

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se analizan los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los ensayos de caracterización del hormigón reciclado y de control. Su estudio se lleva a cabo en el mismo orden en el que se recogieron en el capítulo anterior.

4.1. PROPIEDADES DEL CEMENTO

Los dos tipos de cemento utilizados están clasificados como CEM I 42,5 R/SR, para el elegido en las fases primera y segunda, y como CEM I 52,5 N/SR, para la tercera fase. Según la normativa que cataloga los cementos [149] los tipo I deben estar constituidos en un porcentaje superior al 95% por clínker Portland. No obstante, se diferencian entre ellos en que el primero, de acuerdo a la resistencia a compresión en una probeta de mortero normalizada a los 28 días, ha de proporcionar una resistencia mínima de 42,5 MPa, y 52,5 MPa el segundo de ellos. Por otra parte, el código que identifica el cemento indica que el primero es de alta resistencia inicial “R” y el segundo de resistencia inicial normal “N”. El identificador de clase resistente a primeras edades exige que los dos cementos, CEM I 42,5 R/SR y CEM I 52,5 N/SR, han de alcanzar una resistencia mínima de 20 MPa a los 7 días. La codificación “SR” indica que se trata de hormigones sulforresistentes y, por lo tanto, adecuados para su utilización en ambientes, como es el caso, marinos.

La utilización de cementos de tipo I garantiza la ausencia, en el hormigón de control, de incorporaciones indeseables. En este sentido, la posterior detección de componentes que pudieran comprometer la durabilidad o las propiedades mecánicas de los hormigones reciclados tendrá acotado su origen en las aportaciones indeseables del árido reciclado con el que se fabricó el hormigón.

La densidad real obtenida, para cada uno de los cementos, del CEM I 42,5 R/SR, utilizado en las dos primeras fases de la investigación, y del CEM I 52,5 N/SR, utilizado en la tercera fase, es ligeramente superior a los 3 g/cm³. En general, los cementos tipo I, como es el caso, presentan unas densidades reales que se sitúan en torno a los 3 g/cm³, tal y como sucede con los cementos aquí analizados.

Los resultados correspondientes a la superficie específica Blaine son los típicos de un cemento tipo 42,5 R/SR de fraguado rápido o un 52,5 N/SR de fraguado normal.

En las figuras que recogen los análisis químicos elementales, puede comprobarse que el porcentaje de cada uno de los elementos encontrados es muy similar en los dos casos. El magnesio se presenta en un porcentaje próximo al 0,7%, el aluminio ligeramente superior al 2%. Se detecta un porcentaje de silicio de un 7,3% y un 2,7%

de azufre. Algo menos, un 2,5%, de potasio y un 2,2% de hierro. El elemento mayoritario, como era de esperar, es el calcio con un porcentaje superior al 47%. Se han detectado, sin ser identificados, elementos minoritarios que se presentan en porcentajes por debajo del 1%.

Los diagramas de difracción de rayos X de los dos cementos analizados corresponden a un tipo de cemento, confirmándose que, como se comentó anteriormente, se trata del mismo cemento. Entre los componentes detectados destacan el óxido de calcio no combinado o cal libre. El sulfato de calcio hallado, se encuentra mayoritariamente en forma de yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), aunque es posible la presencia de hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), o incluso de anhidrita (sulfato de calcio anhidro CaSO_4), o cualquier mezcla de ellos. Su papel es el de actuar como regulador del fraguado. Los componentes mayoritarios son, como cabe esperar, la belita (C_2S), la alita (C_3S), el aluminato tricálcico (C_3A) y la fase férrica, mineralógicamente conocido como brownmillerita ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$). Se han detectado porcentajes pequeños de periclasa (MgO), siendo la cantidad de Mg en peso observada de un 0,7%.

4.2. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS NATURALES Y RECICLADOS

4.2.1. Composición tras la separación visual

En los hormigones, parcial o totalmente reciclados, se espera que la presencia de árido reciclado con mortero adherido, cuya resistencia es claramente inferior a la de la grava o gravilla así como mayor su porosidad, juegue un papel predominante.

Una minuciosa observación revela que entre las gravas y gravillas recicladas compuestas por árido natural y mortero adherido (ambos procedentes del hormigón de origen) el volumen de este mortero adherido es inversamente proporcional al volumen de la grava o gravilla recicladas. Esto se traduce en que cuanto mayor sea el tamaño del árido reciclado menor es, también, la probabilidad de que éste esté formado exclusivamente por mortero. O bien, que entre las fracciones más pequeñas, el porcentaje total de mortero adherido frente al de árido natural sea mayor. Este efecto tiene especial relevancia a la hora de interpretar los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización física, pudiéndose entrever de ello que las fracciones de menor tamaño presentan menores densidades y mayores porosidades que las fracciones más gruesas.

Entre los áridos naturales identificados en el árido reciclado, se encuentra tanto piedra de origen calizo como silíceo, con una distribución granulométrica muy similar a la que presenta el árido reciclado en su conjunto. Se detectan adheridas, a éstos áridos naturales, pequeñas trazas de mortero que podrían tener una importante influencia durante la posterior adhesión al mortero nuevo del hormigón reciclado.

Cabe destacar la gran porosidad macroscópica que presentan todos los componentes que no son grava o gravilla, y que representan un gran porcentaje de los constituyentes sólidos del árido reciclado.

Si se comparan los resultados obtenidos en la separación de los componentes del árido reciclado de las primera y segunda fases con las exigencias de la Instrucción Española, el porcentaje de finos (0,43%) es inferior al límite del 1% establecido por la misma. Aún menor es el porcentaje de finos hallado en el árido reciclado de la tercera fase, un 0,25%.

