baldosas cerámicas. Parte 13: Determinación de la resistencia química.* (ISO 10545-13:1995).
- UNE-EN ISO 10545-14:1998. *Baldosas cerámicas. Parte 14: Determinación de la resistencia a las manchas* (ISO 10545-14:1995, incluye Corrigendum Técnico 1:1997).
- Uriev, N. B., Trofimova, L. E., y Kestelman, V., 1997, *Measuring Rheological Characteristics of Mineral-Polymer Compositions, RILEM SIMPOSIUM: On interfaces in cementitious composites*, Toulouse, Francia, pp. 97-98.
- Valdecantos, C., 1995, *Inspección por ultrasonidos de materiales compuestos. Técnica de impulso-eco, I Congreso Nacional de Materiales Compuestos, AEMAC, Sevilla, pp. 353-361.*
- Vale, C. P., y Taylor, W.C.K., 1964, *Aminoplastics*, Illife Books.
- Vale, J., y Martín Pérez, A., 1985, *Ensayos de materiales en atmósferas controladas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Serie Ingeniería nº 7, Universidad de Sevilla.

- Villegas, R, Vale J.F., 1992, Evaluation of the behavior of water repellent treatments for stones, *Proceedings of the VII International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisboa, Vol. 3, pp. 1253-1262.
- Wheat, D. L y Fowler, D. W., 1995, Test Procedures for Determining the Thermal Expansion of PC, *RILEM SIMPOSIUM: Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*, Oostende, Bélgica, pp. 71-75.
- Yashin, A.V., 1963, *Issledovante polzuxhesti plastbetonov* (Investigaciones del Creep en los PC), Sbornik NHZhB, GOSSTROIIZDAT, (En ruso).
- Yeon, K. S., Kim, K. W., y Lee, Y. S., 1997, Maturity of Polyester Polymer Concretes, *RILEM SIMPOSIUM: On interfaces in cementitious composites*, Toulouse, Francia, pp. 81-88.

VI.2. OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

- Alonso, J.R., y Bilbao, P., 1998, Los materiales de construcción y su reacción al fuego, *II Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Burdeos, Francia, pp. 373-388.
- Cano, M., San José, J.T., y Ramírez, J.L., 1998, Polyester concrete. Fundamental hardened and fresh state, *II Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Burdeos, Francia, pp. 191-200.
- Ferreira, A., Tavares, C., Ribeiro, C., Figueiredo, M., y Fernández, A., 2000, Influence of material parameters in the mechanical behaviour of polymer concrete, *III Mechanics and Materials in Design Congress*, Orlando, E.E.U.U.
- Fielitz, B., 1996, New highly flame resistant polyester moulding compounds, *Proceedings of the VII European Congress on Composite Materials*, Woodledd Publishers.
- Gray, W.A., 1968, *The packing of solid particles*, Powder Technology Series.
- Hilado, C.J., 1990, *Flammability handbook of plastics*, Technomic Publishing.
- Hollaway, L., 1990, *Polymers and polymer composites in construction*, Telford, Londres, Reino Unido.
- Ismail, M.R., Ali, M.A.M., Afifi, M.S., El-Miligy, A.A., 1999, Studies on sand-unsaturated polyester composite materials, *Polymer-Plastic Technology and Engineering*, 38 (2), pp. 351-369.
- Ohada, K., y Koyanagi, W., 1987, Design recommendations for polyester resin concrete structures” *Proceedings of the V International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC)*, Brighton, Reino Unido.

- Ohama, Y., Kobayashi, T., Takeuchi, K., y Nawata, K., 1986, Chemical resistance of polymethyl methacrylate concrete, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8 (2).
- Pollet, V., Van Laeete, W., y Vineke, J., 1995, The use of polymers for industrial floors: a state of the art report, *RILEM SIMPOSIUM: Properties and Test Methods for Concrete-Polymer Composites*, Oostende, Bélgica, pp. 269-275.
- Río, M., y Hernández, F., 1998, Nuevos materiales compuestos de yeso-corcho, *II Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos aplicados en Arquitectura y Construcción*, Burdeos, Francia, pp. 335-354.
- San José, J.T., Rodríguez-Maribona, I., Martín, J., y Urreta, J.I., 1996, Caracterización mecánica de un hormigón polímero poliéster, *I Conferencia Internacional sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción*, Sevilla, pp. 335-244.
- Seymour, R.B., y Carraher, C.E., 1984, *Introducción a la química de los polímeros*, Editorial Reverté.
- Staley, D.W., y Arch, B., 1985, *An experimental investigation of polymer concrete systems*, Technical Report, Universidad de Texas, Austin, Texas, E.E.U.U.
- Varela, A., 1996, *Elementos estructurales con materiales polímeros*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de la Coruña, Universidad de la Coruña.
- Varughese, K.T., y Chaturvedi, B.K., 1996, Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete, *Cement and Concrete Composites*, 18, pp. 105-108.
- Vipulanandan, C., y Paul, E., 1990, Performance of epoxy and polyester polymer concrete, *ACI Materials Journal*, Mayo-Junio, pp. 241-251.