

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los ensayos de caracterización del hormigón reciclado y de control. Los mismos se presentan en el mismo orden en el que la metodología de ensayo fue descrita.

Primeramente, se han caracterizado por separado los distintos componentes del hormigón reciclado: el cemento, el árido natural y el árido reciclado. En segundo lugar, se recogen los resultados del ajuste de las dosificaciones y la caracterización del hormigón en estado fresco, obtenidos en base a las metodologías planteadas.

Seguidamente, en un segundo bloque, se presentan los resultados derivados de los ensayos de caracterización del hormigón reciclado en cuanto a sus propiedades físicas (densidades, porosidades, absorción, capacidad de propagación de impulsos ultrasónicos y macroporosidad), durabilidad (carbonatación, permeabilidad al agua y a

los gases) y propiedades mecánicas no dinámicas (resistencia a compresión, a tracción y módulo de elasticidad) para las dosificaciones definidas.

Por último, este capítulo recoge los resultados derivados de la caracterización frente a cargas alternadas del hormigón reciclado a partir de los ensayos de determinación del comportamiento a fatiga bajo programas de cargas cíclicas LOCATI y, finalmente, bajo programas STAIRCASE. Téngase en cuenta que estos últimos resultados han debido ser sintetizados por el gran volumen de datos que su presentación supone. No obstante, en el Anejo VI de esta Tesis se incluyen todos los resultados de los ensayos correspondientes.

Por último, se ha realizado un estudio fractográfico sobre probetas de hormigón tras su colapso por fatiga.

3.1. PROPIEDADES DEL CEMENTO

En el presente apartado, se incluyen los resultados de caracterización del material aglutinante, el cemento, utilizado en la elaboración del hormigón reciclado. En primer lugar, se ha calculado la densidad real de los dos cementos seleccionados como paso previo para la realización del ensayo de determinación de la superficie específica Blaine. Igualmente, el conocimiento de la densidad de los cementos utilizados es necesario, también, en el cálculo de las distintas dosificaciones de hormigón. De igual forma, se presentan los resultados en cuanto a los componentes elementales de los mismos mediante técnicas de energía dispersiva de rayos X (EDAX) y por espectrometría por fluorescencia de rayos X. Además, se recoge la composición mineralógica de los mismos, en este caso mediante la técnica de difracción de rayos X realizada sobre el propio cemento en polvo.

Los resultados obtenidos para cada una de estas caracterizaciones se incluyen, a continuación, en los correspondientes apartados.

3.1.1. Densidad real

La densidad real determinada mediante volumetría de Le Chatelier, se recoge en la Tabla 14. Se presentan, por separado, los resultados del cemento de la primera y segunda de las fases y la del cemento empleado en la tercera fase del programa experimental.

Tabla 14. Densidad real de los cementos utilizados.

Tipo de cemento	Densidad real [g/cm ³]
CEM I 42,5 R/SR	3,05
CEM I 52,5 N/SR	3,11

3.1.2. Superficie específica Blaine

Tras la determinación de la densidad real, se procede a cuantificar la superficie específica Blaine mediante la metodología que se describe en el capítulo correspondiente.

Los resultados obtenidos para el cemento de, por una parte, la primera y segunda fases y, por otra, la tercera fase, se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Superficie específica Blaine de los cementos utilizados.

Tipo de cemento	Superficie Blaine [cm ² /g]
CEM I 42,5 R/SR	3582
CEM I 52,5 N/SR	3610

3.1.3. Composición química

A continuación, se presentan los resultados de composición química elemental de los dos tipos de cemento utilizados en las sucesivas fases del proyecto. Las Fig. 107 y Fig. 108 muestran los resultados obtenidos, por energía dispersiva de rayos X, en forma de barras, quedando representado en el eje de ordenadas el porcentaje en peso del elemento en cuestión.

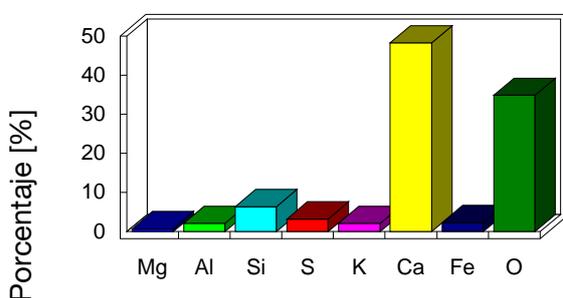


Fig. 107. Composición química elemental del cemento CEM I 42,5 R/SR.

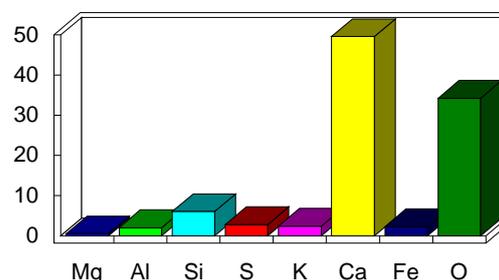


Fig. 108. Composición química elemental del cemento CEM I 52,5 N/SR.

En cuanto a los resultados en óxidos, obtenidos mediante espectrometría por fluorescencia de rayos X, los valores, incluidos el azufre (calculado mediante combustión) y el carbono, se recogen en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis químico, en porcentaje en peso de óxidos por espectrometría por fluorescencia de rayos X, incluido el carbono por calcinación.

Tipo de cemento	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	C
CEM I 42,5 R/SR	65,6	17,8	5,5	2,48	3,38	1,37	1,55	0,36	0,28
CEM I 52,5 N/SR	69,6	18,6	3,1	2,66	3,22	0,54	1,17	0,17	0,47

3.1.4. Composición mineralógica

A continuación, se presentan los resultados de caracterización mineralógica, por difracción de rayos X, de los cementos utilizados en las distintas fases de la investigación de las que consta esta Tesis.

La Fig. 109 recoge el análisis mineralógico por difracción de rayos X del cemento utilizado en la primera y segunda de las fases del proyecto.

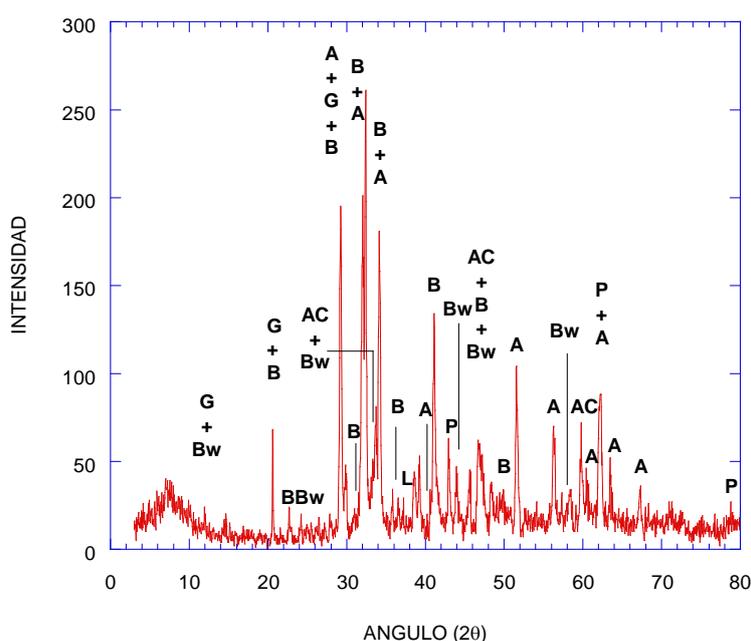


Fig. 109. Análisis mineralógico del CEM I 42.5 R/SR donde B: Belita (C_2S); A: Alita (C_3S); AC: Aluminato tricálcico (C_3A); P: Periclasa (MgO); L: Carbonato cálcico ($CaCO_3$); G: Yeso ($CaSO_4$); Bw: Brownmillerita ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$)

La Fig. 110, por su parte, presenta el resultado de la interpretación del difractograma proporcionado por el cemento utilizado en la tercera fase. En esta ocasión, se han analizado los picos correspondientes a los mismos minerales detectados en el

cemento utilizado en las primera y segunda fases, habiéndose encontrado todos ellos y con picos ligeramente más intensos que en el primero de los análisis.

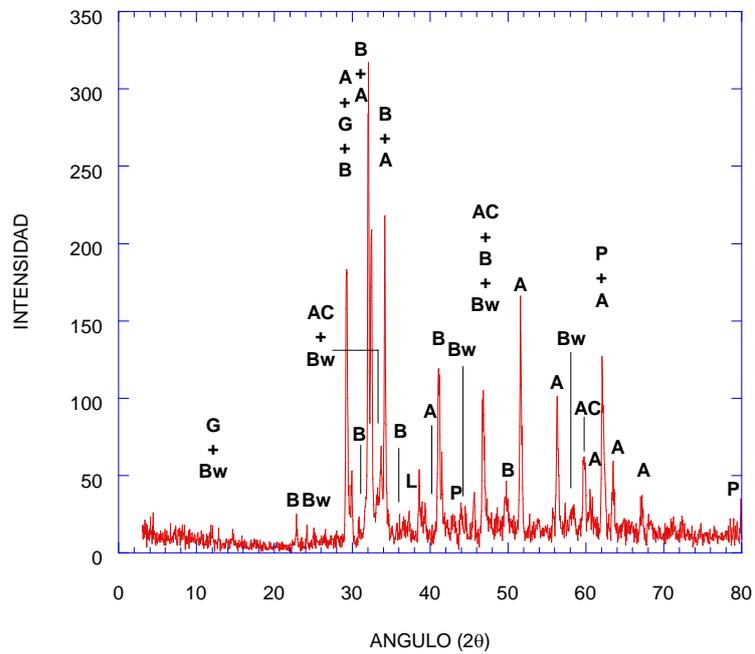


Fig. 110. Análisis mineralógico del CEM I 52.5 R/SR donde B: Belita (C_2S); A: Alita (C_3S); AC: Aluminato tricálcico (C_3A); P: Periclasa (MgO); L: Carbonato cálcico ($CaCO_3$); G: Yeso ($CaSO_4$); Bw: Brownmillerita ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$)

3.2. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS NATURALES Y RECICLADOS

3.2.1. Composición macroscópica

La utilización del árido reciclado en hormigones pasa por una completa caracterización del material y de un control y seguimiento de su producción. Los gráficos sectoriales que a continuación se muestran recogen los resultados de la separación visual de los componentes macroscópicos de los áridos reciclados incorporados al hormigón en esta investigación.

La Fig. 111 representa los distintos porcentajes de componentes del árido reciclado procedente de hormigón triturado, cuyos constituyentes principales son: árido natural, mortero y árido natural con mortero adherido, además de otros componentes minoritarios con porcentajes inferiores al 2% en peso. Este análisis corresponde al árido reciclado utilizado en las fases primera y segunda.

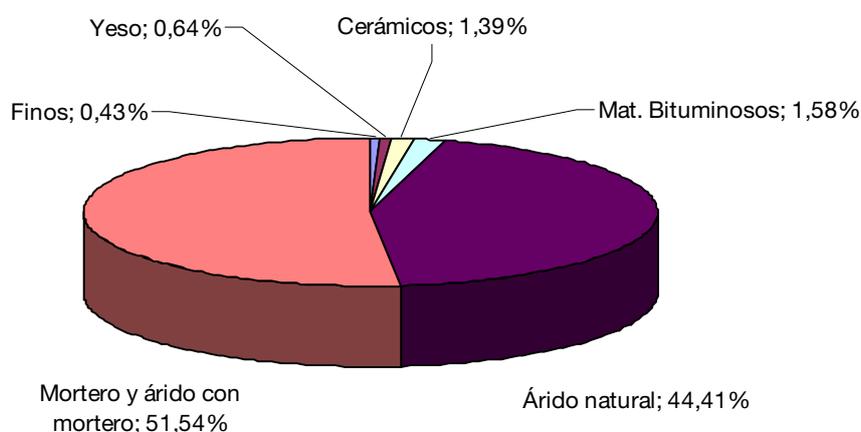


Fig. 111. Resultados de la separación visual de los áridos reciclados de las primera y segunda fases.

El grupo de mortero y árido con mortero adherido es el más abundante de todos (más del 50% en peso). En este grupo se incluyen, además de los morteros, los conjuntos de grava o gravilla que se encuentran adheridos a un volumen de mortero igual o superior al de ellos mismos. El segundo grupo más abundante es el de las gravas y gravillas naturales, con un 44,4% en peso sobre el total. El material bituminoso se encuentra en una proporción mucho menor que los dos primeros grupos. Destaca por

su poca consistencia y por un tamaño de partícula no superior a 10 mm. Otros elementos que aparecen son: ladrillo rojo (cerámico) en una proporción de 1,39%; 0,64% de yeso y el resto (0,43% en peso) corresponde a finos con un tamaño de partícula inferior a 1 mm.

Las Fig. 112, Fig. 113, Fig. 114, Fig. 115, Fig. 116 y Fig. 117 muestran los distintos materiales tras su separación.



Fig. 112. Mortero y árido con mortero del árido reciclado de las fases I y II.



Fig. 113. Árido natural encontrado en el árido reciclado de las fases I y II.



Fig. 114. Yeso encontrado en el árido reciclado de las fases I y II.



Fig. 115. Asfalto encontrado en el árido reciclado de las fases I y II.



Fig. 116. Cerámicos encontrados en el árido reciclado de las fases I y II.



Fig. 117. Finos encontrados en el árido reciclado de las fases I y II.

En lo referente a la tercera fase, la Fig. 118 recoge los resultados obtenidos tras la evaluación de pesos de los distintos componentes de este árido reciclado, separados visualmente.

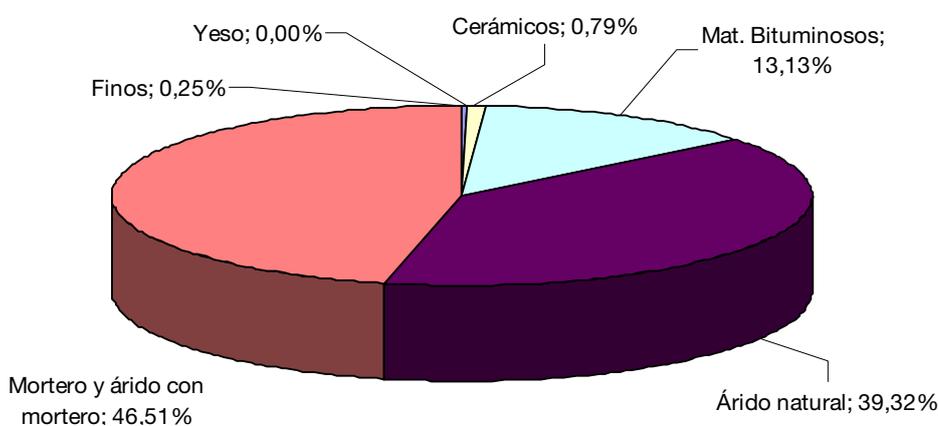


Fig. 118. Resultados de la separación de los áridos reciclados de la fase III.

Nuevamente, en esta tercera fase, el grupo de mortero y árido con mortero adherido es el más abundante de todos (más del 46% en peso). El segundo grupo de mayor porcentaje presencial es el de las gravas y gravillas naturales, con un 39% en peso sobre el total. El material bituminoso se encuentra en una proporción mucho menor que los dos primeros grupos, pero mayor que en el árido reciclado de las fases anteriores (13%). No obstante, en esta ocasión se ha considerado como material bituminoso a aquéllos áridos naturales contaminados en superficie con este material

que, a pesar de ser áridos naturales, evidentemente no provienen de hormigón. Otros elementos que aparecen son: cerámicos en una proporción sensiblemente menor que en las fases primera y segunda, el 0,79%; no se detecta presencia de yeso y el resto (0,25% en peso) son finos con un tamaño de partícula inferior a 1 mm.

Las Fig. 119, Fig. 120, Fig. 121 y Fig. 122 muestran los distintos materiales tras su separación.



Fig. 119. Mortero y conglomerado encontrados en el árido de la fase III.



Fig. 120. Árido natural encontrado en el árido reciclado de la fase III.



Fig. 121. Árido contaminado con betún de la fase III.



Fig. 122. Finos encontrados en el árido reciclado de la fase III.

3.2.2. Propiedades geométricas y dimensionales

En la elaboración de los hormigones de control y reciclados, en las tres fases, se han utilizado tres fracciones de árido natural y una grava reciclada. A continuación, se presentan las propiedades geométricas y dimensionales de cada uno de ellos.

3.2.2.1. Análisis granulométricos

En la Fig. 123, se recogen las curvas granulométricas de los áridos, naturales y reciclados, utilizados en las fases primera y segunda de la investigación.

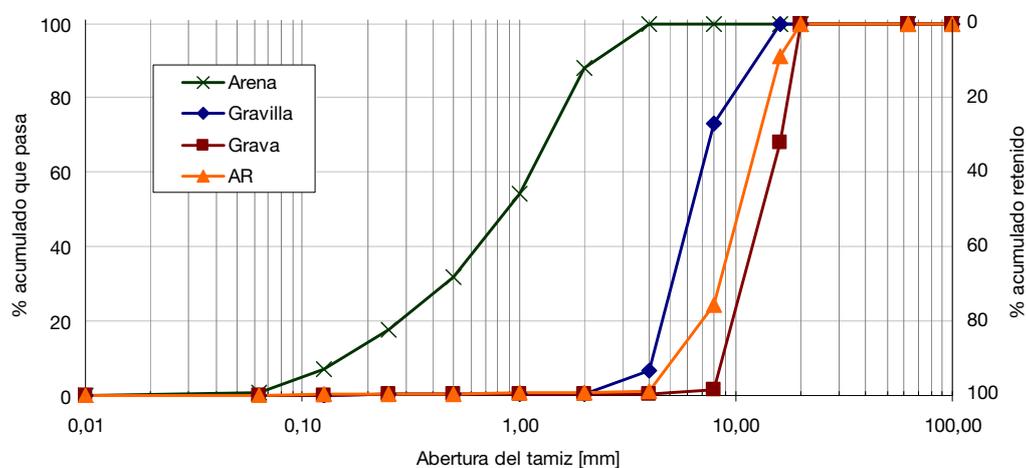


Fig. 123. Curvas granulométricas de los áridos de las fases primera y segunda.

En la Fig. 124 se recogen las curvas granulométricas de los áridos utilizados en la tercera fase de la investigación.

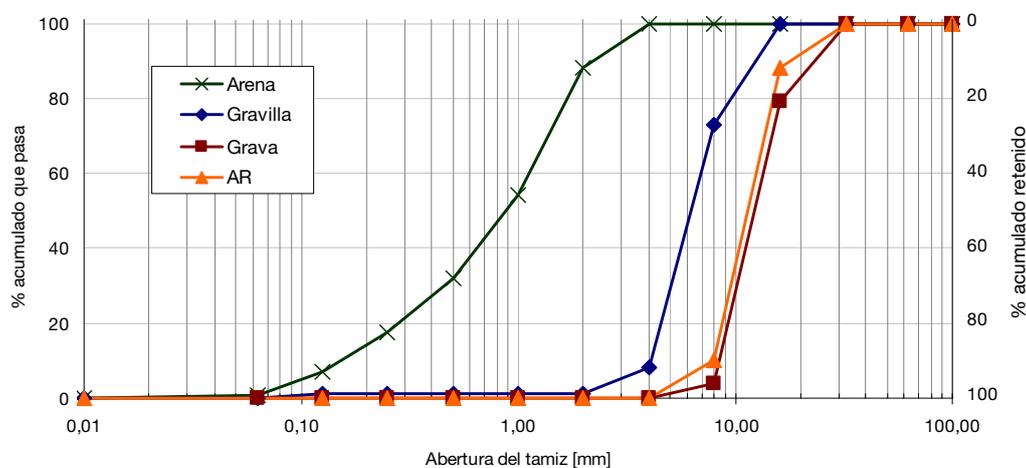


Fig. 124. Curvas granulométricas de los áridos utilizados en la tercera fase.

Tras realizar la separación granulométrica de la muestra, según la metodología descrita anteriormente y de acuerdo con la clasificación correspondiente a la serie básica recogida en la norma UNE – EN 12620:03: “Áridos para hormigón” [38], han podido catalogarse los áridos utilizados en la investigación, recogiendo en la Tabla 17 los resultados obtenidos.

Tabla 17. Tamaño, módulo granulométrico y categoría de los áridos utilizados en la investigación.

Material	d/D [mm]	Fases I y II		Fase III	
		Módulo	Categoría	Módulo	Categoría
Arena	0/6	2,9	GF85	3,1	GF85
Gravilla	6/12	6,8	Gc85/20	6,9	Gc85/20
Grava	12/20	8,1	Gc90/15	8,2	Gc90/15
Árido Reciclado	6/20	7,4	Gc90/15	7,8	Gc90/15

3.2.2.2. Contenido en finos

La Tabla 18 recoge los resultados obtenidos en cuanto al contenido en finos encontrados en los áridos naturales y reciclados utilizados en las tres fases de la investigación.

Tabla 18. Contenido en finos de los áridos utilizados en la investigación.