La diferencia más notable entre los áridos reciclados utilizados en las distintas fases corresponde al grado de contaminación por materiales bituminosos. En la primera y segunda de las fases no se observan cantidades importantes de áridos contaminados por betunes, pero sí se han encontrado partículas aisladas de betún. Por el contrario, entre los áridos utilizados en la tercera fase se aprecia una importante proporción, en peso, de árido contaminado superficialmente con este material. Aproximadamente, el aporte global de material bituminoso, aunque en distinta forma, al hormigón reciclado es similar en todas las fases. No obstante, estas cantidades podrían afectar negativamente a las propiedades mecánicas de maneras diferentes. En el primero de los casos, su presencia supone una región localizada, con un volumen de partícula considerablemente grande, sin capacidad mecánica. En cambio, la presencia de áridos contaminados superficialmente con betún podría afectar negativamente a las propiedades mecánicas en tanto en cuanto la unión entre la nueva pasta de cemento y el propio árido se encuentra afectada por un material poco resistente.

Composicionalmente, el árido reciclado se ve muy influenciado por la gran heterogeneidad de los residuos con los que se fabrica. En los dos casos analizados se trata de un árido reciclado clasificado, según el catálogo actualizado de residuos utilizables en la construcción 2009 - CEDEX [17], como “Árido de hormigón”, siendo ambos procedentes de la misma planta de revalorización de la empresa TEC-REC “La Palentina” de Madrid.

Puede asumirse, en vista de los resultados, que los hormigones reciclados fabricados con estos áridos en las distintas fases, son de la misma clase y, por tanto, los resultados obtenidos con ellos, en relación al comportamiento de dichos áridos, pueden ser comparables entre sí, y clasificados como hormigones reciclados fabricados a partir de áridos reciclados procedentes de la trituración y procesado de hormigón estructural. No obstante, como se ha comprobado, entre distintas partidas de árido reciclado, catalogado igualmente como de hormigón, puede haber diferencias sustanciales aunque la exigencia principal, 95% de árido procedente de hormigón [17], se mantenga.

4.2.2. Propiedades geométricas y dimensionales

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

4.2.2.1. Análisis granulométrico

Los módulos granulométricos obtenidos, entre 6,8 y 8,2 para todos los áridos gruesos, se sitúan entre los exigidos por el *“Manual of Concrete Practice”* del ACI [150], que establece como valores frecuentes en el árido grueso los comprendidos en el intervalo entre 5,5 y 8,5. En general, el árido reciclado procedente de hormigones de mayor resistencia presenta módulos granulométricos ligeramente superiores a los procedentes de hormigones menos resistentes, a igualdad de sistema de trituración. Al realizar, además, varias etapas de trituración, disminuye el valor del módulo granulométrico del árido reciclado, ya que se reduce el tamaño del árido al mismo tiempo que éste sufre un proceso de redondeo, siendo, en efecto, el módulo granulométrico obtenido para el árido reciclado ligeramente menor que el obtenido para la grava natural. No existen limitaciones ni recomendaciones en la Instrucción EHE-08 [9] para el valor de este parámetro.

Con el fin de valorar la aptitud de estos áridos reciclados para la confección de hormigones reciclados, se estima la posición relativa de sus curvas granulométricas con respecto a los husos normalizados definidos en la norma UNE – EN 12620 [38]. En la Fig. 175 se representan conjuntamente las curvas de los áridos reciclados utilizados en sendas fases y, punteadas, las recomendaciones normativas.

En dicha figura, los áridos reciclados se han dibujado como AR1 para la primera y segunda fases y AR2 para la tercera, con el huso granulométricos (líneas punteadas) propuesto por la norma para tamaños máximos del árido $D < 20$ mm. Como puede comprobarse, las curvas granulométricas de los dos áridos reciclados están mayormente comprendidas dentro de las líneas punteadas que representan la recomendación normativa.

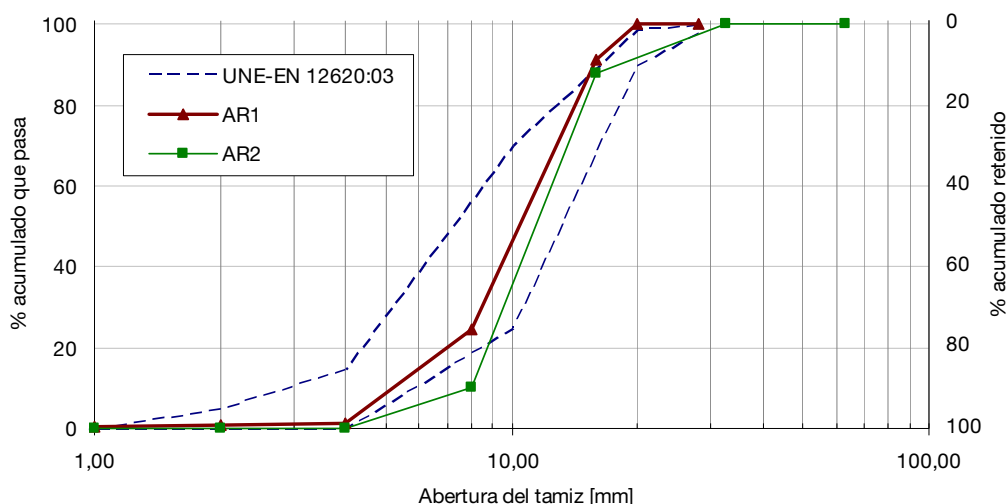


Fig. 175. Representación conjunta de las curvas granulométricas de ambos áridos reciclados con el huso granulométrico (líneas punteadas) definido en la norma UNE 12620:3 para $D < 20$ mm.

Nótese que el árido reciclado utilizado en la primera y segunda fases presenta un ligero déficit de partículas gruesas, mientras que, el empleado en la fase tercera lo presenta en la fracción fina. Esto no supone un inconveniente importante si se tiene en cuenta que la Instrucción EHE-08 recomienda, en su Anejo 15, limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso en el hormigón, razón por la cual va a ser preceptiva, en cualquier caso, la mezcla del árido reciclado con otro árido natural. Esta situación permitirá realizar los ajustes granulométricos oportunos para conseguir una combinación de áridos que satisfaga por completo los requisitos normativos en lo referente a la distribución de tamaños de las partículas.