Contenido en finos [%]		
Material	Fases I y II	Fase III
Arena (0/6)	1,52	1,93
Gravilla (6/12)	0,12	0,12
Grava (12/20)	0,13	0,97
Árido reciclado (6/20)	0,24	0,38

3.2.2.3. Contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm

La Tabla 19 recoge el contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm encontrado en los áridos gruesos naturales y reciclados utilizados en las distintas fases de la etapa experimental.

Tabla 19. Contenido de partículas inferiores a 4 mm de cada uno de los áridos gruesos utilizados en la investigación.

Partículas inferiores a 4 mm [%]		
Material	Fases I y II	Fase III
Gravilla (6/12)	3,21	1,54
Grava (12/20)	1,48	1,78
Árido reciclado (6/20)	1,17	1,23

3.2.2.4. Índice de lajas

En base a los resultados obtenidos en los análisis granulométricos, presentados en las Fig. 123 y Fig. 124, se seleccionan, en cada caso, los tamices de barras a utilizar para la determinación del índice de lajas, cumpliendo la condición de que la separación entre las barras en cada caso sea igual a $D/2$ para cada una de las fracciones individuales, como ya se especificó en el apartado correspondiente de la metodología experimental.

La Tabla 20 recoge, separadamente para cada fase, los resultados de la determinación del índice de lajas de cada fracción considerada, así como los valores globales de este parámetro para el conjunto de todo el árido reciclado.

Tabla 20. Índice de lajas de los áridos reciclados utilizados en la investigación.

Índice de lajas del árido reciclado [%]		
Tamiz [mm]	Fases I y II	Fase III
20	6,5	7
16	5,5	5
12,5	5	5
10	5	6
8	5,5	5,5
6,3	6	6
5	8	8,5
4	7,5	7,5
Índice de lajas global:	6,25	6,3

3.2.2.5. Coeficiente de forma

En la Tabla 21, se presentan los resultados del ensayo de determinación del coeficiente de forma de los áridos reciclados para las fracciones consideradas en la investigación.

Tabla 21. Coeficiente de forma de distintas fracciones del árido reciclado.

Coeficiente de forma de la grava reciclada [%]		
Fracción (di/Di)	Fases I y II	Fase III
Fracción de árido reciclado 6/12	12	11
Fracción de árido reciclado 12/20	20	21
Árido reciclado 6/20	17	18

3.2.3. Propiedades físicas

Dentro de este apartado, se recogen los resultados correspondientes a la determinación de densidades relativas, aparentes y saturadas de los áridos, con especial atención a los áridos reciclados utilizados en el transcurso de la investigación, además de los valores del coeficiente de absorción y la porosidad de la fracción gruesa de los mismos.

3.2.3.1. Densidad relativa, aparente y saturada

En la Tabla 22 se presentan los resultados de los ensayos para la determinación de la densidad de la fracción fina de la arena caliza utilizada en las dosificaciones.

Tabla 22. Densidad real de la arena utilizada.

Densidad real – D_R [g/cm ³]		
Árido	Fases I y II	Fase III
Arena	2,58	2,61

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos para la fracción gruesa del árido reciclado y natural. En este caso, se proporcionan los valores de densidad aparente, densidad relativa y densidad saturada.

Tabla 23. Densidad aparente, densidad relativa y densidad saturada de las gravas utilizadas en la investigación.

Densidades [g/cm ³]						
Árido	Fases I y II			Fase III		
	Densidad aparente	Densidad relativa	Densidad saturada	Densidad aparente	Densidad relativa	Densidad saturada
Gravilla	2,50	2,63	2,55	2,51	2,62	2,55
Grava	2,49	2,58	2,53	2,54	2,63	2,59
Á. Reciclado	2,31	2,54	2,40	2,32	2,55	2,41

3.2.3.2. Coeficiente de absorción de agua

En la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos para el coeficiente de absorción de la fracción gruesa del árido reciclado y del árido natural.

Tabla 24. Coeficiente de absorción de los áridos utilizados en la investigación.

Absorción [% en peso]		
Árido	Fases I y II	Fase III
Gravilla	2,1	1,8
Grava	1,5	1,6
Árido reciclado	5,2	5,3

3.2.3.3. Porosidad accesible

La Tabla 25 presenta los resultados obtenidos para el valor de la porosidad accesible de la fracción gruesa del árido reciclado y del árido natural.

Tabla 25. Porosidad accesible de los áridos gruesos utilizados en la investigación.

Porosidad accesible [% en volumen]		
Árido	Fases I y II	Fase III
Gravilla	5,2	4,7
Grava	3,7	4,0
Árido reciclado	12,1	12,3

3.2.4. Propiedades mecánicas y tribológicas

En este apartado se recogen los resultados de los ensayos de contenido de partículas blandas, desgaste Los Ángeles y del índice de machacabilidad del árido natural, reciclado y, en los dos últimos casos, de la combinación de los mismos.

3.2.4.1. Contenido de partículas blandas

En la Tabla 26, se presentan los resultados de los ensayos de determinación del contenido de partículas blandas para las distintas fracciones de árido reciclado consideradas, en primer lugar el número de ellas encontradas sobre 20 analizadas y el porcentaje en peso de de las mismas respecto del total.

Tabla 26. Contenido de partículas blandas de los áridos reciclados utilizados en la investigación.

Contenido de partículas blandas							
Fases I y II				Fase III			
Fracción 10/12,5		Fracción 12,5/20		Fracción 10/12,5		Fracción 12,5/20	
Número	% peso	Número	% peso	Número	% peso	Número	% peso
9	8,5	10	10,1	13	11,4	13	12,9

3.2.4.2. Coeficiente de desgaste Los Ángeles

Con la finalidad de caracterizar en mayor medida el comportamiento de la combinación de los áridos reciclados junto con los áridos naturales, se ha considerado estudiar el coeficiente de desgaste de distintas proporciones de áridos.

Para ello, se ha tomado el porcentaje correspondiente de la fracción 10/14 (exigida en este ensayo) de una parte de gravilla y otra de reciclado según se establece en las dosificaciones. De esta forma, se han pesado la gravilla, la grava y el árido reciclado, previamente cribados a un tamaño 10/14, y se han mezclado en proporciones de 20% y 50%.

Los resultados obtenidos, distribuidos por fases y tipos de árido y mezclas, se recogen en la Tabla 27.

Tabla 27. Coeficiente de desgaste de los áridos y de los distintos porcentajes de mezcla.

Coeficiente de desgaste LA [%]		
Árido	Fases I y II	Fase III
Gravilla	32	31
Mezcla 20%	34	34
Mezcla 50%	37	35
Árido reciclado	41	42

3.2.4.3. Índice de machacabilidad

La Tabla 28 recoge los resultados obtenidos del índice de machacabilidad de las fracciones de áridos naturales, reciclado y mezcla de ambos, tal y como se procedió en el caso del coeficiente de Los Ángeles, incorporando, en este caso, además de la fracción 10/14, la fracción 14/20.

En la Fig. 125 se muestra el estado del árido, antes del ensayo de machacabilidad, en el interior del cilindro rígido indeformable. Por su parte, en la Fig. 126 queda representado el estado del árido tras la aplicación de la carga y la extracción del cilindro.

Tabla 28. Índice de machacabilidad de los distintos áridos y mezclas para las fracciones consideradas.

Índice de machacabilidad [%]			
Árido	Fases I y II	Fase III	
Fracción 10/14	Gravilla	29	30
	Mezcla 20%	31	29
	Mezcla 50%	32	29
	Árido reciclado	32	32
Fracción 14/20	Gravilla	27	28
	Mezcla 20%	28	29
	Mezcla 50%	28	29
	Árido reciclado	30	30



Fig. 125. Aspecto del árido mezcla y dispositivo antes de la realización del ensayo. Fases I y II, 50%, fracción 14/20.

Fig. 126. Aspecto del árido tras la realización del ensayo. Fases I y II, 50%, fracción 14/20.

Como complemento, esta metodología permite determinar la densidad de conjunto de las distintas mezclas, tales valores se recogen en la Tabla 29.

Tabla 29. Densidad de conjunto de las distintas mezclas de árido.

Densidad de conjunto [g/cm ³]			
Árido		Fases I y II	Fase III
Fracción 10/14	Grava	1,53	1,53
	Mezcla 20%	1,55	1,45
	Mezcla 50%	1,52	1,44
	Árido reciclado	1,45	1,42
Fracción 14/20	Grava	1,47	1,47
	Mezcla 20%	1,49	1,47
	Mezcla 50%	1,48	1,41
	Árido reciclado	1,44	1,34

3.2.4.4. Comportamiento bajo cargas de compresión

En las Fig. 127, Fig. 128, Fig. 129 y Fig. 130 se presenta el comportamiento, en forma de curva de evolución tensión-deformación, para diferentes mezclas y fracciones, del esqueleto confinado de áridos bajo cargas de compresión en el interior de un cilindro rígido, distribuidas según fases. Nótese que el ensayo se detiene en 22,5 MPa, tensión que corresponde con los 400 kN que exige el ensayo normalizado.

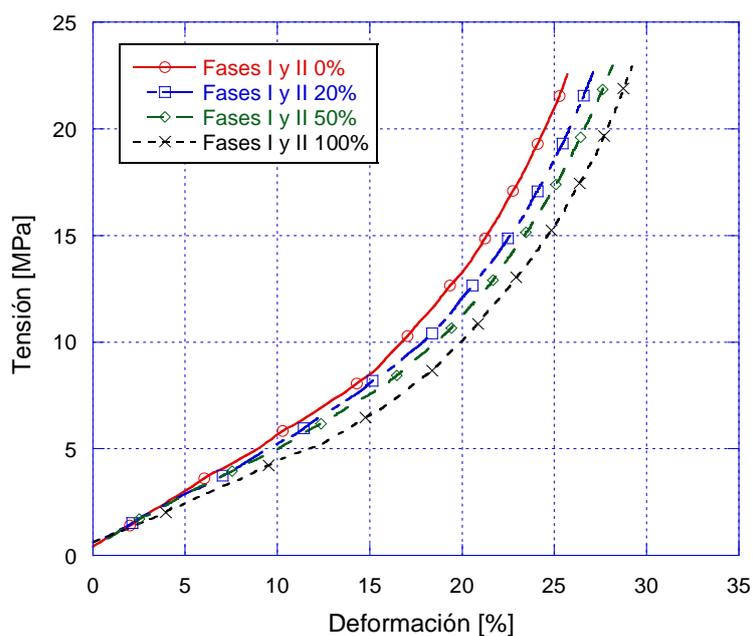


Fig. 127. Curvas tensión-deformación del esqueleto confinado de áridos naturales, reciclado y mezclas de las Fases I y II para la fracción 10/14.

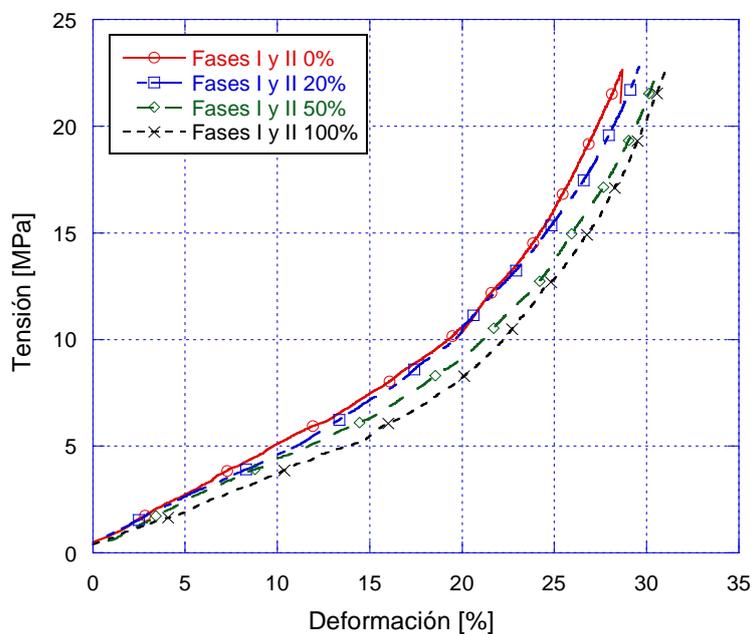


Fig. 128. Curvas tensión-deformación del esqueleto confinado de áridos naturales, reciclado y mezclas de las Fases I y II para la fracción 14/20.

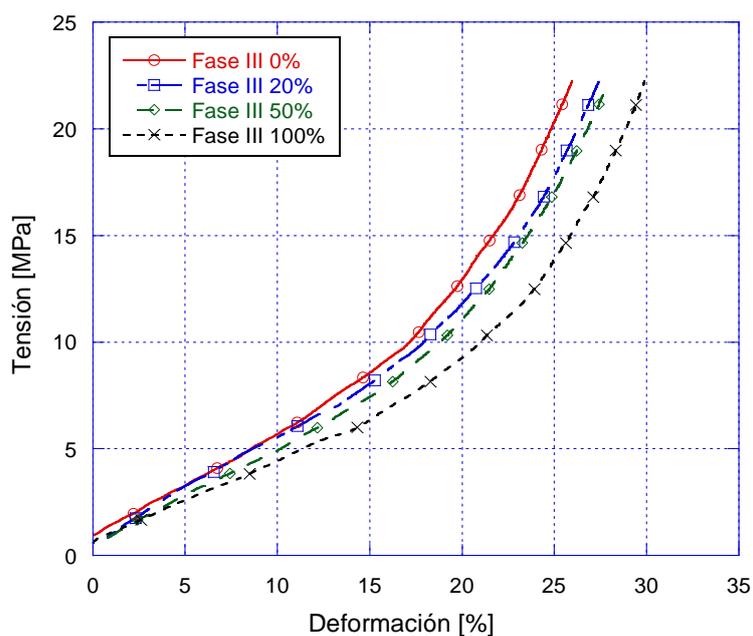


Fig. 129. Curvas tensión-deformación del esqueleto confinado de áridos naturales, reciclado y mezclas de la Fase III para la fracción 10/14.

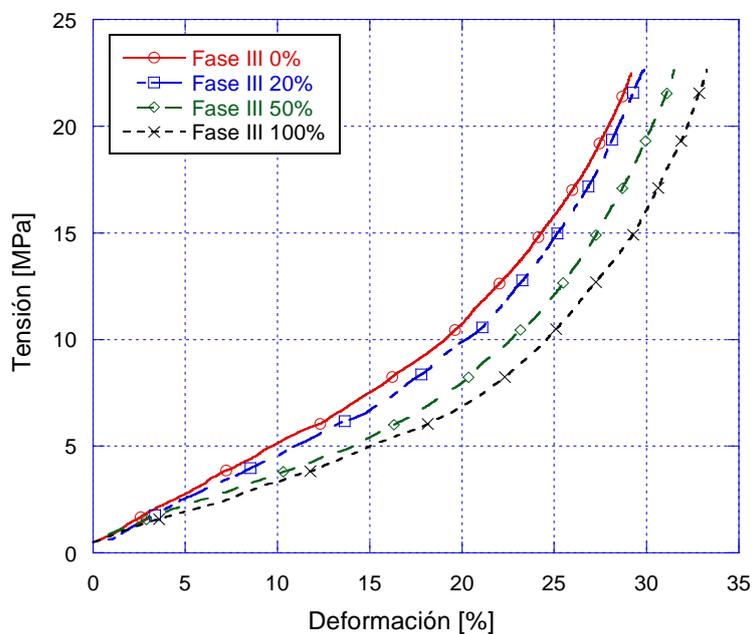


Fig. 130. Curvas tensión-deformación del esqueleto confinado de áridos naturales, reciclado y mezclas de la Fase III para la fracción 14/20.

3.3. DOSIFICACION Y CURADO DEL HORMIGÓN RECICLADO

Para la obtención de los resultados de caracterización del hormigón, previamente planteados, ha sido necesario elaborar un importante número de probetas. Se escogieron probetas cilíndricas normalizadas de 300 mm de altura por 150 mm de diámetro. Se utilizaron probetas normalizadas refrentadas con azufre puro para la determinación de las propiedades mecánicas, tercios de probeta para los ensayos de durabilidad y testigos (en las fases segunda y tercera) para los ensayos a fatiga.

Por otro lado, aprovechando la oportunidad que brinda la cercanía al mar de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, se han podido curar probetas, de todas las dosificaciones, en exposición a ambiente clase IIIa o ambiente marino. Para ello, se han fabricado probetas normalizadas para los ensayos mecánicos y de durabilidad que han sido sometidas a dos condiciones de curado distintas: por una parte, curado en cámara de humedad (condiciones óptimas de curado) y, por otra parte, en la terraza de la Escuela de Caminos de Santander (ambiente marino o IIIa).

3.3.1. Dosificaciones

Para la consecución de los trabajos de caracterización previstos sobre los hormigones, se practicó una toma selectiva de áridos, tanto naturales como reciclados, y se elaboraron las dosificaciones diseñadas con ellos para la fabricación del hormigón reciclado.

Las Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32 presentan las distintas dosificaciones obtenidas para la fabricación del hormigón reciclado y de control de las fases primera, segunda y tercera, respectivamente, correspondientes a los hormigones H-0,65 y H-0,50 (primera fase), H-0,65AS y H-0,50AS (segunda fase) y, finalmente los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS (tercera fase). Nótese que, los hormigones de la primera y segunda fases se dosificaron con las mismas relaciones de agua/cemento, mientras que las correspondientes a la tercera fase se ajustaron nuevamente atendiendo a las particularidades del árido y del método de fabricación. En un apartado posterior se presentarán los aditivos utilizados.

Tabla 30. Dosificaciones por m³ de los hormigones H-0,65 y H-0,50.

Relación w/c:		0,65				0,50			
Sustitución:	Ud.	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Cemento:	kg	275	275	275	275	380	380	380	380
Agua:	kg	179	179	179	179	190	190	190	190
Arena:	kg	843	878	849	868	714	744	710	715
Grava:	kg	752	565	350	0	882	665	414	0
Gravilla:	kg	226	170	105	0	122	92	57	0
Árido reciclado:	kg	0	184	455	830	0	189	471	874
Grava/Arena:		1,16	1,05	1,07	0,96	1,41	1,27	1,33	1,22

Tabla 31. Dosificaciones por m³ de los hormigones H-0,65AS y H-0,50AS.

Relación w/c:		0,65				0,50			
Sustitución:	Ud.	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Cemento:	kg	275	275	275	275	380	380	380	380
Agua:	kg	179	179	179	179	190	190	190	190
Arena:	kg	948	961	978	1010	806	813	822	836
Grava:	kg	513	378	209	0	702	522	290	0
Gravilla:	kg	490	362	199	0	330	245	136	0
Árido reciclado:	kg	0	185	408	640	0	192	427	683
Grava/Arena:		1,06	0,96	0,83	0,63	1,28	1,18	1,04	0,82

Tabla 32. Dosificaciones por m³ de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS.

Relación w/c:		0,55				0,45			
Sustitución:	Ud.	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Cemento:	kg	325	325	325	325	385	385	385	385
Agua:	kg	179	179	179	179	173	173	173	173
Arena:	kg	875	799	831	825	814	698	742	746
Grava:	kg	755	628	367	0	871	748	432	0
Gravilla:	kg	254	211	123	0	168	144	83	0
Árido reciclado:	kg	0	210	490	923	0	223	515	963
Grava/Arena:		1,15	1,31	1,18	1,12	1,28	1,60	1,39	1,29

Los hormigones H-0,65 y H-0,65AS, de las fases primera y segunda, se diseñaron de acuerdo a una relación agua/cemento teórica de 0,65 y cumpliendo las especificaciones del ambiente I de la Instrucción EHE-08, representativo de un hormigón para ambiente no agresivo. Los hormigones H-0,50 y H-0,50AS, de las mismas fases, se diseñaron con una relación agua/cemento teórica de 0,50 y cumpliendo las especificaciones para los ambientes IIIb y Qb, representativo de un hormigón para un ambiente de agresividad moderada.

En cuanto a los hormigones de la tercera fase, el H-0,55ARS se diseñó con una relación agua/cemento igual a 0,55 cumpliendo las especificaciones de los ambientes IIb, representativo de un hormigón para baja agresividad. Por su parte, el hormigón H-0,45ARS, con relación agua/cemento igual a 0,45, se diseñó cumpliendo las especificaciones del ambiente IIIc, representativo de un hormigón para un ambiente de elevada agresividad.

Las dosificaciones con distintos grados de sustitución, o grado de reciclaje, han partido de una dosificación patrón de control diseñada a partir del método de Fuller [146] en base a la distribución granulométrica y las relaciones w/c establecidas. Una vez diseñado el hormigón estructural de control, para un tamaño máximo de árido de 20 mm, el resto de dosificaciones, según el grado de reciclaje, se han establecido por sustitución de la fracción gruesa del árido natural por árido reciclado.

La granulometría de los áridos reciclados es adecuada para la sustitución de una parte de la gravilla 6/12 y una parte de la grava 12/20 manteniendo, para todos los grados de sustitución, la granulometría de conjunto invariante respecto de la del hormigón de control.

Todas las dosificaciones fueron diseñadas en el CEDEX (Laboratorio Central de Estructuras y Materiales) [147] para el proyecto de investigación RECNHOR-CLEAM [123].

3.3.2. Condiciones de curado en intemperie marina

Las Fig. 131 y Fig. 132 recogen gráficamente las condiciones ambientales de los años 2006 y 2007, respectivamente, registradas en el centro de Cueto/Santander de la Agencia Estatal de Meteorología.

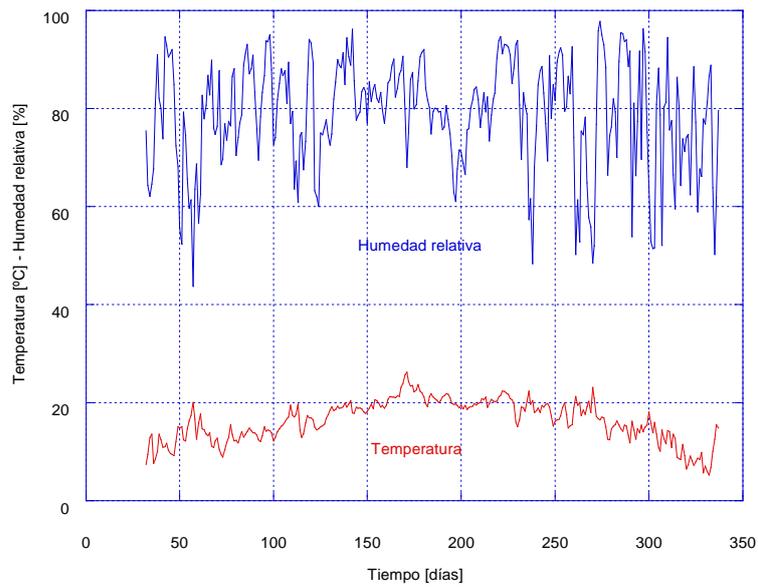


Fig. 131. Condiciones climáticas en Santander en el año 2006.

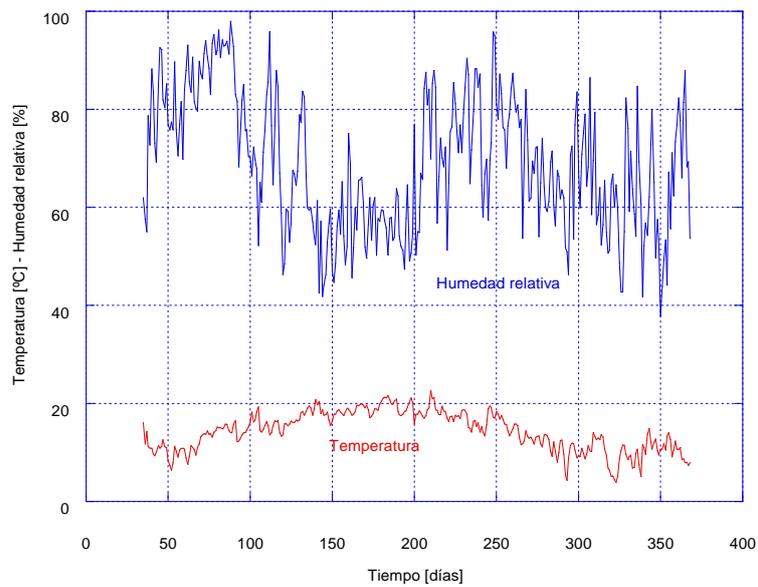


Fig. 132. Condiciones climáticas en Santander en el año 2007.

De igual forma, las Fig. 133 y Fig. 134 representan gráficamente las condiciones ambientales de los años 2008 y 2009, respectivamente.

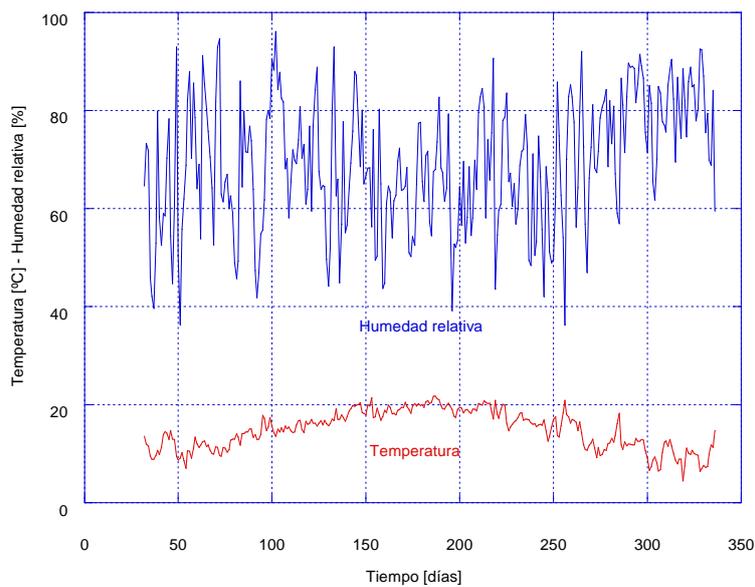


Fig. 133. Condiciones climáticas en Santander en el año 2008.

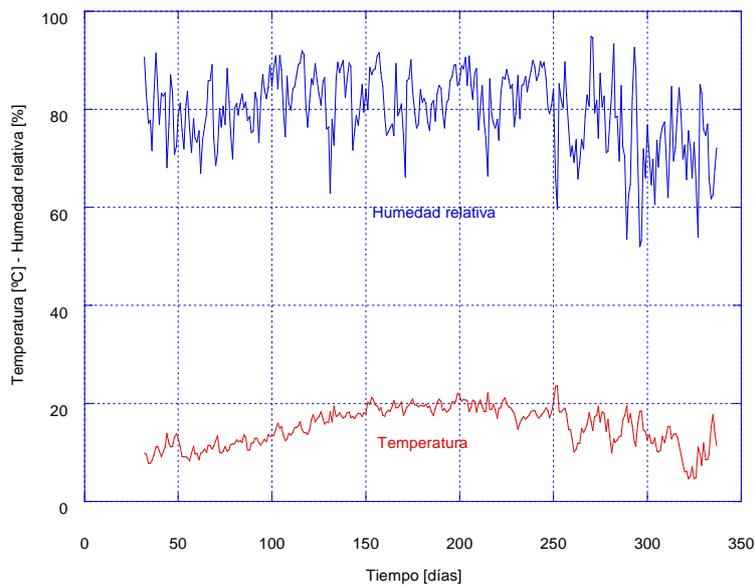


Fig. 134. Condiciones climáticas en Santander en el año 2009.

En la Tabla 33, se presentan los valores medios de las variables temperatura y humedad durante los periodos de curado de las probetas expuestas a la intemperie de la ciudad de Santander.

Tabla 33. Condiciones medias de curado de los hormigones expuestos a la intemperie (ambiente IIIa o marino).

CONDICIONES DE CURADO EN INTEMPERIE									
FASE	CLASE	Fabricación	28 días		180 días		365 días		
			Temperatura [°C]	Humedad [%]	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Temperatura [°C]	Humedad [%]	
I	H-0,65	Mayo 2006	16,8	81,3	18,2	80,1	16,3	78,7	
	H-0,50	Agosto 2006	19,9	79,2	15,3	77,3	16,1	78,9	
II	H-0,65AS	Febrero 2008	10,5	58,7	16,1	70,4	14,8	69,1	
	H-0,50AS	Marzo 2008	11,7	65,8	16,6	70,1	15,1	70,4	
III	H-0,55ARS	Marzo 2009	11,9	78,8	15,8	81,8	15,2	79,6	
	H-0,45ARS	Abril 2009	12,9	81,9	16,7	81,9	15,8	78,7	

3.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

3.4.1. Temperatura

En la Tabla 34, se presentan las temperaturas medias obtenidas en las distintas amasadas correspondientes a cada grado de sustitución y relación agua/cemento de la primera fase. Recuérdese que la temperatura inicial es la registrada a los 3 minutos de amasado y la final es la registrada a la finalización de la amasada, es decir, a los 8 minutos desde el inicio del amasado.

Tabla 34. Valores medios de la temperatura del hormigón en estado fresco de la Fase I.

Temperatura del hormigón en estado fresco – Fase I								
Hormigón:	H-0,65				H-0,50			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Temperatura inicial [°C]	18,9	16,8	18,3	17,9	17,6	18,0	20,1	19,9
Temperatura final [°C]	19,1	17,3	19,7	19,7	18,3	18,7	21,4	22,2

La Tabla 35 recoge los resultados de registro de temperaturas de los hormigones frescos de la segunda fase del proyecto.

Tabla 35. Valores medios de la temperatura del hormigón en estado fresco de la Fase II.

Temperatura del hormigón en estado fresco – Fase II								
Hormigón:	H-0,65AS				H-0,50AS			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Temperatura inicial [°C]	12,7	12,8	14,2	14,6	15,4	15,6	15,5	13,9
Temperatura final [°C]	13,1	13,1	14,6	14,9	15,7	16,1	16,0	14,3

En la Tabla 36 se recogen los resultados de registro de temperaturas realizados durante el amasado de la tercera fase del proyecto. Tales registros, en todos los casos, se practicaron tal y como se describe en la metodología descrita anteriormente.

Tabla 36. Valores medios de la temperatura del hormigón en estado fresco de la Fase III.

Temperatura del hormigón en estado fresco – Fase III								
Hormigón:	H-0,55ARS				H-0,45ARS			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Temperatura inicial [°C]	16,1	15,8	17,6	18,0	17,5	17,6	17,5	19,1
Temperatura final [°C]	16,7	16,4	18,1	18,7	18,3	18,3	18,1	19,7

Paralelamente, con estos resultados se comprueba cómo afecta la temperatura ambiente a la temperatura del hormigón en masa. Los hormigones de la primera fase fueron fabricados entre los meses de mayo y agosto del año 2006. En el caso del hormigón H-0,65, la temperatura ambiental media durante el amasado fue de 16,8 °C y la temperatura media del hormigón fresco de 18,9 °C. En el caso del H-0,50, la temperatura ambiente fue de casi 20 °C y la temperatura del hormigón 20,1 °C, con máximos, en el caso del H-0,50 y 100% de sustitución, de 22,2 °C.

Por su parte, los hormigones de la segunda y tercera de las fases se fabricaron en meses más fríos. En el caso de los H-0,65AS y H-0,50AS, correspondientes a la segunda fase, la temperatura ambiente osciló entre los 10 y 11 °C. Bajo estas condiciones, la temperatura máxima que pudo alcanzar el hormigón en masa fue de unos 15 °C. En el caso de la tercera fase, las temperaturas ambientales fueron aproximadamente 1 °C superiores a las de la segunda fase. Este aumento de temperatura unido, igualmente, al aumento en la cantidad de cemento arrojó valores de la temperatura del hormigón en estado fresco de entre 17 y 19 °C.

3.4.2. Consistencia del hormigón en masa

La Tabla 37 recoge los resultados de la caracterización del hormigón en masa en cuanto a su consistencia. Además, se ha incluido el porcentaje de aditivo superplastificante Sikament®-500 HE [148], en relación a la cantidad de cemento, que ha sido añadido con el propósito de mantener la misma consistencia en todos los casos.

Tabla 37. Valores medios de la consistencia del hormigón en estado fresco de la Fase I.

Propiedades del hormigón en estado fresco – Fase I								
Hormigón:	H-0,65				H-0,50			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Superplastificante [%]:	0,7	1,0	2,0	2,0	0,7	0,7	0,7	1,5
Asiento del Cono [cm]:	17	21	16	15	16	18	15	14

En la Tabla 38 se presentan los resultados medios derivados de la caracterización del hormigón fresco de la segunda fase del proyecto.

Tabla 38. Valores medios de la consistencia del hormigón en estado fresco de la Fase II.

Propiedades del hormigón en estado fresco – Fase II								
Hormigón:	H-0,65AS				H-0,50AS			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Superplastificante [%]:	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Asiento del Cono [cm]:	15	18	17	17	20	19	18	21

En el caso de la segunda fase, dada la nueva metodología de fabricación, la cantidad de aditivo superplastificante se ha mantenido constante para todos los distintos grados de sustitución.

Por último, la Tabla 39 presenta los resultados obtenidos en cuanto a la consistencia de los hormigones reciclados H-0,55ARS y H-0,45ARS.

Tabla 39. Valores medios de la consistencia del hormigón en estado fresco de la Fase III.

Propiedades del hormigón en estado fresco – Fase III								
Hormigón:	H-0,55ARS				H-0,45ARS			
Grado de sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Superplastificante [%]:	1,0	0,7	0,7	0,5	1,0	0,7	0,7	0,5
Asiento del Cono [cm]:	16	15	17	18	18	17	17	19

3.5. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

Seguidamente se presentan los resultados relativos a las propiedades físicas del hormigón reciclado. Se mostrarán, por separado, los resultados obtenidos en cada una de las fases, para hormigones curados en cámara de humedad y curados en ambiente marino.

3.5.1. Densidad relativa

En primer lugar, se presentan los resultados relativos a la densidad relativa de los hormigones reciclados correspondientes a la primera fase de la investigación, Tabla 40 y Tabla 41.

Tabla 40. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa, H-0,65 (árido reciclado seco).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,65-0%:	2,39	2,38	2,40	2,40	2,41	2,41
H-0,65-20%:	2,37	2,36	2,39	2,38	2,40	2,39
H-0,65-50%:	2,39	2,37	2,39	2,38	2,38	2,37
H-0,65-100%:	2,35	2,34	2,34	2,36	2,38	2,37

Tabla 41. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa, H-0,50 (árido reciclado seco).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50-0%:	2,45	2,43	2,46	2,46	2,48	2,48
H-0,50-20%:	2,42	2,43	2,43	2,42	2,45	2,43
H-0,50-50%:	2,41	2,40	2,44	2,42	2,45	2,43
H-0,50-100%:	2,41	2,40	2,42	2,40	2,43	2,41

Las Tabla 42 y Tabla 43 recogen los resultados obtenidos en cuanto a la densidad relativa de los hormigones, con árido grueso saturado, de la segunda fase.

Tabla 42. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa para el hormigón H-0,65AS (árido grueso saturado).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65AS-0%:	2,33	2,32	2,37	2,35	2,38	2,36
H-0,65AS-20%:	2,31	2,29	2,33	2,32	2,35	2,34
H-0,65AS-50%:	2,29	2,28	2,33	2,31	2,34	2,33
H-0,65AS-100%:	2,25	2,22	2,28	2,26	2,30	2,29

Tabla 43. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa para el hormigón H-0,50AS (árido grueso saturado).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50AS-0%:	2,40	2,38	2,40	2,39	2,43	2,41
H-0,50AS-20%:	2,38	2,34	2,39	2,39	2,41	2,41
H-0,50AS-50%:	2,35	2,35	2,39	2,39	2,40	2,39
H-0,50AS-100%:	2,32	2,30	2,34	2,33	2,37	2,35

A continuación, se presentan los resultados de densidad relativa de los hormigones reciclados de la tercera fase, Tabla 44 y Tabla 45.

Tabla 44. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa para el hormigón H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,55ARS-0%:	2,40	2,37	2,43	2,43	2,43	2,42
H-0,55ARS-20%:	2,40	2,34	2,40	2,39	2,42	2,40
H-0,55ARS-50%:	2,32	2,30	2,35	2,34	2,40	2,37
H-0,55ARS-100%:	2,31	2,29	2,32	2,31	2,34	2,32

Tabla 45. Resultados del ensayo de determinación de la densidad relativa para el hormigón H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Densidad relativa [g/cm ³] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,45ARS-0%:	2,46	2,45	2,48	2,47	2,49	2,48
H-0,45ARS-20%:	2,42	2,40	2,45	2,46	2,46	2,45
H-0,45ARS-50%:	2,38	2,36	2,39	2,38	2,40	2,39
H-0,45ARS-100%:	2,33	2,30	2,37	2,38	2,39	2,37

3.5.2. Coeficiente de absorción

Dentro de lo concerniente a las propiedades físicas de los hormigones reciclados, en segundo lugar, se presentan los resultados relativos al coeficiente de absorción de los mismos. Se recogen en las Tabla 46 y Tabla 47 los resultados correspondientes a la primera fase.

Como se ha comentado reiteradamente, en la primera de las fases el árido reciclado se ha incorporado al hormigón en las condiciones de humedad y temperatura del laboratorio. Por el contrario, debido a la gran absorción observada en los áridos reciclados, en las sucesivas fases el árido se incorpora saturado, el árido grueso en su totalidad, en el caso de la segunda fase, y exclusivamente el árido reciclado, en la tercera fase.

Tabla 46. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,65 (árido reciclado seco).

Coeficiente de absorción [% en peso] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65-0%:	5,96	6,45	5,30	5,69	5,09	5,46
H-0,65-20%:	5,79	5,93	5,46	5,71	5,25	5,53
H-0,65-50%:	5,50	5,70	5,13	5,33	4,80	5,09
H-0,65-100%:	5,28	6,15	4,97	5,38	4,85	5,23

Tabla 47. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,50 (árido reciclado seco).

Coeficiente de absorción [% en peso] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50-0%:	4,70	5,19	4,36	4,66	4,05	4,16
H-0,50-20%:	5,17	5,40	4,65	5,02	3,98	4,22
H-0,50-50%:	4,94	5,15	4,22	4,73	4,08	4,38
H-0,50-100%:	5,14	5,52	4,34	4,74	4,17	4,49

Las Tabla 48 y Tabla 49 recogen los resultados obtenidos en cuanto al coeficiente de absorción de los hormigones, con árido grueso saturado, de la segunda fase.

Tabla 48. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Coeficiente de absorción [% en peso] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,65AS-0%:	6,33	6,83	5,70	6,10	5,75	5,97
H-0,65AS-20%:	7,63	7,54	6,87	6,87	6,31	6,71
H-0,65AS-50%:	8,05	8,16	7,70	8,04	7,18	7,60
H-0,65AS-100%:	9,33	9,39	8,40	8,84	8,06	8,74

Tabla 49. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Coeficiente de absorción [% en peso] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50AS-0%:	4,79	5,59	4,53	4,87	4,33	4,52
H-0,50AS-20%:	5,27	5,96	4,81	5,21	4,77	4,69
H-0,50AS-50%:	6,44	6,93	5,86	5,96	5,56	5,89
H-0,50AS-100%:	6,87	7,36	6,05	6,27	5,34	5,57

Téngase en cuenta que la absorción presentada, dada su definición, está muy influenciada por la densidad de la muestra. Si se comparan dos muestras que retienen la misma cantidad de agua y, por el contrario, poseen pesos específicos diferentes, el peso del agua absorbida representará un porcentaje menor frente al peso de la muestra que sea más densa, siendo por ello el coeficiente de absorción mayor si la muestra es poco densa.

A continuación, se presentan los resultados del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados fabricados en la fase tercera con saturación del árido reciclado, Tabla 50 y Tabla 51.

Tabla 50. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Coeficiente de absorción [% en volumen] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,55ARS-0%:	5,56	5,65	4,76	5,35	4,36	5,21
H-0,55ARS-20%:	5,94	6,47	5,48	6,34	5,15	5,64
H-0,55ARS-50%:	6,96	7,48	6,60	7,42	5,78	6,60
H-0,55ARS-100%:	8,01	8,41	7,26	7,83	6,69	7,41

Tabla 51. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de absorción para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Coeficiente de absorción [% en volumen] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,45ARS-0%:	4,57	4,62	4,16	4,40	3,87	4,36
H-0,45ARS-20%:	4,78	4,69	4,27	4,99	3,89	4,38
H-0,45ARS-50%:	5,67	6,21	5,36	5,57	4,46	5,59
H-0,45ARS-100%:	6,69	6,81	6,27	6,44	5,67	6,07

3.5.3. Porosidad accesible

Siguiendo en el apartado correspondiente a las propiedades físicas del hormigón reciclado, una de las más importantes, en relación a las derivaciones que implica sobre la durabilidad, es la porosidad abierta. Los resultados correspondientes a la primera fase se presentan en las Tabla 52 y Tabla 53, las cuales recogen aquéllos relativos a la determinación de la porosidad accesible de los hormigones reciclados H-0,65 y H-0,50.

Tabla 52. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,65 (árido reciclado seco).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65-0%:	14,2	15,3	12,7	13,7	12,3	13,2
H-0,65-20%:	13,7	14,0	13,0	13,6	12,6	13,2
H-0,65-50%:	13,1	13,5	12,3	12,7	11,4	12,1
H-0,65-100%:	12,4	14,4	11,6	12,7	11,5	12,4

Tabla 53. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,50 (árido reciclado seco).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50-0%:	11,5	12,6	10,7	11,5	10,0	10,3
H-0,50-20%:	12,5	13,1	11,3	12,1	9,7	10,2
H-0,50-50%:	11,9	12,4	10,3	11,4	10,0	10,7
H-0,50-100%:	12,3	13,2	10,5	11,4	10,1	10,8

En el caso de la porosidad, a diferencia del coeficiente de absorción, ésta permite establecer comparativas entre hormigones de distintas densidades ya que no entra en juego el peso de la muestra sino su volumen, el cual se relaciona con el volumen de los poros para obtener la porosidad.