4.2.2.2. Contenido de finos

Los valores encontrados para el árido reciclado, 0,24% para la primera y segunda fases y 0,38% para la tercera fase, se sitúan dentro de las exigencias normativas. A este respecto, los valores habituales que ofrece la bibliografía para áridos reciclados se sitúan dentro del intervalo comprendido entre 0,27% y 1,14%. Estos contenidos están muy por debajo del límite más restrictivo establecido por la Instrucción EHE-08, que es del 1,5% para el árido grueso. En este mismo sentido, tanto las normativas belga y holandesa [16] como las recomendaciones de la RILEM [151] permiten mayores contenidos de finos, estableciendo como límite la norma belga y la RILEM el 2%, y la norma holandesa hasta el 3%.

El mayor contenido de finos está justificado en el Anejo 15 de la EHE-08, en el cual, textualmente, se indica que *“el contenido de desclasificados inferiores del árido reciclado suele ser superior al de los áridos naturales, debido a que éstos pueden generarse después del tamizado, durante el almacenamiento y transporte por su mayor friabilidad. Además, la fracción fina reciclada se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero, lo cual origina unas peores propiedades que afectan negativamente a la calidad del hormigón. Esta es la principal causa de restringir su uso en la aplicación de hormigón estructural”*.

4.2.2.3. Contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm

La Instrucción EHE-08, por su parte, indica que el tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm, y que estos áridos deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.

Puede comprobarse que la grava reciclada utilizada en esta investigación, en sus tres fases, se ajusta a la exigencia de la EHE-08.

4.2.2.4. Índice de lajas

Los valores habituales del índice de lajas para áridos reciclados se sitúan dentro del amplio intervalo comprendido entre 7% y 22%, siendo el índice de lajas global en el caso que nos ocupa de 6,25%. Normalmente, estos valores están por debajo de los registrados para áridos naturales, atribuyéndose las diferencias a que el mortero adherido en la superficie de las partículas del árido reciclado tiende a redondear las partículas más angulosas, disminuyendo de esta forma el porcentaje de lajas.

Teniendo en cuenta que la Instrucción EHE-08 limita el valor del índice de lajas al 35% para el árido grueso, parece claro que el árido reciclado ensayado tiene un valor de este parámetro adecuado, dentro de los límites recomendables, para su empleo en hormigón estructural.

4.2.2.5. Coeficiente de forma

Como ya se había señalado en el apartado correspondiente al índice de lajas, se observa que los tamaños más finos presentan menores valores del coeficiente de

forma, es decir, una forma menos angulosa. En efecto, la textura de los áridos reciclados suele ser rugosa y porosa aunque redondeada, debido a la presencia del mortero que queda adherido. Esta característica se observa tanto en el árido fino como en el árido grueso, aunque es en el primero de ellos donde la diferencia con el árido natural se hace más evidente.

Los valores habituales del coeficiente de forma para el árido reciclado se sitúan en el intervalo comprendido entre el 10% y el 30%. En la anterior Instrucción de Hormigón Estructural EHE se indicaba que el coeficiente de forma del árido grueso, determinado según el método de ensayo recogido en la norma española UNE 7238:71, no debía ser inferior a 0,20. Si se establece una equivalencia de este valor con los resultados obtenidos a partir de la norma europea UNE-EN 933 – 4 [115], el límite habría de situarse, aproximadamente, en valores del coeficiente de forma inferiores al 27%, de tal modo que, los áridos con coeficientes por debajo de este valor, cumplirían la especificación que establecía la anterior EHE en base a la norma UNE.

Se asume, por lo tanto, que al no haber limitaciones con respecto a esta propiedad en la Instrucción EHE-08, el árido reciclado puede cumplir los requisitos establecidos para los áridos naturales en la anterior EHE.

4.2.3. Propiedades físicas

Dentro de este apartado se analizan los resultados correspondientes a la determinación de densidades aparentes, relativas 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.

4.2.3.1. Densidad aparente, relativa y saturada

En cuanto a las densidades del árido reciclado, los valores registrados están de acuerdo con los datos recopilados en la bibliografía analizada en el estado del arte, que establecen un intervalo para las densidades relativas que se sitúa en 2,07 – 2,65 g/cm³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2,10 – 2,66 g/cm³.

Para la serie de ensayos realizados por el CEDEX, recogidos en la Tesis de Marta Sánchez de Juan [98], con anterioridad al proyecto RECNHOR, la densidad saturada del árido reciclado se sitúa sobre los 2,33 y 2,43 g/cm³, lo cual concuerda con los resultados obtenidos, en torno a los 2,40 g/cm³.

En el caso que nos ocupa, los valores de densidad relativa se sitúan cerca de los 2,30 g/cm³, lo que hace suponer que se trata de un árido reciclado con un alto grado de porosidad. Por tanto, se puede considerar al árido reciclado como árido de peso normal.

4.2.3.2. Coeficiente de absorción de agua

Como ya se ha indicado, la absorción del árido reciclado es, en general, superior a la de los áridos naturales, debido a la elevada absorción del mortero que queda adherido a su superficie; mientras que la absorción del árido natural suele oscilar entre 0 – 5%, la absorción del mortero alcanza valores del orden del 16 – 17%. El rango total encontrado en la bibliografía, tal y como se recoge en el capítulo del Estado del Arte, es 0,8 – 13% para el árido grueso reciclado con un valor medio total de 5,6%.

Por su parte, los resultados del ensayo de absorción obtenidos en el estudio experimental realizado en el CEDEX [98] para áridos reciclados presentan valores elevados, comprendidos entre 5,1% y 11,5% en la fracción 4/8 mm, y entre 4,2% y 8,8% en la fracción 8/16 mm. La fracción conjunta del árido (4/20 mm) presenta una absorción intermedia, oscilando entre 4,8 – 9,6%.