Las Tabla 54 y Tabla 55 recogen los resultados obtenidos en cuanto a la porosidad accesible de los hormigones, con árido grueso saturado, de la segunda fase.

Tabla 54. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65AS-0%:	14,8	15,9	13,5	14,3	13,7	14,1
H-0,65AS-20%:	17,6	17,3	16,0	15,9	14,8	15,7
H-0,65AS-50%:	18,4	18,6	17,9	18,5	16,8	17,7
H-0,65AS-100%:	21,0	20,8	19,2	20,0	18,5	20,0

Tabla 55. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50AS-0%:	11,5	13,3	10,9	11,6	10,5	10,9
H-0,50AS-20%:	12,5	14,0	11,5	12,4	11,5	11,3
H-0,50AS-50%:	15,1	16,3	14,0	14,2	13,4	14,1
H-0,50AS-100%:	16,0	16,9	14,2	14,6	12,6	13,1

Por último, se presentan los resultados de porosidad accesible de los hormigones reciclados fabricados con saturación del árido reciclado, Tabla 56 y Tabla 57, correspondientes a la tercera fase.

Tabla 56. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,55ARS-0%:	13,3	13,4	11,6	13,0	10,6	12,6
H-0,55ARS-20%:	14,3	15,1	13,1	15,1	12,5	13,5
H-0,55ARS-50%:	16,2	17,2	15,6	17,4	13,9	15,7
H-0,55ARS-100%:	18,5	19,2	16,9	18,1	15,7	17,1

Tabla 57. Resultados del ensayo de determinación de la porosidad accesible para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Porosidad accesible [% en volumen] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,45ARS-0%:	11,2	11,3	10,3	10,9	9,6	10,8
H-0,45ARS-20%:	11,6	11,3	10,5	12,2	9,6	10,7
H-0,45ARS-50%:	13,5	14,7	12,9	13,3	10,8	13,4
H-0,45ARS-100%:	15,5	15,7	14,8	15,3	13,5	14,4

3.5.4. Macroporosidad por análisis digital de imágenes

A continuación, se presentan los resultados más relevantes en relación con la macroporosidad de los hormigones reciclados de la primera fase.

3.5.4.1. Distribución de la macroporosidad en altura

Los resultados referentes al número de macroporos y a la macroporosidad de la muestra en distintas alturas se presentan, como valores promediados, en la Tabla 58, siendo S1 la sección más alta de todas.

Tabla 58. Distribución de la macroporosidad según la altura de la probeta, para las distintas secciones consideradas.

Macroporosidad en altura									
Hormigón		Número de macroporos				Macroporosidad [%]			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
H-0,65	0%	520	289	312	245	1,81	1,08	1,00	1,37
	20%	498	442	430	411	2,32	2,34	1,75	1,81
	50%	796	428	563	364	3,02	2,18	1,89	1,83
	100%	643	388	461	302	2,94	2,60	2,79	2,61
H-0,50	0%	97	36	51	84	0,44	0,49	0,40	0,39
	20%	99	340	237	236	1,51	1,39	1,21	0,89
	50%	335	632	435	423	2,38	2,24	2,16	1,67
	100%	348	410	432	354	2,47	2,04	1,87	1,58

3.5.4.2. Número de macroporos en función de la distancia

Los resultados obtenidos en cuanto a la distribución del número de poros en función de la distancia al centro de la probeta de los hormigones H-0,65 y H-0,50, correspondientes a la primera de las fases de la investigación, curados en ambiente normalizado y marino se presentan, por su gran volumen, en el Anejo IV.

Nótese que el número de poros registrado en función de la distancia está influenciado directamente por el diferencial de área circular que contiene los poros que son cuantificados. Es decir, cuanto mayor sea la distancia al centro o radio, mayor será

también el área de evaluación del círculo de análisis y, en consecuencia, mayor la probabilidad de encontrar en éste un mayor número de poros.

En lo referente a los resultados de hormigón de clase resistente H-0,50, también incluidos en el Anejo IV, se aprecia una relación inversa entre el número y el tamaño, permaneciendo, para cada dosificación, un valor de la macroporosidad aproximadamente constante.

3.5.4.3. Número de macroporos según su tamaño

Nuevamente, los resultados se han trasladado a al apartado de anejos, Anejo IV. Nótese que las escalas del eje de abcisas no son iguales ya que están ajustadas al valor máximo encontrado.

En esta ocasión, la observación de los resultados confirma la hipótesis antes realizada. La macroporosidad aumenta con el grado de sustitución y dentro de una misma dosificación, la densidad de macroporos se relaciona directamente con el número de ellos y su tamaño.

3.5.4.4. Tamaño de macroporos en función de la distancia

Los resultados relativos al tamaño de macroporos en función de la distancia de los hormigones pueden revisarse en el Anejo IV.

3.5.5. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

Como complemento a la caracterización física de los hormigones reciclados, se ha llevado a cabo un programa de determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos a través de muestras de hormigón con distintos grados de reciclaje.

Como punto de partida, tal y como se procedió en la determinación de la macroporosidad, se ha realizado un análisis de la evolución de la capacidad, de los hormigones reciclados para transmitir impulsos ultrasónicos en función de la altura de la probeta. Para ello, se han analizado muestras obtenidas en tres alturas diferentes, tal y como se procedió en el análisis de la macroporosidad.

Los resultados referentes a la velocidad de los impulsos ultrasónicos, para las tres alturas, como valores promediados, correspondientes a la primera fase del proyecto se presentan en la Tabla 59, siendo *M1* la muestra superior.

Tabla 59. Propagación de impulsos ultrasónicos, Fase I.

Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos según la altura [km/s]					
Hormigón		M1	M2	M3	Valor medio
H-0,65	0%	4,51	4,67	4,77	4,65
	20%	4,46	4,54	4,74	4,58
	50%	4,39	4,49	4,65	4,51
	100%	4,49	4,55	4,67	4,57
H-0,50	0%	4,66	4,79	4,83	4,76
	20%	4,63	4,76	4,83	4,74
	50%	4,54	4,66	4,72	4,64
	100%	4,41	4,45	4,52	4,46

La Tabla 60 presenta los valores de determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos, como en el caso anterior, para tres distintas muestras tomadas a diferentes alturas, de los dos hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación.

Tabla 60. Propagación de impulsos ultrasónicos, Fase II.

Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos según la altura [km/s]					
Hormigón		M1	M2	M3	Valor medio
H-0,65AS	0%	4,54	4,69	4,81	4,68
	20%	4,36	4,43	4,50	4,43
	50%	4,11	4,31	4,45	4,29
	100%	4,04	4,06	4,11	4,07
H-0,50AS	0%	4,62	4,77	4,77	4,72
	20%	4,51	4,48	4,69	4,56
	50%	4,38	4,46	4,45	4,43
	100%	4,25	4,30	4,32	4,29

Por último, la Tabla 61 recoge los resultados de propagación de impulsos ultrasónicos, también, en tres niveles de altura para los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS correspondientes a la tercera fase de la investigación.

Tabla 61. Propagación de impulsos ultrasónicos, Fase III.

Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos según la altura [km/s]					
Hormigón		M1	M2	M3	Valor medio
H-0,55ARS	0%	4,72	4,60	4,84	4,72
	20%	4,68	4,23	5,13	4,68
	50%	4,53	4,30	4,76	4,53
	100%	4,10	3,88	4,32	4,10
H-0,45ARS	0%	4,66	4,83	5,03	4,84
	20%	4,46	4,62	4,78	4,62
	50%	4,39	4,48	4,51	4,46
	100%	4,31	4,36	4,38	4,35

3.6. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO

Entre los ensayos considerados para la estimación de la durabilidad de los hormigones, se ha previsto, en primer lugar, determinar la profundidad y velocidad del frente de carbonatación de los hormigones reciclados expuestos a la influencia del CO_2 atmosférico en ambiente marino. En segundo lugar, se han valorado dos de los mecanismos de transporte de que disponen los agentes externos para la penetración en el seno del hormigón reciclado; por un lado, la permeabilidad a los gases y, por otro lado, a fluidos líquidos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las caracterizaciones.

3.6.1. Carbonatación por exposición a la intemperie

Las Fig. 135, Fig. 136, Fig. 137 y Fig. 138 recogen la apariencia de algunas de las muestras tras la rotura y aplicación de la fenolftaleína, para la valoración de la carbonatación de los hormigones H-0,65 y H-0,50 con un 50% y un 100% de incorporación de árido reciclado.



Fig. 135. Profundidad de carbonatación del H-0,65 50%.



Fig. 136. Profundidad de carbonatación del H-0,50 50%.



Fig. 137. Profundidad de carbonatación del H-0,65 100%.



Fig. 138. Profundidad de carbonatación del H-0,50 100%.

La Tabla 62 recoge los resultados de la medición del frente de carbonatación, expresados en milímetros, así como la velocidad de carbonatación, expresada en mm/día^{0,5}, debidas a la exposición a la intemperie.

Tabla 62. Carbonatación por exposición a intemperie marina de los hormigones de la Fase I.

Carbonatación en intemperie marina						
Hormigón			Máxima [mm]	Mínima [mm]	Valor medio [mm]	Velocidad de carbonatación [mm/día ^{0,5}]
H-0,65	Intemperie	0%	4,5	0,5	2,5	0,13
		20%	3,2	0,5	1,85	0,10
		50%	2,5	0,5	1,50	0,08
		100%	2,2	0,5	1,35	0,07
H-0,50	Intemperie	0%	3,8	0,5	2,15	0,11
		20%	2,7	0,5	1,60	0,08
		50%	2,2	0,5	1,35	0,07
		100%	2,1	0,5	1,30	0,07

3.6.2. Profundidad de penetración de agua bajo presión

En cuanto a los resultados obtenidos, las Tabla 63 y Tabla 64 recogen los valores medios de la profundidad máxima de penetración de agua bajo presión de los distintos hormigones de la primera de las fases.

Tabla 63. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,65 (árido reciclado seco).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65-0%:	43	51	36	38	33	35
H-0,65-20%:	41	43	35	36	33	35
H-0,65-50%:	37	39	32	37	31	32
H-0,65-100%:	35	37	32	35	30	34

Tabla 64. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,50 (árido reciclado seco).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50-0%:	35	39	34	35	31	33
H-0,50-20%:	29	36	28	30	25	27
H-0,50-50%:	31	40	28	34	28	32
H-0,50-100%:	34	39	30	30	31	30

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, las Tabla 65 y Tabla 66, recogen los resultados obtenidos.

Tabla 65. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65AS-0%:	42	46	35	40	33	37
H-0,65AS-20%:	53	57	40	45	38	43
H-0,65AS-50%:	59	62	47	51	45	49
H-0,65AS-100%:	67	71	55	60	52	58

Tabla 66. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50AS-0%:	35	41	32	32	31	34
H-0,50AS-20%:	49	54	41	44	39	43
H-0,50AS-50%:	47	53	40	43	39	41
H-0,50AS-100%:	59	63	47	55	45	52

En lo referente a los resultados de penetración de agua de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS, correspondientes a la tercera fase del proyecto, las Tabla 67 y Tabla 68 recogen los resultados, como en otros análisis, de la evolución temporal (tres edades) de tres grados de sustitución de árido natural por árido reciclado en dos tipos de hormigones con relaciones agua/cemento teóricas de 0,55 y 0,45.

Tabla 67. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,55ARS-0%:	40	44	34	35	32	34
H-0,55ARS-20%:	53	57	43	47	41	45
H-0,55ARS-50%:	53	57	43	46	41	43
H-0,55ARS-100%:	63	65	49	57	47	55

Tabla 68. Resultados del ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Penetración de agua bajo presión [mm] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,45ARS-0%:	30	37	30	30	29	30
H-0,45ARS-20%:	43	48	37	40	36	37
H-0,45ARS-50%:	42	45	36	36	34	36
H-0,45ARS-100%:	53	59	44	53	43	46

3.6.3. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno

En cuanto a los resultados obtenidos, las Tabla 69 y Tabla 70 recogen los valores del coeficiente de permeabilidad al oxígeno de los distintos hormigones de la primera de las fases. En este caso, como en los anteriormente presentados, el capítulo Metodología Experimental describe en detalle la sistemática seguida y las técnicas utilizadas para la obtención de estos resultados.

Tabla 69. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,65 (árido reciclado seco).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa
H-0,65-0%:	4,94E-17	5,44E-17	2,54E-17	3,82E-17	2,73E-17	2,85E-17
H-0,65-20%:	4,83E-17	6,56E-17	3,63E-17	5,06E-17	2,60E-17	3,82E-17
H-0,65-50%:	4,69E-17	5,13E-17	3,03E-17	4,36E-17	3,15E-17	3,49E-17
H-0,65-100%:	3,82E-17	4,35E-17	3,05E-17	3,54E-17	2,49E-17	3,04E-17

Tabla 70. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,50 (árido reciclado seco).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa
H-0,50-0%:	3,08E-17	3,78E-17	1,97E-17	2,01E-17	2,24E-17	1,63E-17
H-0,50-20%:	3,14E-17	3,56E-17	1,46E-17	1,82E-17	1,38E-17	1,60E-17
H-0,50-50%:	2,97E-17	2,93E-17	1,77E-17	2,00E-17	1,60E-17	1,70E-17
H-0,50-100%:	2,84E-17	4,39E-17	1,60E-17	1,69E-17	1,15E-17	1,52E-17

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, las Tabla 71 y Tabla 72 recogen los resultados obtenidos.

Tabla 71. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa	Norm.	IIIa
H-0,65AS-0%:	5,95E-17	6,28E-17	5,35E-17	6,06E-17	4,97E-17	4,75E-17
H-0,65AS-20%:	7,39E-17	8,22E-17	5,99E-17	7,06E-17	6,30E-17	6,45E-17
H-0,65AS-50%:	7,48E-17	7,59E-17	7,67E-17	7,90E-17	7,11E-17	8,02E-17
H-0,65AS-100%:	9,29E-17	1,00E-16	8,43E-17	8,79E-17	7,86E-17	8,43E-17

Tabla 72. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIla	Norm.	IIla	Norm.	IIla
H-0,50AS-0%:	3,59E-17	4,07E-17	2,44E-17	2,66E-17	1,91E-17	2,42E-17
H-0,50AS-20%:	3,55E-17	4,89E-17	2,92E-17	3,10E-17	2,29E-17	2,64E-17
H-0,50AS-50%:	3,79E-17	4,15E-17	3,34E-17	3,60E-17	2,55E-17	2,91E-17
H-0,50AS-100%:	4,94E-17	5,07E-17	4,88E-17	5,18E-17	4,99E-17	5,62E-17

En cuanto a los resultados de permeabilidad al oxígeno de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS, correspondientes a la tercera fase del proyecto, las Tabla 73 y Tabla 74 recogen los resultados obtenidos.

Tabla 73. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIla	Norm.	IIla	Norm.	IIla
H-0,55ARS-0%:	2,96E-17	3,90E-17	1,51E-17	1,81E-17	1,28E-17	1,55E-17
H-0,55ARS-20%:	3,40E-17	4,84E-17	2,14E-17	2,46E-17	1,71E-17	1,82E-17
H-0,55ARS-50%:	5,47E-17	6,28E-17	3,30E-17	3,71E-17	3,81E-17	5,16E-17
H-0,55ARS-100%:	7,95E-17	8,33E-17	7,05E-17	7,29E-17	6,18E-17	6,64E-17

Tabla 74. Resultados del ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Coeficiente de permeabilidad al oxígeno [m ²] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente:	Norm.	IIla	Norm.	IIla	Norm.	IIla
H-0,45ARS-0%:	1,99E-17	2,04E-17	8,93E-18	1,49E-17	6,58E-18	1,12E-17
H-0,45ARS-20%:	2,49E-17	3,26E-17	1,22E-17	1,73E-17	1,05E-17	1,48E-17
H-0,45ARS-50%:	3,49E-17	3,81E-17	2,38E-17	2,86E-17	1,99E-17	2,52E-17
H-0,45ARS-100%:	5,35E-17	5,72E-17	4,37E-17	5,21E-17	3,27E-17	5,13E-17

3.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

Dentro del apartado de propiedades mecánicas se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad de los hormigones reciclados de aplicación estructural considerados en cada caso. Así, las tres primeras propiedades se han comprobado para todas las dosificaciones y ambientes de curado (cámara e intemperie marina) y edades.

3.7.1. Resistencia a compresión uniaxial

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la resistencia frente a esfuerzos de compresión uniaxial de los hormigones elaborados a partir de las dosificaciones propuestas. Se muestran los resultados obtenidos a tres edades distintas, 28, 180 y 365 días, de los hormigones curados en cámara de humedad e intemperie marina, clasificados según su grado de sustitución.

Las Tabla 75 y Tabla 76 recogen los resultados promediados de resistencia a compresión de los hormigones H-0,65 y H-0,50, para los tres grados de sustitución, tres edades y dos ambientes de curado, correspondientes a la primera fase.

Tabla 75. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,65 (árido reciclado seco).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65-0%:	37,6	36,7	44,8	43,7	47,8	47,2
H-0,65-20%:	41,2	43,1	45,5	47,6	49,3	48,3
H-0,65-50%:	42,5	40,5	46,2	50,5	47,5	45,2
H-0,65-100%:	44,9	42,9	52,1	50,2	53,7	49,6

Tabla 76. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,50 (árido reciclado seco).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50-0%:	51,3	47,1	59,2	57,0	62,0	59,7
H-0,50-20%:	50,3	57,2	62,5	56,6	64,8	61,8
H-0,50-50%:	54,3	55,0	63,3	60,5	63,5	60,5
H-0,50-100%:	55,6	55,1	63,1	62,0	65,1	62,9

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, las Tabla 77 y Tabla 78 recogen los resultados obtenidos.

Tabla 77. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,65AS-0%:	36,1	34,1	38,2	37,9	45,7	42,4
H-0,65AS-20%:	32,4	32,2	35,2	33,2	41,9	36,3
H-0,65AS-50%:	30,7	29,5	34,4	31,5	37,4	32,4
H-0,65AS-100%:	29,7	28,9	32,0	28,8	30,6	28,3

Tabla 78. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50AS-0%:	45,0	44,2	50,3	48,8	57,3	54,3
H-0,50AS-20%:	43,3	42,3	49,6	47,1	54,9	52,8
H-0,50AS-50%:	40,6	37,3	49,0	41,3	51,5	49,0
H-0,50AS-100%:	40,9	32,6	43,8	36,5	50,3	47,5

En lo referente a los resultados de resistencia a compresión de los hormigones H-0,55ARS, correspondientes a la tercera fase, la Tabla 79 recoge los resultados, como en otros análisis, de la evolución temporal (tres edades) de tres grados de sustitución de árido natural por árido reciclado en dos ambientes distintos de curado.

Tabla 79. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,55ARS-0%:	47,2	41,9	52,3	49,2	60,1	55,9
H-0,55ARS-20%:	43,4	38,7	50,6	41,1	56,5	54,8
H-0,55ARS-50%:	40,5	34,8	41,0	37,4	48,9	41,2
H-0,55ARS-100%:	32,9	30,6	36,7	32,6	43,1	40,5

Finalmente, la resistencia a compresión de los hormigones H-0,45ARS, correspondientes también a la tercera fase, se recogen en la Tabla 80, nuevamente, distribuidos según la evolución temporal de tres grados de sustitución de árido natural por árido reciclado en dos ambientes de curado.

Tabla 80. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a compresión para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Resistencia a compresión [MPa] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,45ARS-0%:	58,0	51,8	64,4	59,9	72,9	67,3
H-0,45ARS-20%:	52,9	46,4	60,1	53,2	67,4	60,0
H-0,45ARS-50%:	44,9	44,9	50,1	47,2	61,2	58,4
H-0,45ARS-100%:	40,1	35,9	43,2	39,5	53,7	51,2

En el capítulo Análisis de Resultados, se analizará la relación agua/cemento efectiva a fin de poder establecer comparativas entre todos los hormigones, no solamente pertenecientes a una fase, con el mismo grado de sustitución.

3.7.2. Resistencia a tracción indirecta

Como complemento a la caracterización mecánica de los hormigones reciclados, se han llevado a cabo ensayos de determinación de la resistencia a tracción indirecta de los mismos.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a tracción por el método indirecto, o brasileño, de los hormigones reciclados con relación agua/cemento teórica 0,65 fabricados con incorporación de los áridos reciclados en condiciones de laboratorio, Tabla 81.

Tabla 81. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,65 (árido reciclado seco).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,65-0%:	2,73	2,40	3,75	3,00	3,95	3,25
H-0,65-20%:	2,79	2,51	3,71	3,28	4,05	3,46
H-0,65-50%:	3,33	2,85	4,45	3,50	4,72	3,69
H-0,65-100%:	3,53	3,24	4,55	3,75	4,91	3,95

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al hormigón H-0,50, Tabla 82.

Tabla 82. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,50 (árido reciclado seco).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase I						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,50-0%:	3,25	3,14	3,97	3,67	4,62	4,35
H-0,50-20%:	3,47	3,25	4,17	3,85	4,74	4,45
H-0,50-50%:	3,92	3,54	4,41	4,06	4,78	4,54
H-0,50-100%:	4,06	3,99	4,68	4,54	4,97	4,71

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, con relación agua/cemento teórica de 0,65 y elaborados con previa saturación de los árido gruesos, la Tabla 83 recoge los resultados obtenidos.

Tabla 83. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,65AS-0%:	2,58	2,34	2,60	2,38	2,71	2,59
H-0,65AS-20%:	2,44	2,19	2,45	2,34	2,51	2,38
H-0,65AS-50%:	2,38	2,10	2,32	2,12	2,43	2,28
H-0,65AS-100%:	2,21	1,92	2,27	2,05	2,31	2,15

Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los hormigones H-0,50 con árido grueso saturado, correspondientes a la segunda fase de la investigación, Tabla 84. En cuanto a los resultados de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS, correspondientes a la tercera fase, las Tabla 85 y Tabla 86 recogen los resultados, como en otros análisis, de la evolución temporal (tres edades) de tres grados de sustitución de árido natural por árido reciclado en dos ambientes de curado.

Tabla 84. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase II						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa	Normalizado	Illa
H-0,50AS-0%:	3,10	2,99	3,36	3,25	3,68	3,57
H-0,50AS-20%:	2,85	2,73	2,96	2,62	3,23	3,11
H-0,50AS-50%:	2,56	2,43	2,62	2,52	2,66	2,53
H-0,50AS-100%:	2,36	2,20	2,40	2,29	2,43	2,28

Tabla 85. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,55ARS-0%:	2,91	2,70	3,09	2,88	3,27	3,16
H-0,55ARS-20%:	2,70	2,45	2,73	2,64	2,88	2,76
H-0,55ARS-50%:	2,58	2,30	2,51	2,39	2,56	2,42
H-0,55ARS-100%:	2,30	2,00	2,32	2,21	2,37	2,21

Tabla 86. Resultados del ensayo de determinación de la resistencia a tracción indirecta para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Resistencia a tracción indirecta [MPa] - Fase III						
Edad:	28 días		180 días		365 días	
Ambiente de curado:	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa	Normalizado	IIIa
H-0,45ARS-0%:	3,40	3,32	3,78	3,69	4,10	3,99
H-0,45ARS-20%:	3,05	2,97	3,29	3,21	3,52	3,41
H-0,45ARS-50%:	2,70	2,58	2,82	2,71	2,90	2,80
H-0,45ARS-100%:	2,41	2,26	2,48	2,32	2,53	2,41

3.7.3. Módulo de elasticidad del hormigón reciclado

Como complemento a los ensayos de caracterización mecánica se han determinado los módulos de elasticidad de los respectivos hormigones.

El valor del módulo de elasticidad se expresa como el valor medio de entre 7 y 10 ensayos, en los que se ha cuantificado la pendiente de la curva tensión-deformación de los 5 primeros ciclos del ensayo a fatiga correspondiente.

La Tabla 87 recoge los resultados obtenidos.

Tabla 87. Módulo de elasticidad de los hormigones reciclados y de control.

Módulo de elasticidad [GPa]						
Sustitución [%]	Fase I		Fase II		Fase III	
	H-0,65	H-0,50	H-0,65AS	H-0,50AS	H-0,55ARS	H-0,45ARS
0%	34,2	37,4	34,9	34,9	36,3	38,7
20%	32,3	36,1	32,2	33,8	35,5	35,9
50%	30,5	34,0	30,1	32,7	33,4	32,9
100%	30,1	31,4	26,8	30,2	31,5	28,4

3.8. COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL HORMIGÓN RECICLADO

A continuación, se presentan los resultados relativos al comportamiento a fatiga de los hormigones reciclados de las distintas fases. Debido a la duración de cada uno de los ensayos de caracterización a fatiga, se han testado aquellos hormigones curados en cámara de humedad y ensayados con una edad de 365 días todas las dosificaciones, de las tres fases.

3.8.1. Método STAIRCASE

A continuación, se recogen los resultados referentes al comportamiento bajo cargas cíclicas, método STAIRCASE, para las distintas dosificaciones de las tres fases de la investigación. En este caso, se hace necesario, debido al excesivo volumen de datos, representar solamente los registros de deformación de dos distintos ensayos STAIRCASE representativos del resto. La totalidad de gráficos se incluye en el Anejo VI. Así, la Fig. 139 recoge en registro de deformación frente al número de ciclos de un ensayo en el que la probeta presenta *vida infinita* para el intervalo de tensiones máxima y mínima correspondientes.

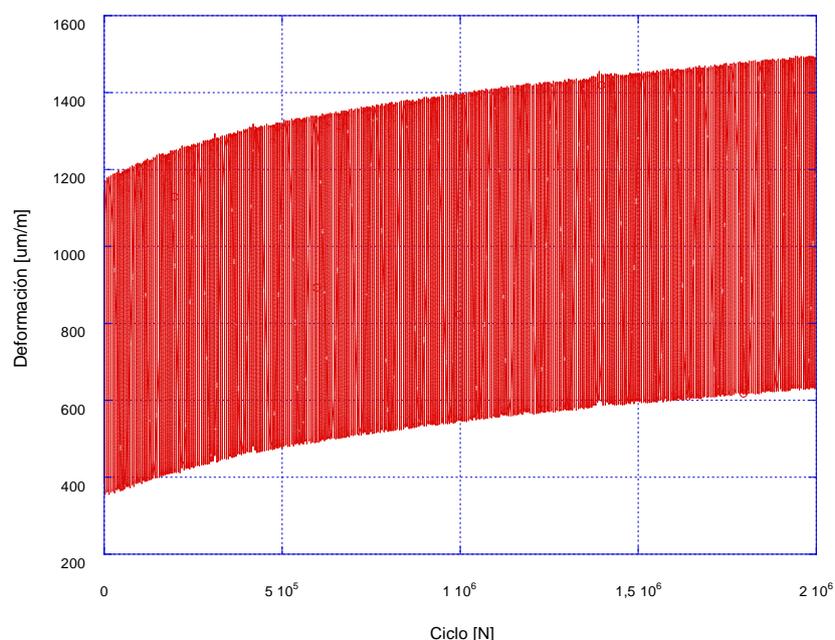


Fig. 139. Ensayo STAIRCASE sobre una probeta que presenta vida infinita (supera los $2 \cdot 10^6$ ciclos).

Es decir, la probeta ha superado los $2 \cdot 10^6$ ciclos establecidos como vida infinita del hormigón para los niveles tensionales correspondientes.

La Fig. 140 representa el registro de deformación de un ensayo, entre dos niveles tensionales constantes, en el que la probeta colapsa por acumulación de fallos antes de cumplir el número de ciclos estipulado como *vida infinita*.

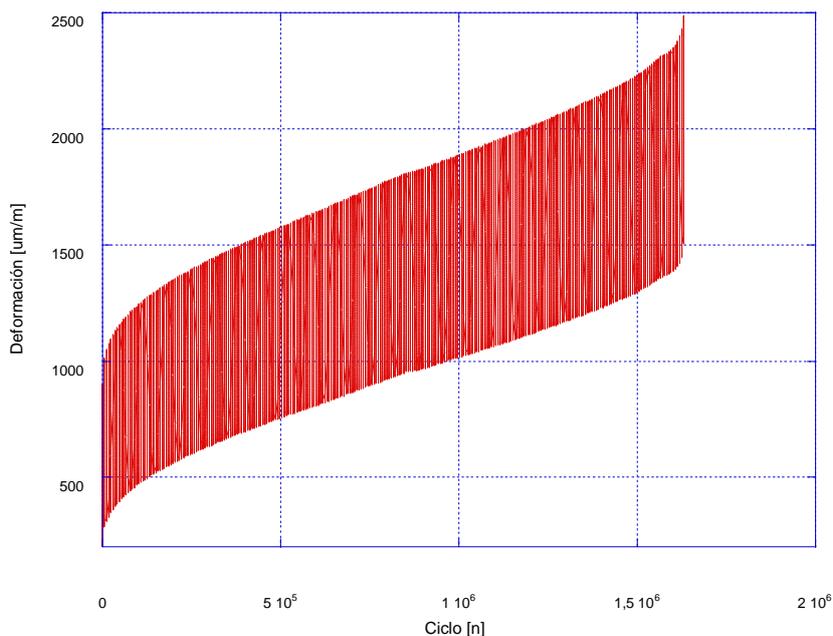


Fig. 140. Registro de deformación de un ensayo en el que la probeta colapsa antes del alcanzar dos millones de ciclos.

Así, las Fig. 139 y Fig. 140 son representativas de todos aquéllos ensayos en los que la probeta, por un lado, supera el criterio de *vida infinita* establecido y, por el otro, no lo supera. No obstante, distintos grados de incorporación de árido reciclado, distintas relaciones agua cemento y distintos niveles tensionales proporcionan deformaciones mayores o menores y curvas de evolución más o menos pronunciadas. Los resultados de cada uno de los ensayos, en forma de fichas, pueden consultarse en el Anejo VI de la Tesis.

Seguidamente se presentan, resumidos en tablas, los resultados del ensayo STAIRCASE para los distintos grados de incorporación de los hormigones reciclados de la primera fase, Tabla 88, Tabla 89, Tabla 90, Tabla 91, Tabla 92, Tabla 93, Tabla 94 y Tabla 95. Téngase en cuenta que, como se indicó en el capítulo de Metodología Experimental, “X” hace referencia a un ensayo en el que la probeta no es capaz de

alcanzar los dos millones de ciclos (*vida infinita*) y “O” a aquel ensayo en el que se supera el número de ciclos estipulado.

Tabla 88. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65-0%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40					X				
35				O		X			
30	X		O				X		
25		O							

Tabla 89. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65-20%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40							X		
35						O		X	
30			X		O				X
25		O		O					
20	O								

Tabla 90. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65-50%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35						X		X	
30			X		O		O		X
25		O		O					
20	O								

Tabla 91. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65-100%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35						X			
30	X				O		O		
25		X		O					
20			O						

Tabla 92. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50-0%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50							X		
45				X		O		O	
40	X		O		O				
35		O							

Tabla 93. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50-20%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40			X				X		
35		O		X		O		O	
30	O				O				

Tabla 94. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50-50%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40									O
35				X		X		O	
30	X		O		O		X		
25		O							

Tabla 95. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50-100%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40									O
35								O	
30	X				X		O		
25		X		O		O			
20			O						

Las Tabla 96, Tabla 97, Tabla 98, Tabla 99, Tabla 100, Tabla 101, Tabla 102 y Tabla 103 recogen, por su parte, los resultados del ensayo STAIRCASE para los distintos hormigones correspondientes a la segunda fase.

Tabla 96. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65AS-0%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35			X						
30		O		X		X		O	
25	O				O		O		

Tabla 97. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65AS-20%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35						X			
30	X				O		X		
25		X		O				O	
20			O						

Tabla 98. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65AS-50%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35	X								
30		X		X		X		X	
25			O		O		O		X

Tabla 99. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,65AS-100%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30					X				
25		X		O		X			
20	O		O				X		

Tabla 100. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50AS-0%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40			X						
35		O		X		O			
30	O				O				

Tabla 101. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50AS-20%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40					X				
35		X		O		X			
30	O		O				O		

Tabla 102. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50AS-50%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40							X		
35		X		X		O		O	
30	O		O		O				

Tabla 103. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,50AS-100%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30		X		X		X			
25	O		O		O		X		

Las Tabla 104, Tabla 105, Tabla 106, Tabla 107, Tabla 108, Tabla 109, Tabla 110 y Tabla 111 recogen los resultados del ensayo STAIRCASE para los distintos hormigones correspondientes a la tercera fase.

Tabla 104. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,55ARS-0%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45					X				
40				O		X			
35			O						
30		O							
25	O								

Tabla 105. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,55ARS-20%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40			X						
35		O		X		X		X	
30	O				O		O		O

Tabla 106. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,55ARS-50%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35	X		X						
30		O		X				X	
25					X		O		
20						O			

Tabla 107. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,55ARS-100%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35									O
30						X		O	
25	X				O		O		
20		X		O					
15			O						

Tabla 108. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,45ARS-0%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55	X								
50		X				X			
45			X		O		O		
40				O					

Tabla 109. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,45ARS-20%

Escalón	Test - Probeta								
Tensión [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45		X							
40	O		X		X		X		
35				O		O		O	

Tabla 110. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,45ARS-50%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40							X		
35				X		O		O	
30	X		O		O				
25		O							

Tabla 111. Resultados del ensayo STAIRCASE sobre el hormigón H-0,45ARS-100%

Escalón Tensión [MPa]	Test - Probeta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35						X			
30			X		O		X		
25		O		O				O	
20	O								

3.8.1.1. Límite a fatiga

Tras la realización de los cálculos correspondientes, según los resultados obtenidos, se presentan en las Tabla 112 y Tabla 113 los valores del límite a fatiga de los distintos hormigones de la primera fases. Estas Tablas incluyen una columna en la que se refleja el porcentaje que este límite supone con respecto a la resistencia a compresión.

Tabla 112. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,65 (árido reciclado seco).

Límite a fatiga – Fase I			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,65AS-0%:	32,5	1,2	68,0
H-0,65AS-20%:	31,3	1,4	63,4
H-0,65AS-50%:	29,2	3,4	61,5
H-0,65AS-100%:	27,5	4,1	51,2

Tabla 113. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,50 (árido reciclado seco).

Límite a fatiga – Fase I			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,50-0%:	42,5	0,4	68,6
H-0,50-20%:	35,8	2,2	55,3
H-0,50-50%:	30,0	1,6	47,3
H-0,50-100%:	27,5	4,6	42,3

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, Tabla 114 y Tabla 115, recogen los resultados obtenidos.

Tabla 114. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Límite a fatiga – Fase II			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,65AS-0%:	29,2	2,0	63,9
H-0,65AS-20%:	27,5	2,6	65,6
H-0,65AS-50%:	26,3	0,2	70,2
H-0,65AS-100%:	24,2	2,0	79,1

Tabla 115. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Límite a fatiga – Fase II			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,50AS-0%:	35,0	0,2	61,1
H-0,50AS-20%:	34,2	1,2	62,2
H-0,50AS-50%:	34,2	0,2	66,4
H-0,50AS-100%:	27,5	4,1	54,7

En cuanto a los resultados de límite a fatiga de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS, correspondientes a la tercera fase, las Tabla 116 y Tabla 117 recogen los resultados, como anteriormente, del límite a fatiga, su desviación y el porcentaje que representa éste frente a la resistencia a compresión.

Tabla 116. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,55AS (árido reciclado saturado).

Límite a fatiga – Fase III			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,55ARS-0%:	37,5	2,3	62,4
H-0,55ARS-20%:	33,5	2,3	59,3
H-0,55ARS-50%:	27,5	2,0	56,3
H-0,55ARS-100%:	26,3	0,2	60,9

Tabla 117. Resultados del ensayo de determinación del límite a fatiga para H-0,45AS (árido reciclado saturado).

Límite a fatiga – Fase III			
Dosificación	L_f [MPa]	Desviación [MPa]	% Rc [%]
H-0,45ARS-0%:	45,8	1,2	62,9
H-0,45ARS-20%:	38,8	1,6	57,5
H-0,45ARS-50%:	32,5	2,1	53,1
H-0,45ARS-100%:	29,2	2,4	54,3

3.8.1.2. Rigidez

A continuación, las Fig. 141 a Fig. 156 recogen las curvas de variación del módulo elástico frente al número de ciclos, de las dosificaciones ensayadas, de los hormigones H-0,65AS, H-0,50AS, H-0,55ARS y H-0,45ARS correspondientes a las fases segunda y tercera. En la primera de las fases no se realizó registro de deformación para los ensayos STAIRCASE.

Téngase en cuenta que en este apartado se ha definido Módulo Elástico Dinámico como el valor de la rigidez (cociente entre tensión y deformación) en los sucesivos puntos del ensayo a fatiga. No ha de confundirse con aquél módulo obtenido a partir de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos.

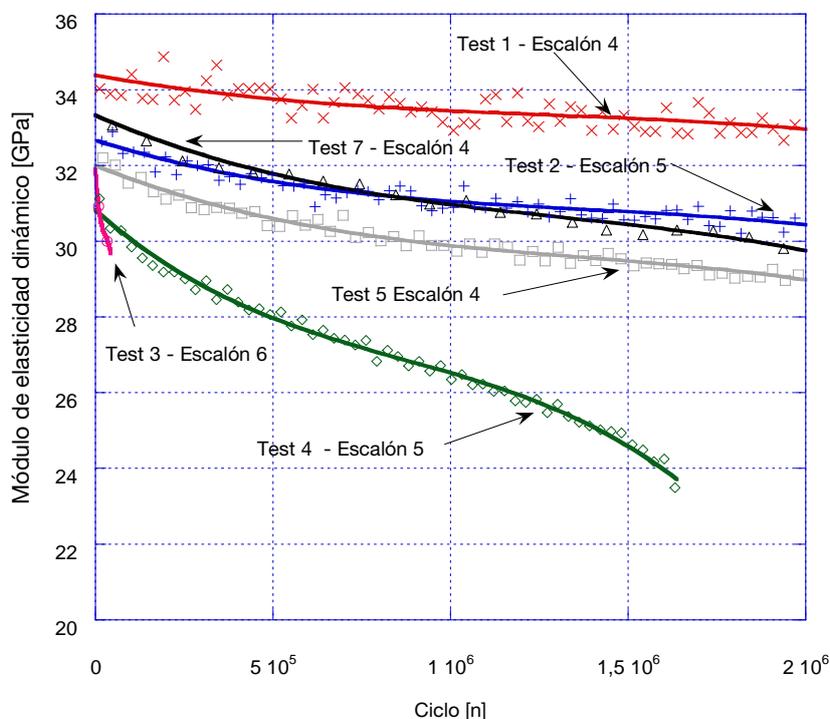


Fig. 141. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,65AS-0%.

Nótese que no se presentan las curvas de evolución de la rigidez de todos los ensayos realizados por falta de registro de deformaciones, principalmente, debido a fallos en las galgas y/o en la adquisición de los datos. Debe tenerse en cuenta que, tanto las galgas como las conexiones son de una extrema delicadeza.

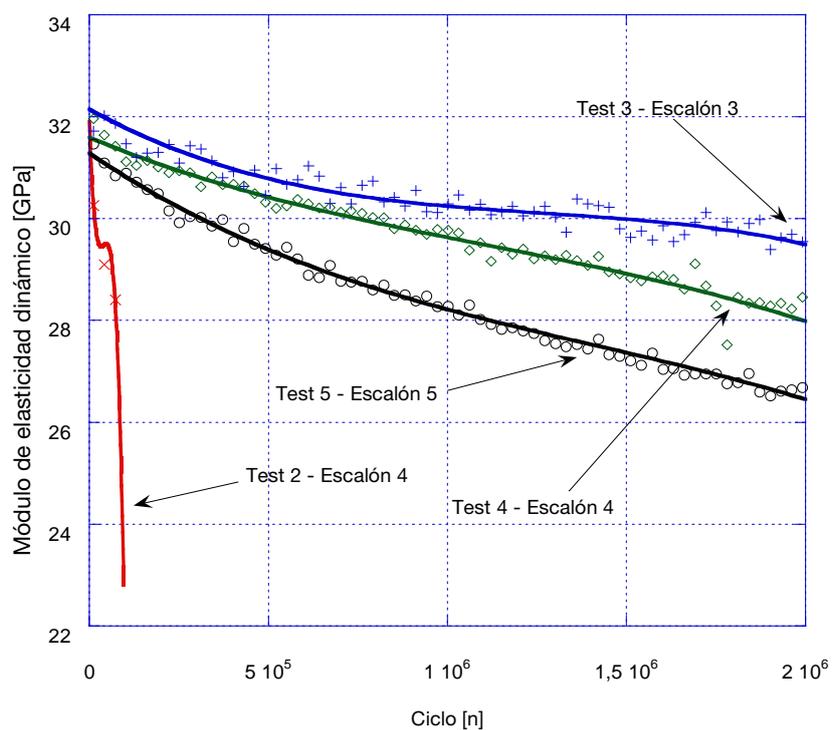


Fig. 142. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,65AS-20%.