Por último, la Instrucción EHE-08 propugna que la absorción de agua por los áridos sea inferior al 5%. En el hormigón reciclado, Anejo 15, con un contenido de árido reciclado no superior al 20%, éste deberá presentar una absorción no superior al 7%. Adicionalmente, el árido grueso natural utilizado en la mezcla deberá exhibir una absorción no superior al 4,5%. En hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado, la combinación de árido grueso natural y reciclado debería cumplir la especificación que establece la Instrucción, presentando el conjunto un coeficiente de absorción ligeramente superior al 5% solo en el caso del hormigón con un 100% de incorporación. En lo referente a los valores obtenidos en el estudio emprendido, todos los áridos naturales encajan perfectamente dentro del rango establecido para el

coeficiente de absorción de agua, mientras que el árido reciclado, con un 5,2%, supera el límite establecido.

4.2.3.3. Porosidad accesible

No se dispone de valores de referencia para esta propiedad, ni se recoge limitación alguna al respecto en la Instrucción EHE-08. Como dato orientativo, se puede indicar que las especificaciones del hormigón a utilizar en la fabricación de traviesas de ferrocarril establecen valores de porosidad para el árido iguales o inferiores al 12%, encontrándose la porosidad asociada al árido reciclado muy próxima a este límite: 12,1% para las primera y segunda fases y 12,3% para la fase tercera.

4.2.4. Propiedades mecánicas y tribológicas

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

4.2.4.1. Contenido de partículas blandas

Los valores obtenidos en cuanto al contenido de partículas blandas son sensiblemente inferiores a los encontrados para áridos reciclados en la bibliografía analizada en el Estado del Arte porque, debido al desprendimiento de pasta al rayar el mortero adherido al árido, se obtienen valores muy elevados de contenidos de partículas blandas. En el caso que nos ocupa, este efecto se ve minimizado por la buena calidad del mortero original, al proceder prácticamente todo de desechos de hormigón estructural. Por tanto, debe tenerse en cuenta que las partículas que contienen mortero adherido en su superficie no han de ser necesariamente consideradas a priori como partículas blandas. No obstante, todas las partículas consideradas como “blandas” han sido áridos con mortero adherido. Asimismo, de la comparación entre el número de ellas y el porcentaje de su peso respecto del total, parece claro que la mayoría de ellas son partículas pequeñas. Este resultado refuerza la conclusión obtenida en los ensayos de separación visual en cuanto a que las partículas de menor tamaño poseen mayores cantidades de mortero adherido.

En cualquier caso, aunque los valores obtenidos, de 8,5% hasta 12,9%, para nuestro árido son bajos en comparación con otros áridos reciclados, están por encima del límite que establecía la antigua EHE para el contenido de partículas blandas en el árido grueso, fijado en el 5%. No obstante, esta limitación ha desaparecido en la nueva versión de la Instrucción.

4.2.4.2. Coeficiente de desgaste Los Ángeles

El valor de este índice, en el caso del árido reciclado analizado, se sitúa en torno al 40%, siendo de un 30% para el árido natural. Tras la obtención de los índices de distintas sustituciones de árido natural por árido reciclado, puede comprobarse cómo, en términos generales, el coeficiente de Los Ángeles de las distintas sustituciones puede expresarse como:

$$LA_D = \sum_i LA_i \lambda_i \quad (38)$$

donde:

- LA_D es el coeficiente de Los Ángeles de la dosificación correspondiente.
- LA_i son los coeficientes de Los Ángeles de los i componentes de la dosificación.
- λ_i son las fracciones unitarias de incorporación de cada uno de los i componentes de la mezcla.

Los valores encontrados en la bibliografía para áridos reciclados varían entre el 12% y el 43%, con un valor medio de 28%. Para los ensayos realizados en el CEDEX [98], se han obtenido valores comprendidos entre el 35% y el 42%, valores superiores a los que suelen presentar los áridos naturales y, en ocasiones, por encima del límite del 40% establecido por la Instrucción EHE-08. En este documento, se establece que es necesario limitar el valor del coeficiente de Los Ángeles de los áridos gruesos utilizados en la fabricación del hormigón ya que, a medida que aumenta este coeficiente, aumenta la deformación bajo carga del hormigón y, por ende, disminuye su resistencia. Además, para hormigones de alta resistencia, se recomienda que el

coeficiente de Los Ángeles no sea superior a 25. Los valores obtenidos en la investigación, 41% y 42% superan, ligeramente, la limitación normativa.

En la Fig. 176 se comparan los valores obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante la aproximación (38).