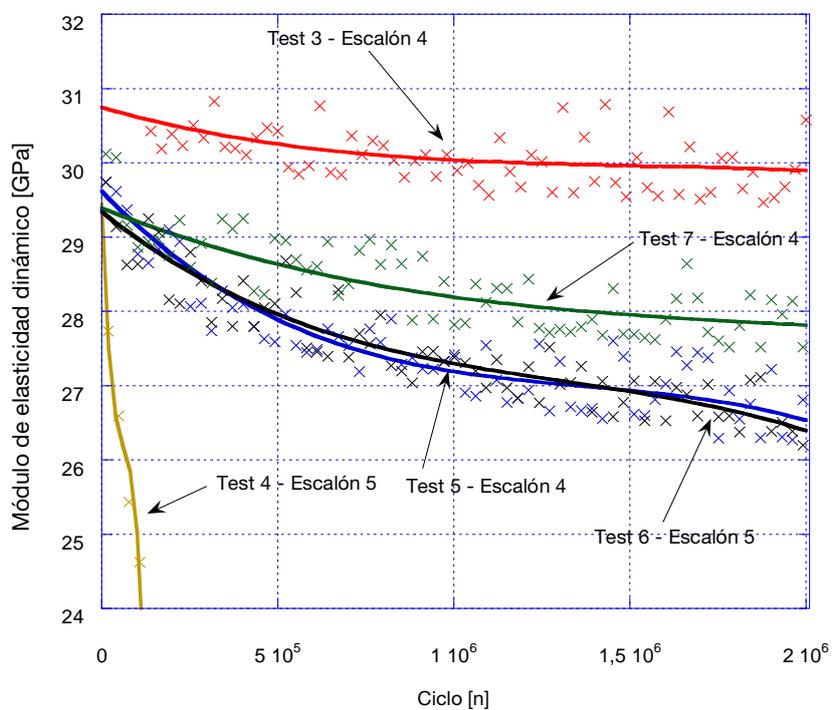


Fig. 143. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,65AS-50%.

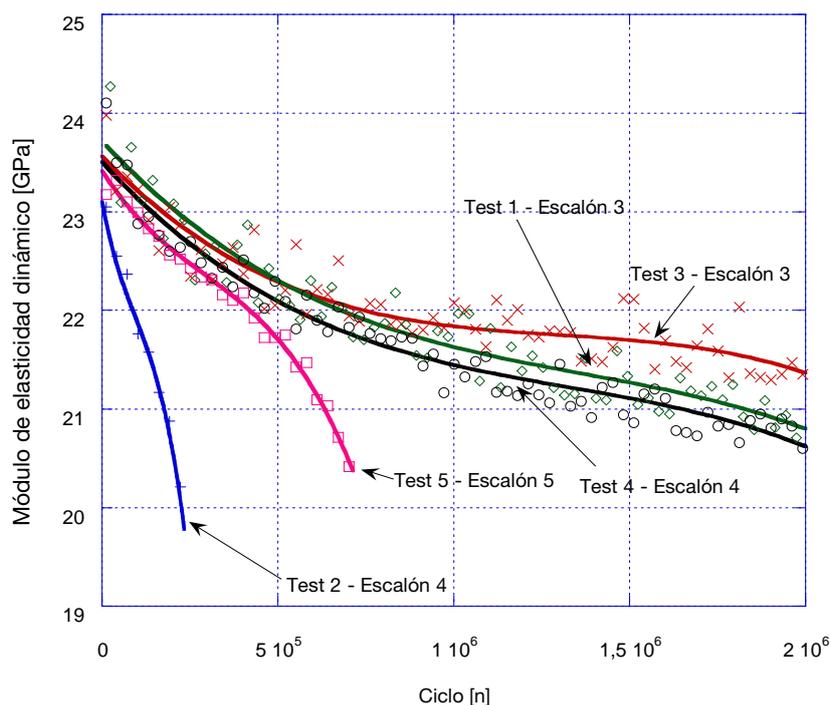


Fig. 144. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,65AS-100%.

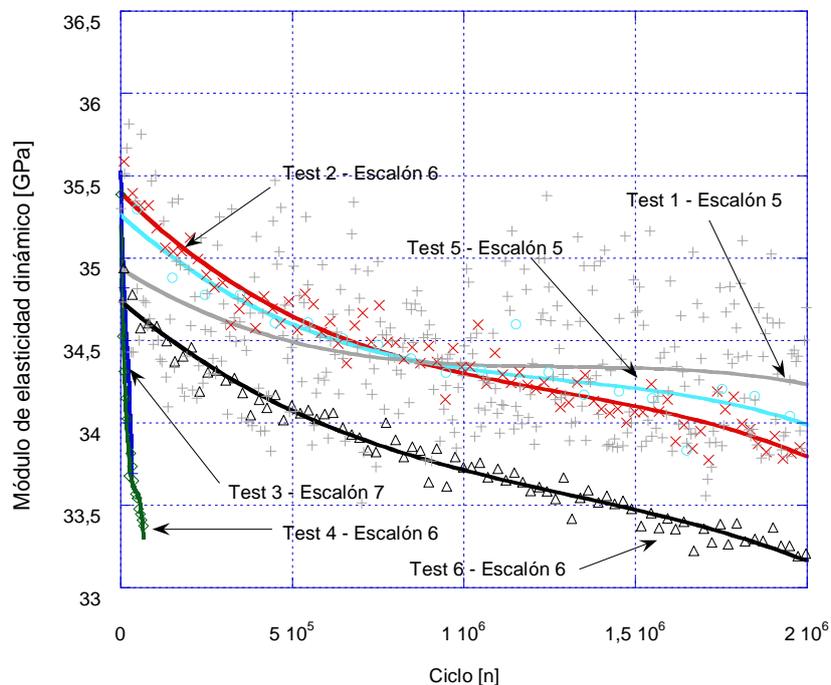


Fig. 145. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,50AS-0%.

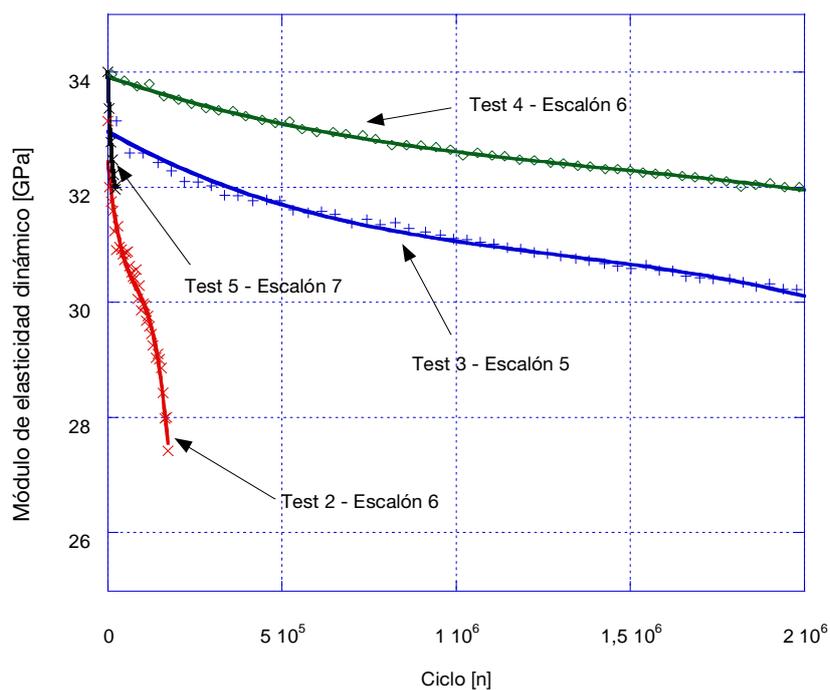


Fig. 146. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,50AS-20%.

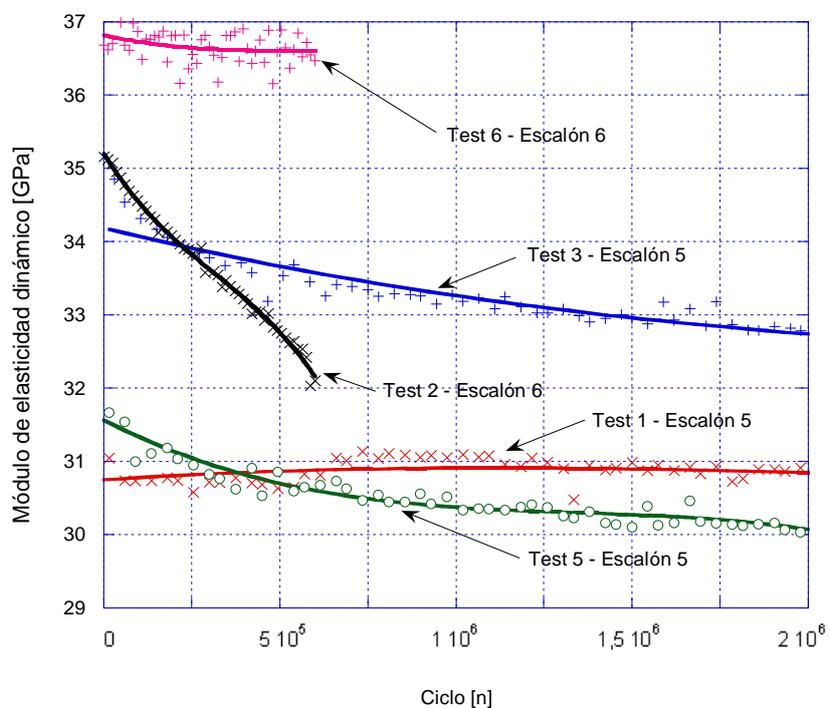


Fig. 147. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,50AS-50%.

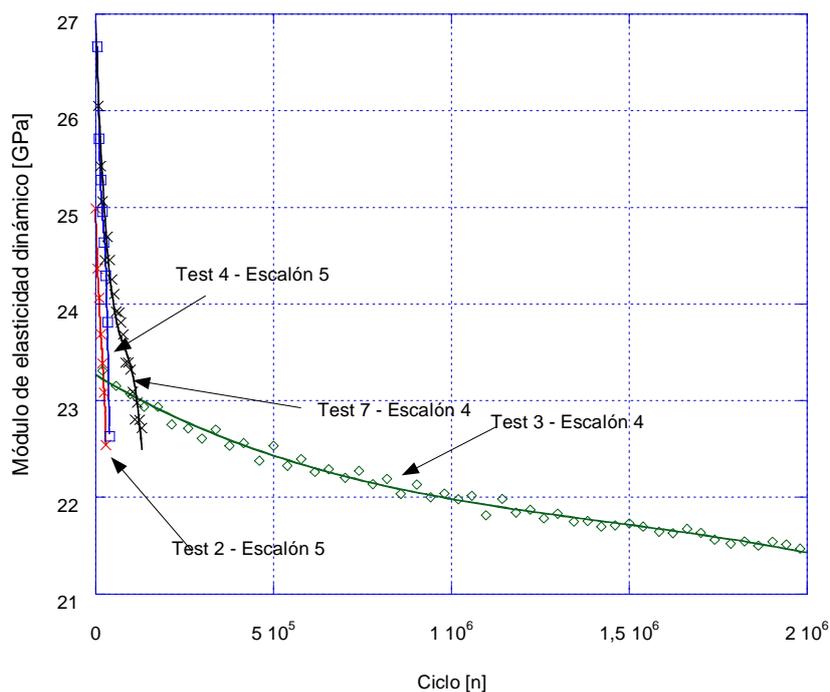


Fig. 148. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,50AS-100%.

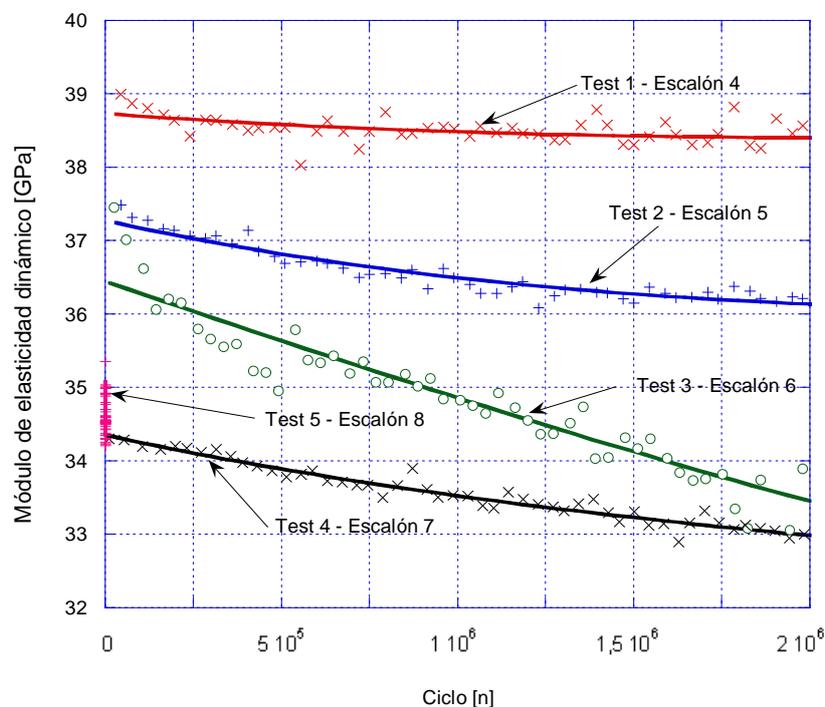


Fig. 149. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,55ARS-0%.

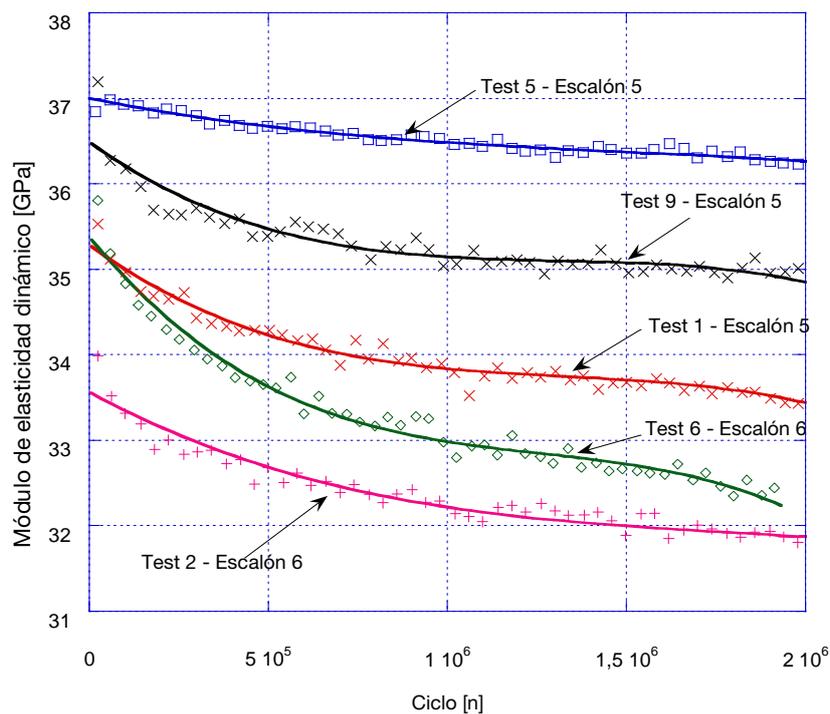


Fig. 150. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,55ARS-20%.

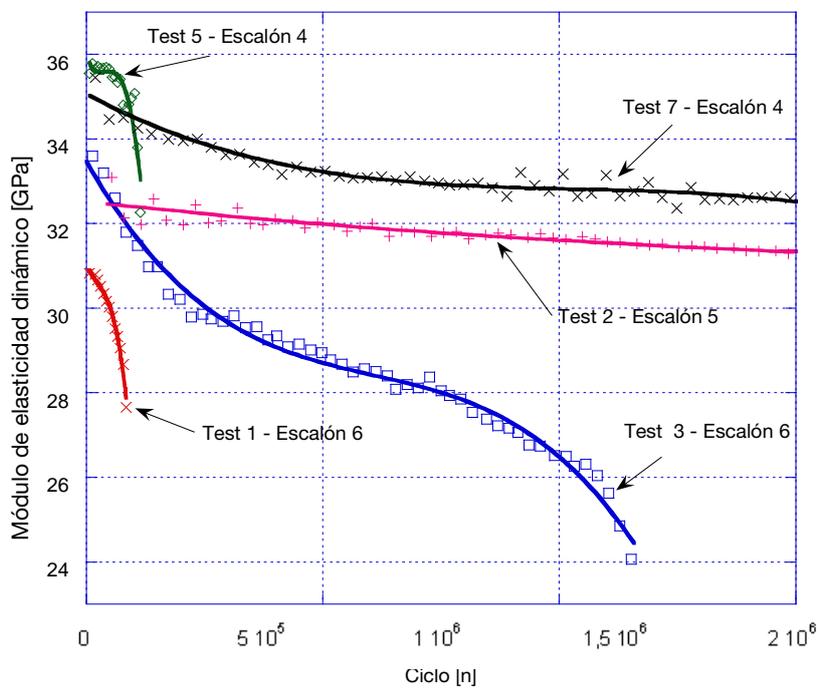


Fig. 151. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,55ARS-50%.

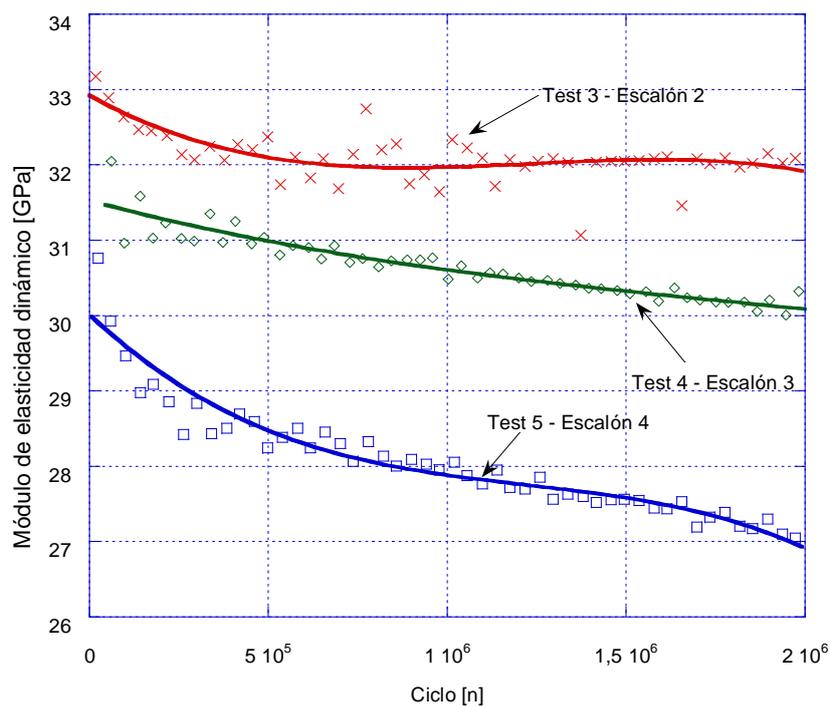


Fig. 152. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,55ARS-100%.

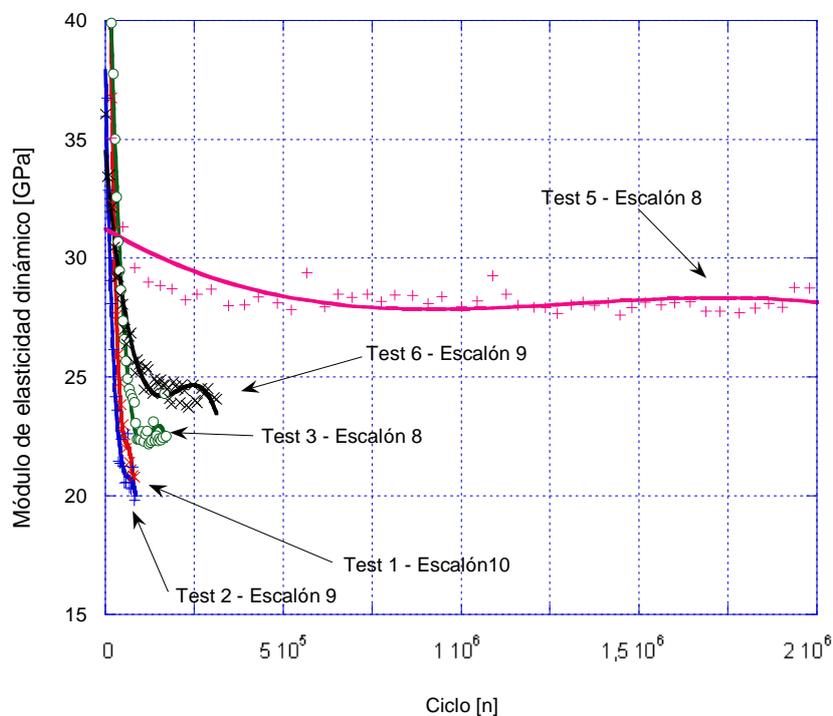


Fig. 153. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,45ARS-0%.

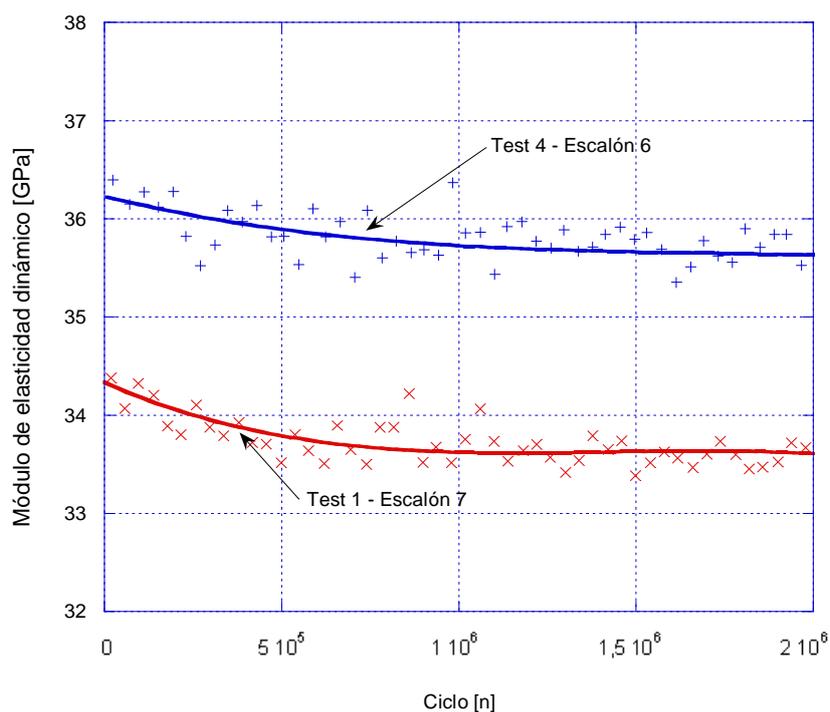


Fig. 154. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,45ARS-20%.

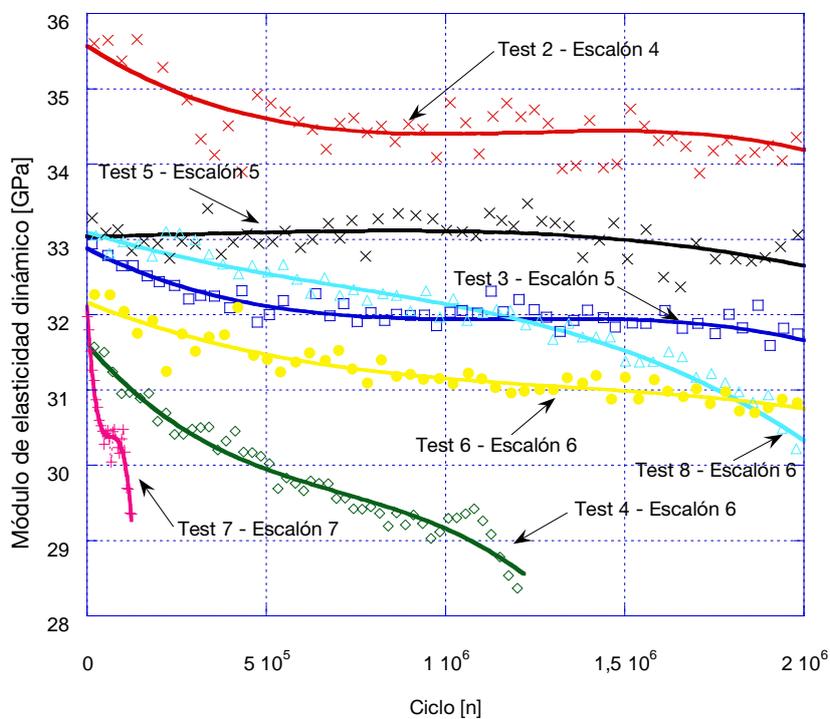


Fig. 155. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,45ARS-50%.

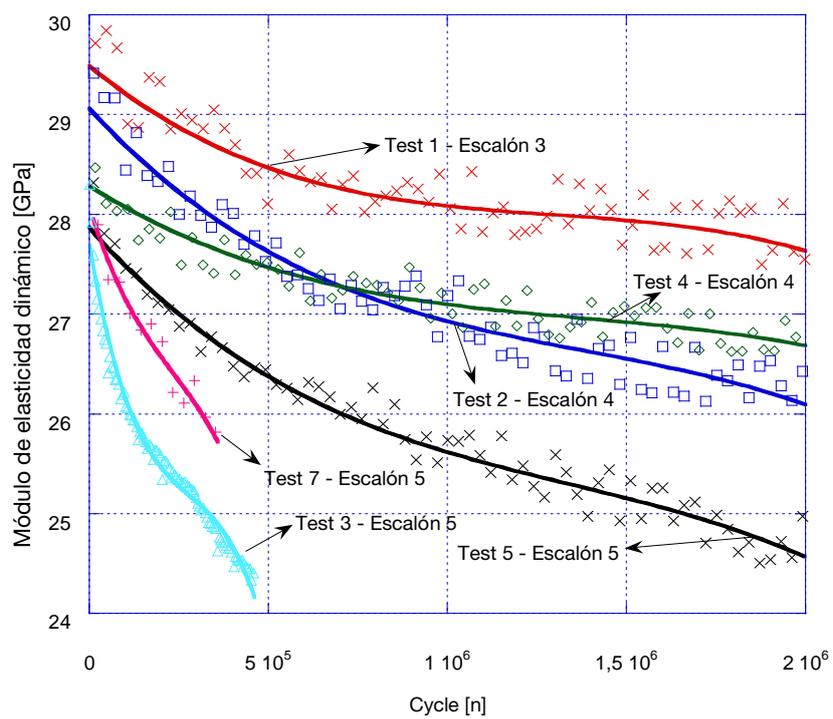


Fig. 156. Evolución de la rigidez frente al número de ciclos para el hormigón H-0,45ARS-100%.

3.8.2. Método LOCATI

Los resultados relativos al comportamiento de los hormigones frente a escalones de cargas variables, método LOCATI, se presentan a continuación distribuidos por fases.

En la Fig. 157, se muestran los resultados de uno de los ensayos de registro de deformación frente a trenes de carga variables de un hormigón H-0,65 de la primera fase de la investigación. Para cada dosificación se han ensayado dos probetas, representándose los resultados como valores medios.

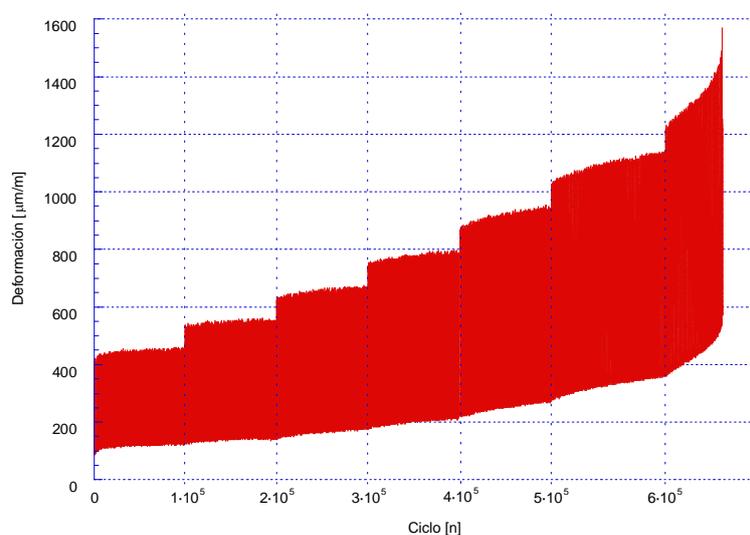


Fig. 157. Resultados del registro de deformación frente al número de ciclos del ensayo LOCATI sobre el hormigón H-065-20%.

A continuación, se presentan los resultados de comportamiento a fatiga por el método LOCATI correspondientes a la fase primera y segunda, Tabla 118, Tabla 119, Tabla 120 y Tabla 121, respectivamente.

Tabla 118. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,65 (árido reciclado seco).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase I			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,65-0%:	$739 \cdot 10^3$	1595	40
H-0,65-20%:	$725 \cdot 10^3$	1575	40
H-0,65-50%:	$611 \cdot 10^3$	1505	35
H-0,65-100%:	$691 \cdot 10^3$	1695	35

Tabla 119. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,50 (árido reciclado seco).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase I			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,50-0%:	$910 \cdot 10^3$	1480	50
H-0,50-20%:	$905 \cdot 10^3$	1620	50
H-0,50-50%:	$740 \cdot 10^3$	1789	40
H-0,50-100%:	$701 \cdot 10^3$	2100	40

Tabla 120. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,65AS (árido grueso saturado).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase II			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,65AS-0%:	$670 \cdot 10^3$	1425	35
H-0,65AS-20%:	$671 \cdot 10^3$	1598	35
H-0,65AS-50%:	$651 \cdot 10^3$	1055	35
H-0,65AS-100%:	$596 \cdot 10^3$	1002	30

Tabla 121. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,50AS (árido grueso saturado).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase II			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m/m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,50AS-0%:	$850 \cdot 10^3$	1287	45
H-0,50AS-20%:	$799 \cdot 10^3$	1609	40
H-0,50AS-50%:	$721 \cdot 10^3$	1722	40
H-0,50AS-100%:	$605 \cdot 10^3$	2062	35

En lo referente a la tercera fase, la Tabla 122 recoge los resultados obtenidos para los ensayos de determinación del límite a fatiga de los hormigones H-0,55ARS.

Tabla 122. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,55ARS (árido reciclado saturado).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase III			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m/m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,55ARS-0%:	$800 \cdot 10^3$	1160	45
H-0,55ARS-20%:	$746 \cdot 10^3$	1380	40
H-0,55ARS-50%:	$604 \cdot 10^3$	1550	35
H-0,55ARS-100%:	$410 \cdot 10^3$	1240	25

Finalmente, los resultados correspondientes al hormigón H-0,45ARS, se presentan en la Tabla 123.

Tabla 123. Resultados del ensayo de determinación del comportamiento a fatiga por el método LOCATI para H-0,45ARS (árido reciclado saturado).

Comportamiento a fatiga por el método LOCATI - Fase III			
Hormigón	Número de ciclos [N]	Deformación máxima [$\mu\text{m/m}$]	Tensión máxima [MPa]
H-0,45ARS-0%:	$1048 \cdot 10^3$	1600	55
H-0,45ARS-20%:	$900 \cdot 10^3$	1320	50
H-0,45ARS-50%:	$700 \cdot 10^3$	1240	40
H-0,45ARS-100%:	$608 \cdot 10^3$	1760	35

Debido a la gran cantidad de resultados obtenidos, se presenta en forma de gráfico un solo ensayo para un grado de sustitución de una de las dosificaciones de la primera fase y, los resultados finales se presentan numéricamente recogidos en tablas expresados como valores medios. En el apartado correspondiente de los anejos podrán consultarse todos los ensayos realizados. Todos los resultados obtenidos están recogidos en el Anejos VI que acompaña esta Tesis.

3.9. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

En el presente apartado, se recoge una secuencia de micrografías de los hormigones H-0,65 y H-0,50 correspondientes a la primera de las fases de la investigación. Todas ellas se han realizado sobre muestras obtenidas de probetas ensayadas a fatiga, según la metodología STAIRCASE, que no han superado los dos millones de ciclos. Las imágenes permiten identificar detalles morfológicos de gran interés para la comprensión del comportamiento bajo cargas cíclicas de los hormigones reciclados.

Así, por ejemplo, en la Fig. 158 puede observarse el crecimiento de los productos de hidratación (ettringita) del cemento en el interior de un poro. De igual forma, la misma imagen recoge la interconexión de fisuras secundarias en el interior del poro.

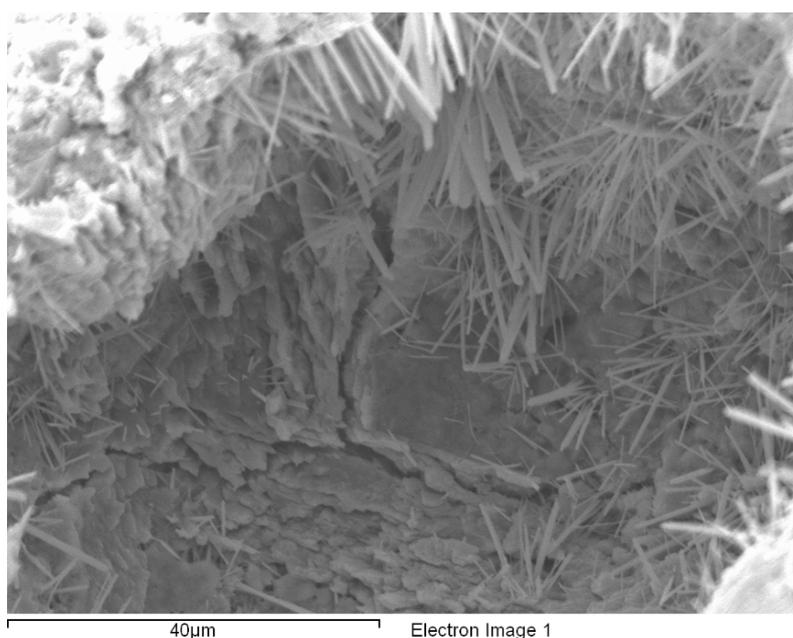


Fig. 158. Micrografía del hormigón H-0,65-0% donde puede apreciarse el crecimiento de agujas de los productos de hidratación (ettringita) del cemento en el interior de un poro.

A continuación se presentan, en micrografías con distintas escalas, otras regiones de interés del material.

Las Fig. 159 y Fig. 160 muestran otros detalles morfológicos del hormigón H-0,65-0%.

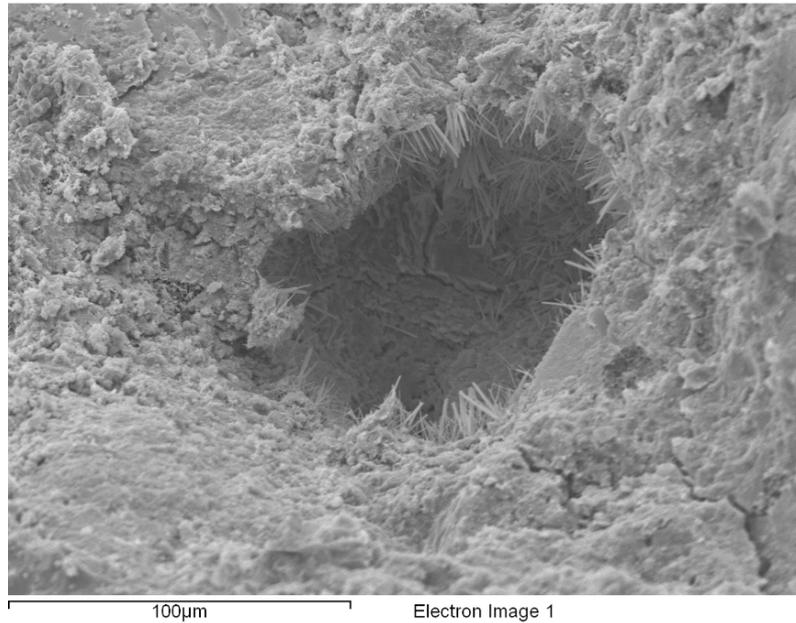


Fig. 159. Detalle del entorno del mismo poro de la Fig. 159 del hormigón H-065-0%.

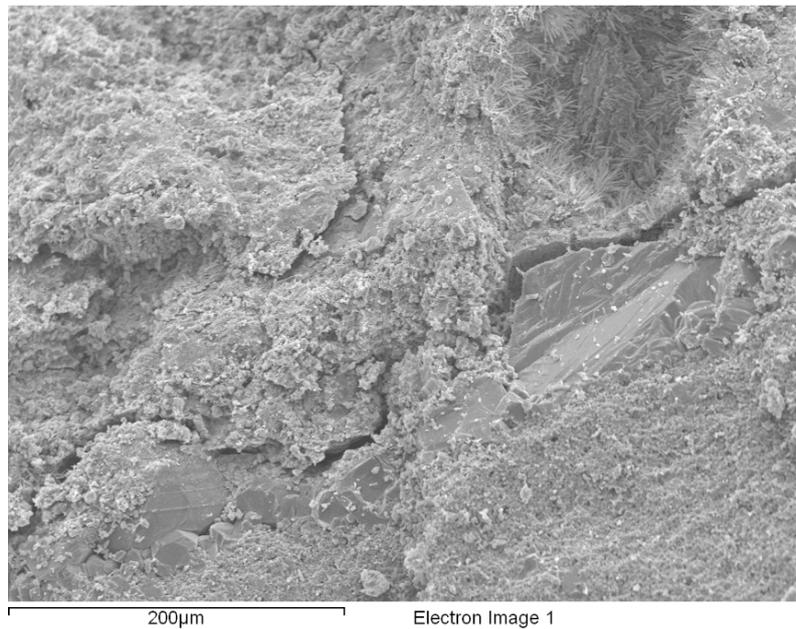


Fig. 160. Detalle de una fisura secundaria entre el árido y la pasta en el hormigón H-065-0%.

Las Fig. 161 y Fig. 162 recogen regiones de interés del hormigón H-0,65-20%.

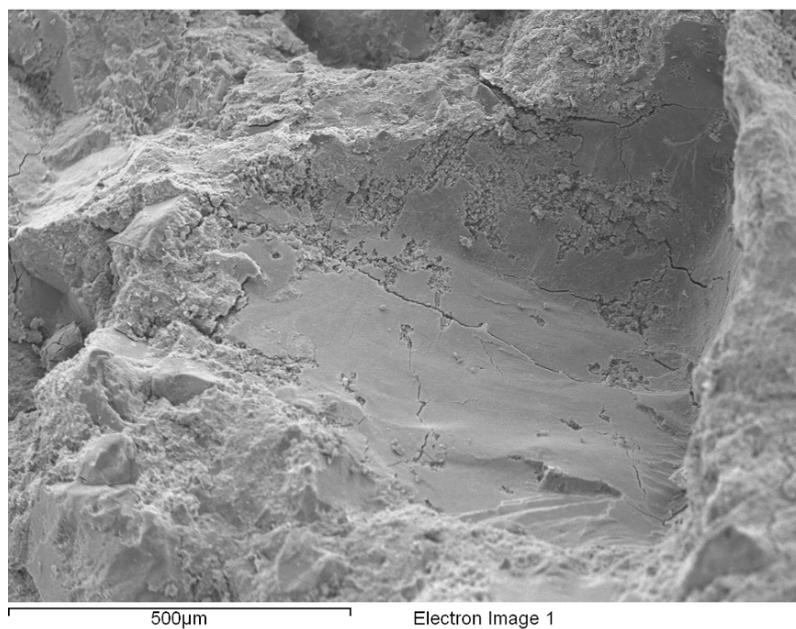


Fig. 161. Detalle de la interfase árido-pasta, tras la despegue del árido, hormigón H-065-20%.

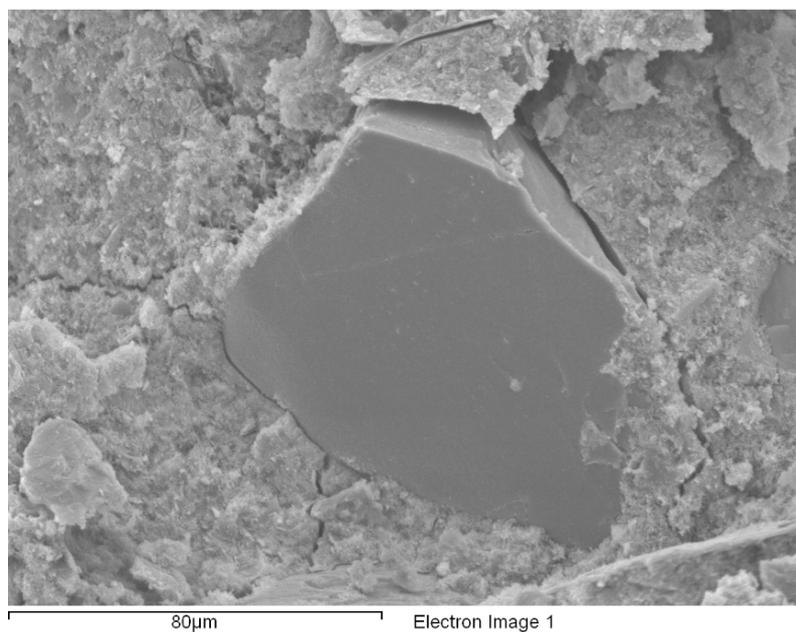


Fig. 162. Fallo por fatiga de la unión adherente árido-pasta del hormigón H-065-20%.

Las Fig. 163 y Fig. 164 recogen regiones de interés del hormigón H-0,65-50%.