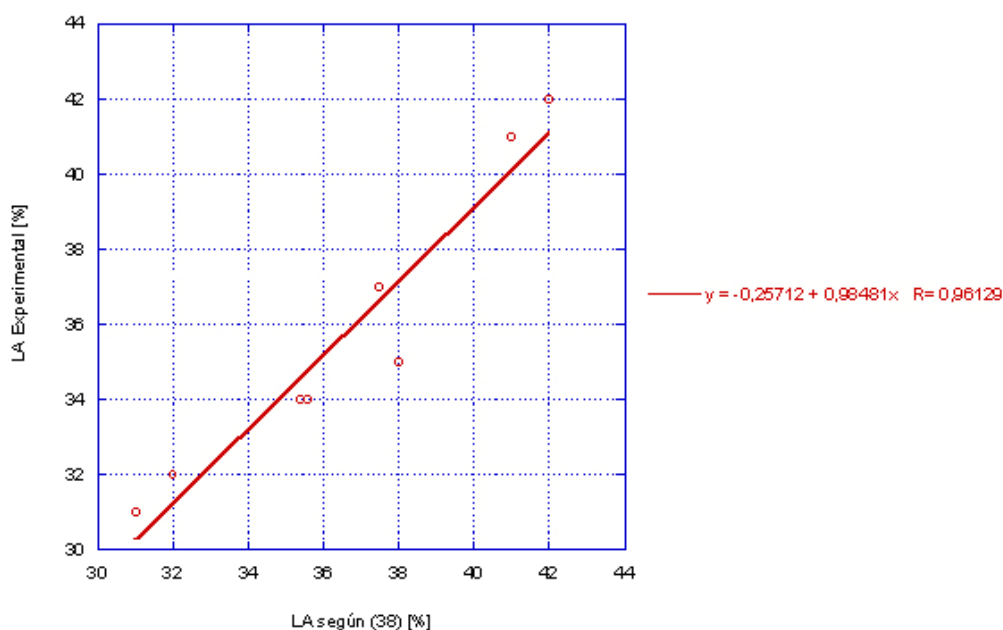


Fig. 176. Coeficiente de desgaste LA obtenido experimentalmente frente al propuesto en (38).

4.2.4.3. Índice de machacabilidad

Puede comprobarse cómo el índice de machacabilidad se ve incrementado con la incorporación de árido reciclado a cada una de las fracciones. Asimismo, el índice de machacabilidad de las fracciones 10/14 es ligeramente superior al de las fracciones 14/20. El primero de los resultados se explica por la menor resistencia de los áridos reciclados, debido al mortero adherido, frente a esfuerzos a compresión. El segundo resultado puede atribuirse a la mayor cantidad de mortero, por unidad de volumen, encontrada en la fracción 10/14 frente a la fracción 14/20. En particular, cabe destacar que entre los áridos de mayor tamaño es pequeño el porcentaje de los mismos formado exclusivamente por mortero, siendo menor la densidad de conjunto y por lo tanto mayor el número de huecos, en el caso de la fracción 14/20.

No se dispone de valores de referencia para esta propiedad, ni se establece limitación alguna al respecto en la Instrucción EHE-08. No obstante se ha considerado una característica interesante desde el punto de vista del comportamiento mecánico del hormigón. A diferencia del coeficiente de desgaste de Los Ángeles, que analiza la resistencia del material al impacto y roce con otros áridos y con las bolas de acero, el caso del índice de machacabilidad permite conocer el comportamiento frente a esfuerzos de compresión del conjunto que formará el esqueleto del hormigón.

4.2.4.4. Comportamiento bajo cargas de compresión

El comportamiento del conjunto de áridos bajo cargas de compresión puede considerarse un resultado complementario al índice de machacabilidad tradicionalmente utilizado. Tal comportamiento es el que se deduce de la curva tensión-deformación del conjunto para los distintos porcentajes de sustitución.

Puede observarse un comportamiento cuasilineal del material, hasta aproximadamente un 15% de la deformación. En la preparación de la muestra y el llenado del cilindro rígido, como se ha comentado, se procedió a compactar el material mediante picado con barra. Ello hace suponer que el tramo lineal es debido al acomodo del conjunto. En todos los casos, también puede observarse un segundo tramo de comportamiento, presumiblemente irreversible, donde tienen lugar las primeras roturas del material y, en consecuencia, lo que conduce a una deformación irrecuperable. El punto a partir del cual el árido deja de presentar un comportamiento lineal se presenta en la Tabla 124.

De los resultados obtenidos, pueden destacarse los siguientes aspectos. En primer lugar, el parámetro calculado es mayor en los áridos naturales que en los reciclados y, en consecuencia, a medida que se incorporan porcentajes mayores de árido reciclado al conjunto, disminuye, también, la carga que son capaces de soportar sin sufrir daños irreversibles. Se observa un comportamiento de pérdida lineal frente al porcentaje de incorporación de árido reciclado, siendo esta pérdida, en el caso de la fracción de árido 10/14, 100% reciclado, de aproximadamente un 36% (frente al árido natural). Algo superior, un 39%, es la pérdida que presentan los áridos reciclados frente a los áridos naturales de la tercera fase.

Tabla 124. Límite de linealidad en el comportamiento del esqueleto de árido de las distintas dosificaciones.

Límite de linealidad - AEL [MPa]								
Fracción:	10/14				14/20			
Sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Fase I y Fase II	7,5	6,9	6,1	4,8	7,8	7,2	6,3	5,1
Fase III	9,2	8,3	6,7	5,6	9,6	8,6	7,2	5,7

Si se analiza el porcentaje de pérdida de límite AEL de la fracción 14/20 del árido, se obtienen valores muy similares. De ello se deduce que, la pérdida que supone la incorporación del árido reciclado como sustituto del natural, es independiente del tamaño o fracción de árido analizado. Así, el límite (AEL_{γ}) del árido, con una incorporación γ (en tanto por ciento) de árido reciclado, siendo AEL_N el límite del árido natural y AEL_R el del árido reciclado, puede deducirse, de forma aproximada, y con carácter general a partir de la siguiente expresión:

$$AEL_{\gamma} = AEL_N - \frac{AEL_N - AEL_R}{100} \gamma \quad (39)$$

La Fig. 177 recoge la comparativa entre los valores obtenidos experimentalmente y según (39) del AEL.

Por otra parte, otro valor significativo es la pendiente del tramo de comportamiento lineal del conjunto en situación edométrica, con confinamiento y sin deformación lateral, AEM. La Tabla 125 recoge los resultados obtenidos en cuanto a la determinación de dicha pendiente de las muestras de árido natural, reciclado y combinado.

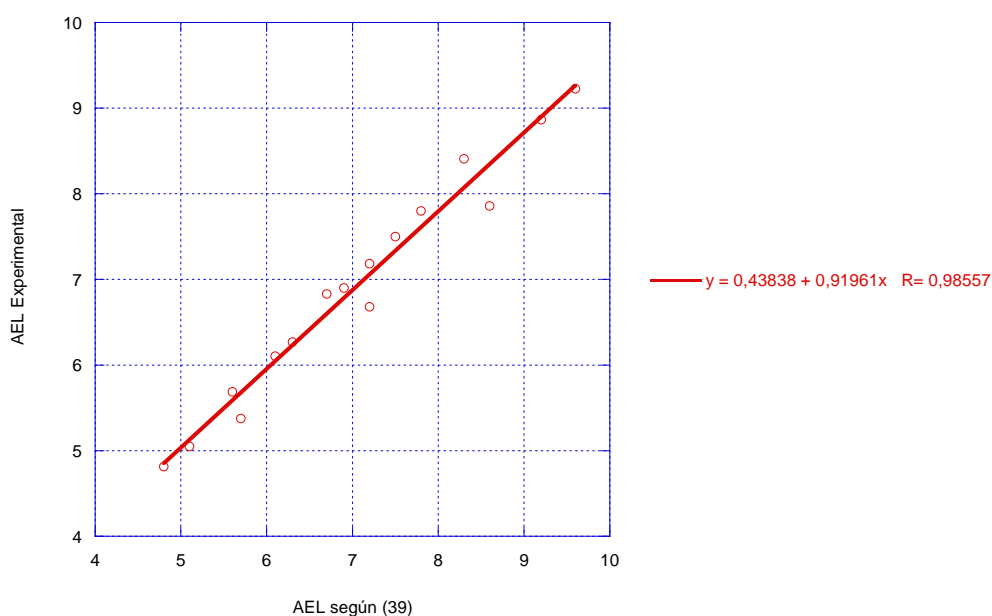


Fig. 177. Comparativa de los valores experimentales y obtenidos según la ecuación (39) para el AEL.

Tabla 125. Pendiente del tramo de comportamiento lineal del esqueleto de árido reciclado de las distintas dosificaciones.

Pendiente del tramo lineal - AEM [MPa]								
Fracción:	10/14				14/20			
Sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Fase I y Fase II	53,1	49,2	46,3	39,2	46,5	43,5	40,2	34,8
Fase III	50,3	48,9	45,7	38,1	46,4	42,4	37,2	33,1

De los resultados obtenidos, se desprenden las siguientes conclusiones. En primer término, para ambas fracciones analizadas, se observa una notable pérdida de rigidez a medida que se aumenta la incorporación de árido reciclado.

Por su parte, los comportamientos que presentan ambos áridos reciclados, mezclados con árido natural o no, son muy similares. En cuanto a la respuesta del árido natural, el correspondiente a las dos primeras fases ostenta una mayor rigidez frente a las cargas de compresión.

Producida la rotura por compresión de alguna de las partículas, se advierte una rigidización de las deformaciones originadas, no existiendo diferencias apreciables

entre fases, independientemente de la fracción estudiada y de la incorporación mayor o menor de material reciclado.

En todos los casos analizados, la fracción 14/20 es más deformable que la fracción 10/14, debido presumiblemente al mayor volumen de huecos intergranulares. Este resultado es coherente con el valor del coeficiente de forma obtenido, mayor para la fracción 14/20, siendo la fracción 10/14 más redondeada que la primera.

4.3. DOSIFICACION Y CURADO DEL HORMIGÓN RECICLADO

4.3.1. Dosificaciones

A continuación, se analizan los resultados obtenidos del procedimiento de amasado de hormigón y el cálculo de la relación agua/cemento efectiva de cada una de las dosificaciones.

4.3.1.1. Amasado del hormigón reciclado

En la primera de las fases, se incorporaron los áridos reciclados, como sustitutos de los áridos naturales, sin tener en cuenta el efecto sobre la relación agua/cemento que su alta porosidad y absorción ejercería. Por ello, los hormigones reciclados de la primera fase presentan propiedades mecánicas sustancialmente superiores a las de los hormigones de control. El asiento del cono de Abrams se consiguió añadiendo mayores cantidades de aditivo superplastificante al aumentar el grado de sustitución. No obstante, las relaciones agua/cemento efectivas de los hormigones con incorporación de árido reciclado fueron menores que las de control.

Debido, por tanto, a los inconvenientes surgidos por la incorporación en estado seco de los áridos reciclados se decidió, en la segunda fase, presaturar los áridos gruesos por inmersión en agua durante 10 minutos, y escurrirlos durante otros 10 minutos, antes de su agregación a la mezcla. De esta manera, se pretende mantener una relación agua/cemento efectiva igual para las distintas sustituciones de cada uno de los seis tipos de hormigones reciclados analizados. En la tercera de las fases, a fin de obtener un mayor conocimiento del comportamiento del hormigón reciclado fresco y endurecido, se decidió modificar la metodología de presaturación, aplicándola exclusivamente al árido reciclado.

Como método de validación del protocolo de presaturación de la segunda y tercera fase, en primer lugar, se analiza la cantidad de agua que los áridos reciclados y los áridos gruesos son capaces de captar tras su inmersión en agua durante los 10 minutos y tras un escurrido de la misma duración. La Tabla 126 presenta los resultados obtenidos del pesaje de los áridos gruesos utilizados en la segunda fase

en condiciones normales, y de los mismos tras los 10 minutos de inmersión y escurrido.

Tabla 126. Resultados de la presaturación del árido grueso de la segunda fase.

Presaturación del árido grueso								
Hormigón:	H-0,65AS				H-0,50AS			
Sustitución:	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
P^{CL} [kg]:	47,2	45,2	42,4	37,9	48,7	46,9	44,4	40,4
P^{SAT} [kg]:	48,7	47,1	44,2	40,0	50,5	48,7	46,3	42,3
P^W [kg]:	1,5	1,9	1,8	2,1	1,8	1,8	1,9	1,9
Absorción ¹ [%]:	3,2	4,2	4,2	5,6	3,7	3,8	4,2	4,7

Aquí P^{CL} representa el peso en condiciones de laboratorio del árido grueso (incluida la humedad), P^{SAT} es el peso del árido en condiciones de presaturación, tras la inmersión y escurrido de todo el árido grueso y P^W es el peso del agua aportada a la amasada, obtenida a partir de la diferencia entre P^{SAT} y P^{CL} . Finalmente, se presenta la Absorción efectiva en porcentaje en peso, bajo las condiciones de saturación.