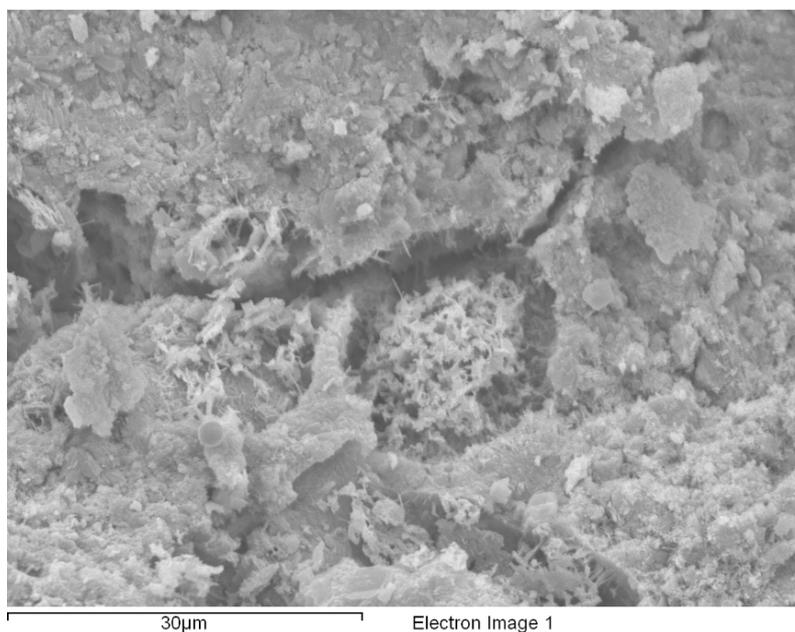


Fig. 163. Fisuras secundarias y crecimiento de agujas en el interior de un poro de un hormigón H-065-50%.

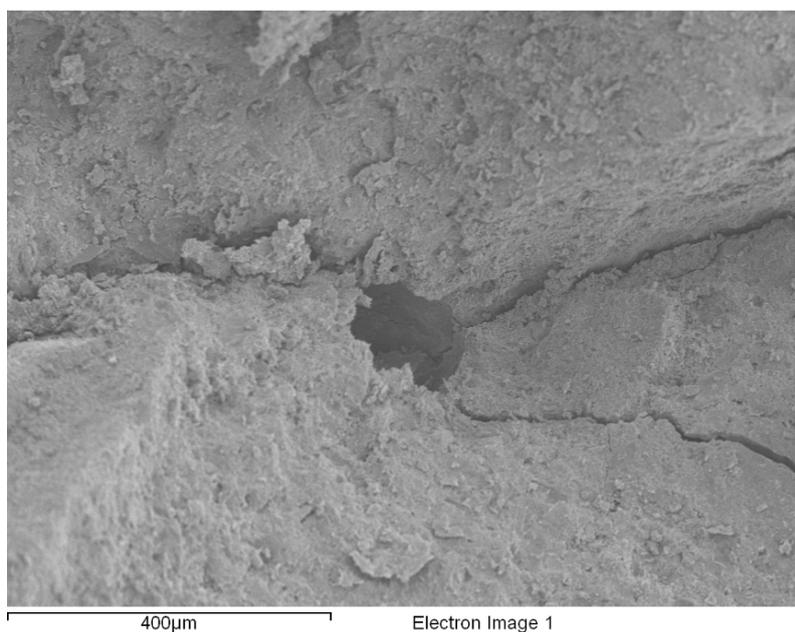


Fig. 164. Generación de fisuras secundarias en el plano de fractura principal, a partir de un poro, H-065-50%.

Las Fig. 165 y Fig. 166 recogen regiones de interés del hormigón H-0,65-100%.

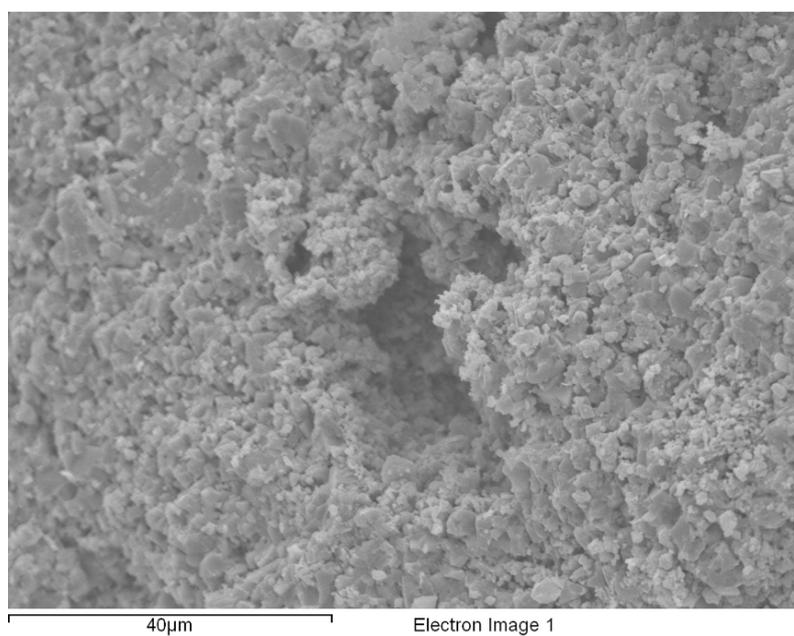


Fig. 165. Detalle de la pasta de cemento del H-0,65-100%.

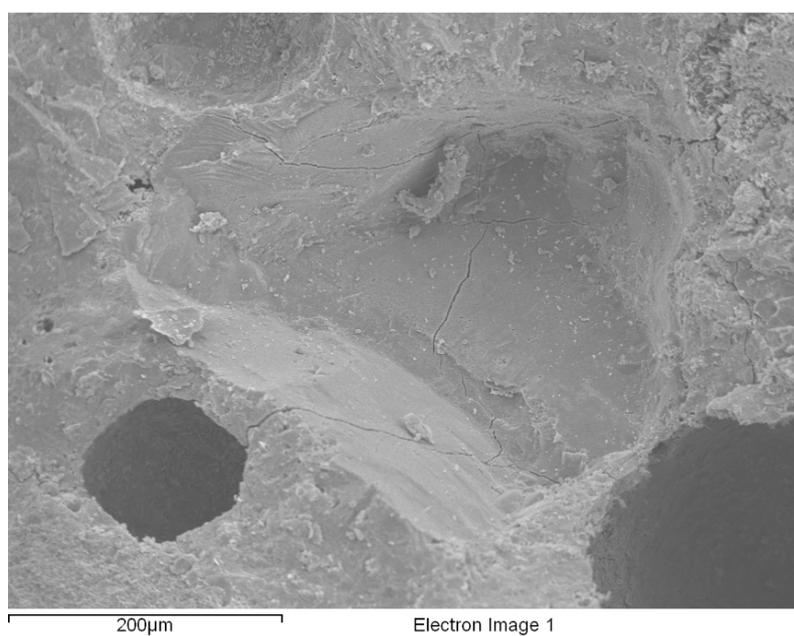


Fig. 166. Fisuras secundarias creciendo a partir de los poros, H-0,65-100%.

Las Fig. 167 y Fig. 168 recogen regiones de interés del hormigón H-0,50-0%.

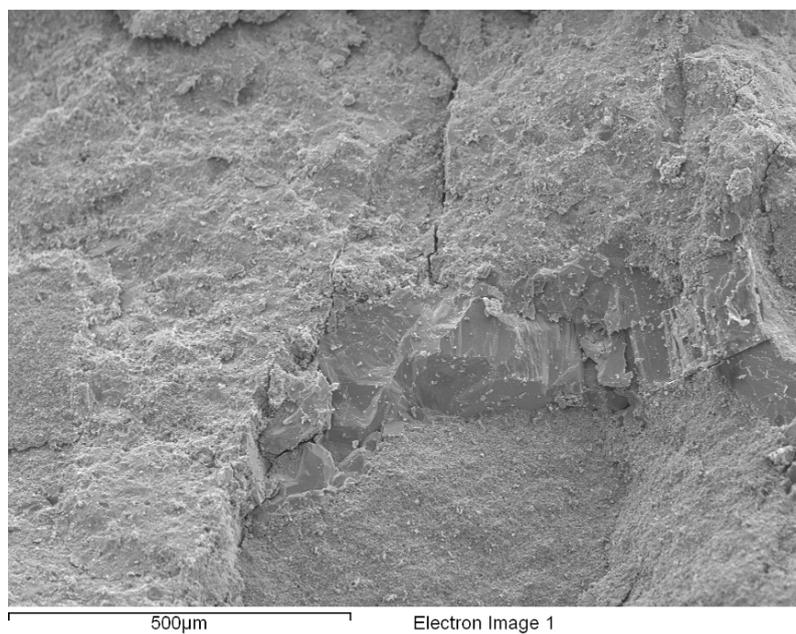


Fig. 167. Micrografía de la superficie de rotura de la fractura principal con rotura de pasta y árido, H-0,50-0%.

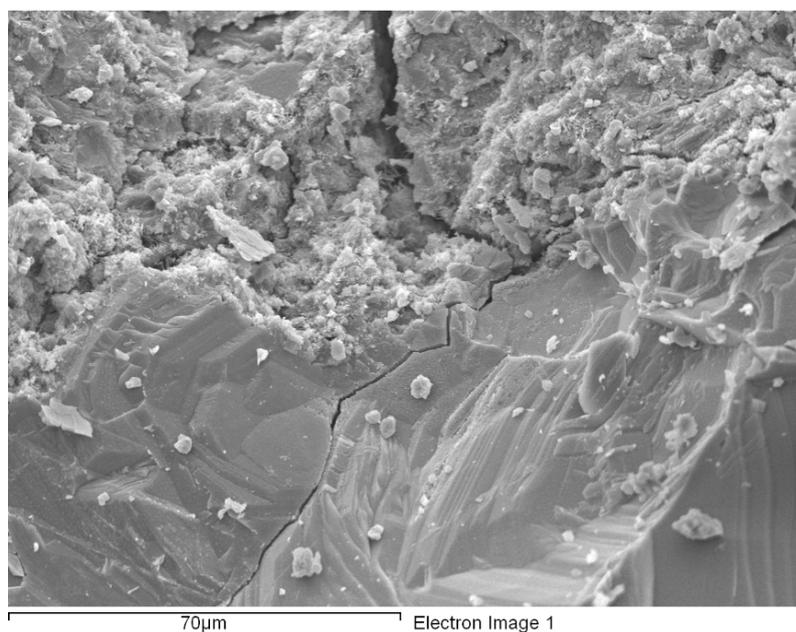


Fig. 168. Propagación de una fisura secundaria continua a través del árido.

Las Fig. 169 y Fig. 170 recogen regiones de interés del hormigón H-0,50-20%.

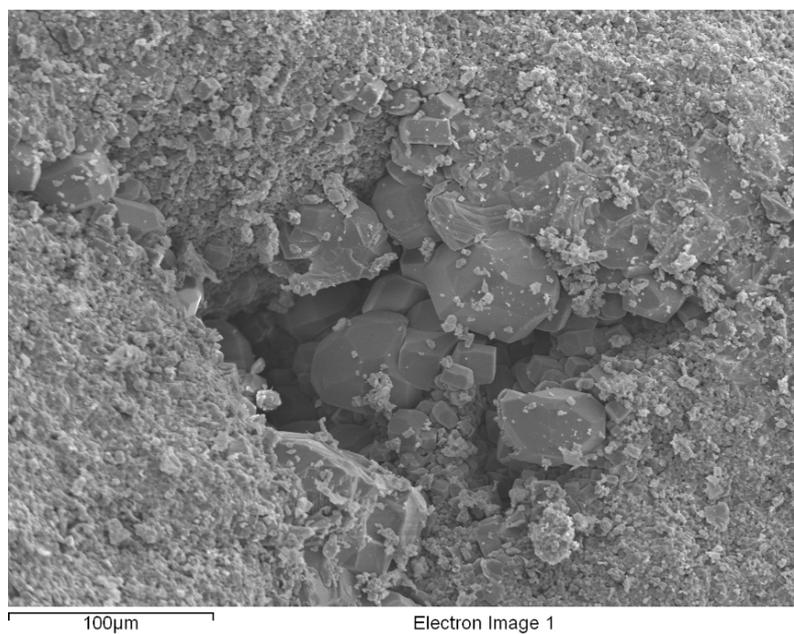


Fig. 169. Detalle de un hueco en la pasta del H-0,50-20%.

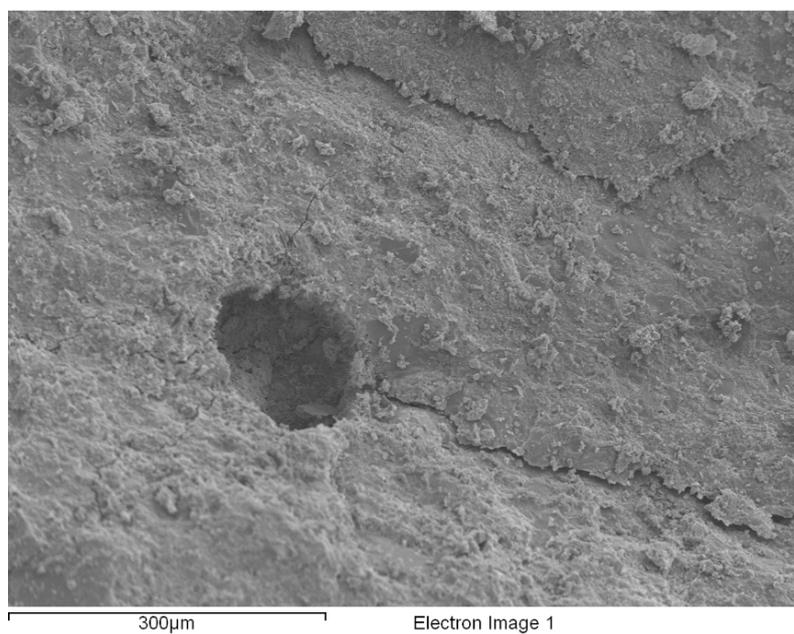


Fig. 170. Propagación de una fisura secundaria a través de un poro, H-0,50-20%.

Las Fig. 171 y Fig. 172 recogen regiones de interés del hormigón H-0,50-50%.

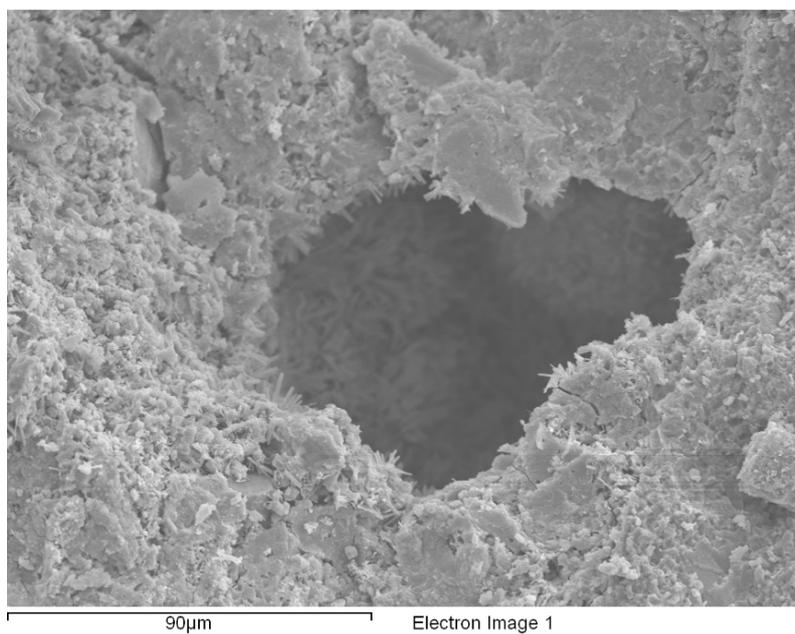


Fig. 171. Detalle de un poro de aire atrapado del H-0,50-50%.

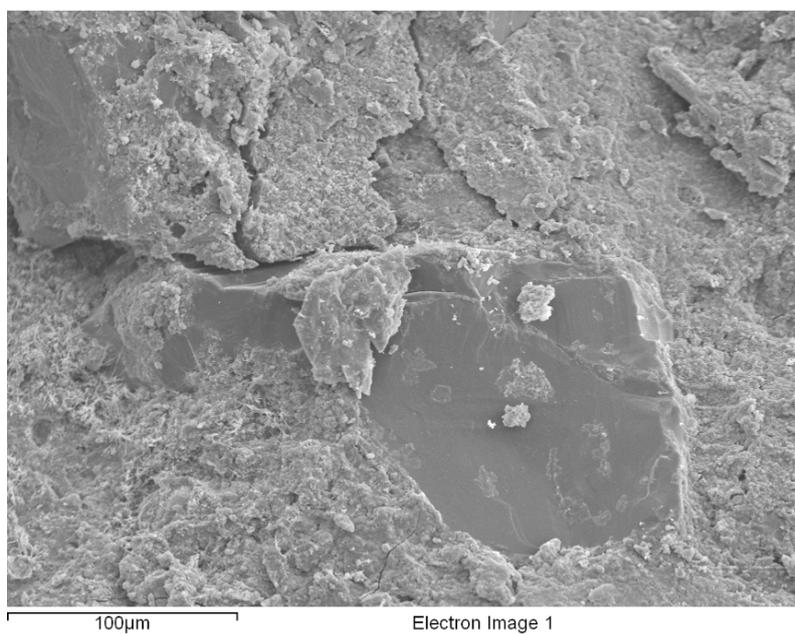


Fig. 172. Detalle de un árido fracturado en la superficie de rotura principal del H-0,50-50%.

Las Fig. 173 y Fig. 174 recogen regiones de interés del hormigón H-0,50-100%.

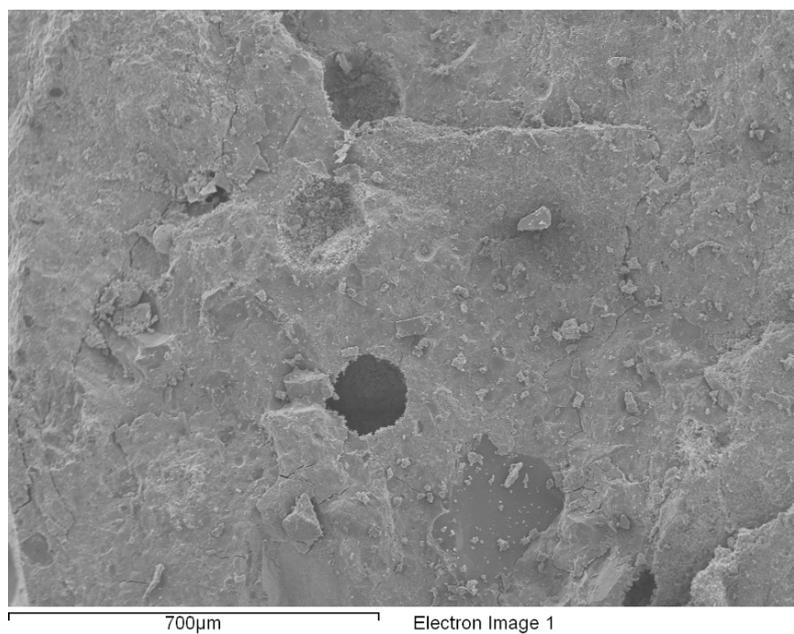


Fig. 173. Porosidad debida a burbujas de aire ocluido y pasta compacta en un H-0,50-100%.

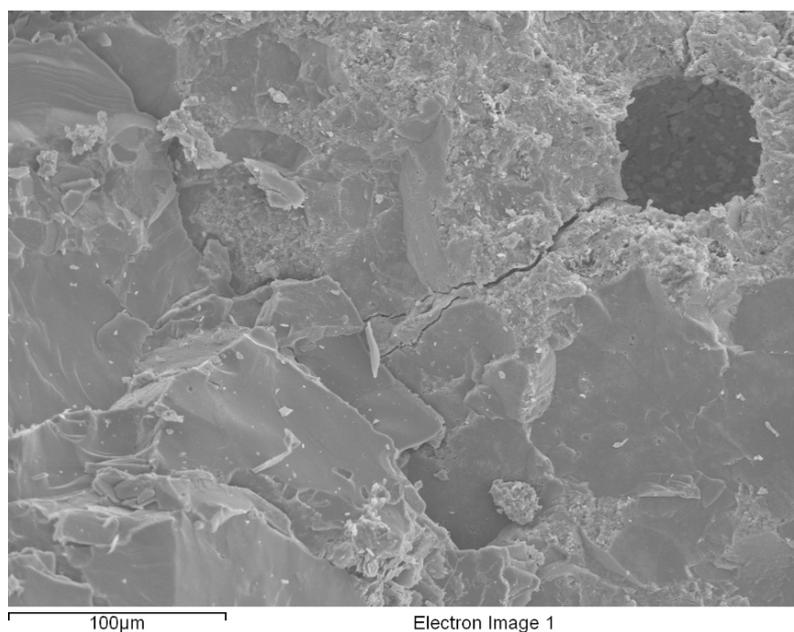


Fig. 174. Generación de una fisura a partir de un poro de aire atrapado.