La Tabla 127 muestra los resultados de la semisaturación del árido reciclado utilizado en las amasadas correspondientes a la tercera fase.

Tabla 127. Resultados de la presaturación del árido reciclado de la tercera fase.

Presaturación del árido reciclado						
Relación w/c:	H-0,55ARS			H-0,45ARS		
Sustitución:	20%	50%	100%	20%	50%	100%
P^{CL} [kg]:	10,5	24,5	46,2	11,2	25,7	48,2
P^{SAT} [kg]:	10,9	25,7	48,5	11,7	27,0	50,7
P^W [kg]:	0,39	1,10	2,28	0,47	1,17	2,58
Absorción ² [%]:	3,7	4,5	5,0	4,2	4,5	5,4

¹ Cantidad de agua aportada tras 10 minutos de inmersión y 10 minutos de escurrido.

² Cantidad de agua aportada tras 10 minutos de inmersión y 5 minutos de escurrido. En esta ocasión, debido a que las cantidades de árido reciclado manejadas son notablemente menores que en el caso de la presaturación del conjunto de áridos, los 5 minutos de escurrido son suficientes para eliminar toda el agua sobrante.

donde P^{CL} es el peso en condiciones de laboratorio del árido reciclado (incluida la humedad), P^{SAT} es el peso del árido en condiciones de semisaturación, tras la inmersión y escurrido del árido reciclado, P^w es el peso del agua incorporada a la amasada y, finalmente, se representa la absorción efectiva en porcentaje en peso, bajo estas condiciones.

De los resultados obtenidos en el pesaje de los áridos antes y después de la saturación en las fases segunda y tercera, se deduce que el porcentaje de agua incorporada a la amasada es ligeramente superior a la propia absorción del árido, aunque ello no implica que el árido esté completamente saturado. En las investigaciones emprendidas por el CEDEX [58] se ha llegado a la conclusión que tras el proceso de inmersión, la saturación del árido alcanza aproximadamente el 70%, y el resto de agua asociada al árido puede tener su origen en el líquido que retiene el mismo en su superficie por adsorción, y, también, en los puentes de agua que se generan entre árido y árido ya que, al contrario de lo que sucede en el ensayo normalizado de determinación de la absorción de los áridos, en este caso el árido no se seca superficialmente.

Una manera alternativa de proceder, puede ser la de incorporar una cantidad extra de agua a la dosificación. Al igual que en el caso anterior, este agua intentaría compensar el agua absorbida por la porosidad del árido reciclado en el proceso de mezclado. Para los tiempos de amasado que se están empleando en este sentido, se estima que el árido reciclado alcanza aproximadamente el 70% de saturación, por lo que esta solución conduce a resultados similares a los conseguidos mediante la presaturación.

Tomando los valores del 70% de absorción a los 10 minutos como referencia, la cantidad de agua añadida a la mezcla que queda retenida por los áridos se puede cuantificar por la expresión (40).

$$w = w_{ef.} + w_{ab.} = w_{ef.} + \frac{0,7}{100} \sum_i (P_i A_i) \quad (40)$$

donde w es la cantidad total de agua incorporada en la hormigonera, $w_{ef.}$ es la cantidad de agua efectiva disponible para amasar la mezcla, y $w_{ab.}$ es la cantidad de

agua que retiene el árido, y que supone una merma en la relación agua/cemento debida a la absorción de los áridos. Por su parte, P_i y A_i son, respectivamente, el peso, en kilos, y la absorción, en tanto por ciento, del componente i que se añade a la dosificación.

4.3.1.2. Relación agua/cemento efectiva

Dadas las tres distintas metodologías de amasado seguidas en cada una de las correspondientes fases, es necesario establecer, para cada una de las dosificaciones, la relación agua/cemento efectiva.

El cálculo de la relación agua/cemento efectiva, se debe realizar basándose en el valor de w_{ef} que resulta al despejar la ecuación (40). Así, para la primera fase se obtiene:

$$\left\{ \frac{W}{C} \right\}_{ef.}^I = \frac{w - \frac{0,7}{100} (P_G^{CL} \cdot A_G + P_g^{CL} \cdot A_g + P_{AR}^{CL} \cdot A_{AR})}{C} \quad (41)$$

En la segunda de las fases, el procedimiento de amasado implica la saturación del conjunto de áridos gruesos. Los resultados recogidos en la Tabla 126 sugieren que, en este caso, el procedimiento supone la incorporación de una cantidad de agua mayor a la dosificada y proporcional a la cantidad de árido grueso utilizado. La siguiente fórmula, determina la relación agua/cemento efectiva cuando el proceso de presaturación se realiza sobre el conjunto de áridos gruesos (AG):

$$\left\{ \frac{W}{C} \right\}_{ef.}^{II} = \frac{w - \frac{0,7}{100} (P_G^{CL} \cdot A_G + P_g^{CL} \cdot A_g + P_{AR}^{CL} \cdot A_{AR}) + (P_{AG}^{SAT} - P_{AG}^{CL})}{C} \quad (42)$$

Finalmente, en la tercera de las fases, la incorporación del árido reciclado presaturado, como se desprende de los resultados de la Tabla 127, supone un aumento en la relación agua/cemento proporcional a la cantidad de árido reciclado incorporado. La siguiente fórmula, permite determinar la relación agua/cemento

efectiva del hormigón cuando se presatura, mediante el procedimiento descrito anteriormente, el árido reciclado (AR):

$$\left\{ \frac{W}{C} \right\}_{ef.}^{III} = \frac{W - \frac{0,7}{100} (P_G^{CL} \cdot A_G + P_g^{CL} \cdot A_g + P_{AR}^{CL} \cdot A_{AR}) + (P_{AR}^{SAT} - P_{AR}^{CL})}{C} \quad (43)$$

donde:

- $\left\{ \frac{W}{C} \right\}_{ef.}^i$ es la relación agua/cemento efectiva de la fase i : I; II y III.
- W es la cantidad de agua empleada en la dosificación sin cuantificar la humedad.
- P_i^{CL} es el peso en condiciones de laboratorio del árido i : grava (G); gravilla (g) y árido reciclado (AR).
- P_i^{SAT} es el peso del árido i tras la condición de presaturación: árido grueso (AG) y árido reciclado (AR).
- A_i es la absorción total del árido i : grava (G); gravilla (g) y árido reciclado (AR).

Siguiendo estas premisas, se han calculado las relaciones agua/cemento efectivas de cada una de las dosificaciones para, así, poder establecer comparaciones entre las distintas propiedades del hormigón reciclado. Dadas las características físicas de los áridos y los resultados presentados en las Tabla 126 y Tabla 127, la relación agua/cemento efectiva de cada una de las dosificaciones se presenta en la Tabla 128.

A la vista de los resultados, existe una fuerte disminución en la relación agua/cemento efectiva en los hormigones preparados en la primera fase de la investigación proporcional al grado de incorporación del árido reciclado, pasándose de un 0,65 dosificado a un 0,54 efectivo, en un caso, y de 0,50 a un 0,42, en el otro, cuando la sustitución es total.

En lo referente a la segunda fase, cuando la saturación se realiza sobre el conjunto de áridos gruesos, tiene lugar un aporte extra de agua, también proporcional al grado de sustitución. En este caso, las diferencias encontradas entre los distintos hormigones es pequeña, obsérvense los resultados relativos al hormigón H-0,50AS.

Tabla 128. Relación agua/cemento efectiva de cada una de las dosificaciones.

Hormigón		Relación w/c efectiva			
		Grado de sustitución			
		0%	20%	50%	100%
Fase I	H-0,65	0,60	0,59	0,57	0,54
	H-0,50	0,46	0,45	0,44	0,42
Fase II	H-0,65AS	0,67	0,68	0,67	0,70
	H-0,50AS	0,53	0,53	0,53	0,52
Fase III	H-0,55ARS	0,51	0,52	0,54	0,58
	H-0,45ARS	0,42	0,42	0,44	0,49

Finalmente, en el caso de la tercera fase, cuando se presatura únicamente el árido reciclado tiene lugar una disminución de la relación agua/cemento teóricamente dosificada cuando el grado de incorporación es menor del 50% y un aumento cuando es superior a este porcentaje, presumiblemente asociado a un escurrido insuficiente.

En adelante, las comparaciones realizadas entre las propiedades de los distintos hormigones reciclados tendrán como referencia común la relación agua/cemento efectiva, calculada mediante la formulación descrita.

4.3.2. Condiciones de curado en intemperie marina

El análisis de las condiciones de temperatura y humedad promedio de curado de los hormigones expuestos a un ambiente IIIa, conduce a una serie de consideraciones generales que se recogen a continuación.

En primer lugar, entre los hormigones analizados a los 28 días de edad, aquéllos que se han visto sometidos a mejores condiciones de curado han sido los correspondientes a la primera fase. Por otra parte, se destaca la alta humedad registrada durante los meses de marzo y abril, bajo la que han curado los hormigones

de la tercera fase (año 2009); no obstante, la temperatura se encuentra notablemente por debajo que en el caso de los meses de mayo y agosto, meses en los que se sitúan los 28 primeros días de los hormigones de la primera fase. Por último, las peores condiciones están asociadas al hormigón de la segunda fase, por lo que se espera encontrar, entre estas dosificaciones, alguna diferencia para esta edad, entre los hormigones curados en cámara y en intemperie.

De igual forma, los hormigones de la segunda fase, analizados a los 180 días de edad, han estado expuestos a unas condiciones climáticas peores que los hormigones de las otras dos fases.

Por último, la temperatura promedio de curado en intervalos de un año ha sido muy similar en todos los casos. Sin embargo, entre los hormigones ensayados a los 365 días de edad podrían encontrarse discordancias debido a que el año 2008 (segunda fase) fue, de entre los cuatro, el más seco de todos.

En nuestro caso, las probetas fueron expuestas al ambiente marino tras su desmoldeo a las 24 horas de su fabricación.

4.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

A continuación, se analizan las propiedades del hormigón reciclado en estado fresco registradas durante su fabricación.

4.4.1. Temperatura

En la primera de las fases, se ha registrado un aumento medio de temperatura del hormigón en estado fresco, tanto mayor cuanto mayor es el grado de incorporación de árido reciclado. Este efecto puede ser achacado a la pérdida de fluidez de la masa debida a la absorción del árido reciclado. Motivo por el cual el rozamiento de las palas de la amasadora y las primeras reacciones del cemento elevan la temperatura de la mezcla.

En cuanto a la temperatura de los hormigones de la segunda fase, no se observa un aumento significativo con el grado de sustitución, como en la primera de las fases ya que, en este caso, se mantiene aproximadamente constante la relación agua/cemento y la cantidad de cemento para los cuatro grados de sustitución del hormigón H-0,65AS y H-0,50AS. Se han registrado, en esta fase, aumentos de temperatura en torno a los 0,02 °C por kilogramo de cemento.

En el caso de los hormigones preparados en la tercera fase, H-0,55ARS y H-0,45ARS, los de menor relación agua/cemento y mayores contenidos de cemento, 380 y 385 kg/m³ respectivamente, se observa un aumento de la temperatura de en torno a 0,03 °C por kilogramo de cemento.

4.4.2. Consistencia o trabajabilidad

La alta porosidad y absorción del árido reciclado condiciona la cantidad de agua libre presente en el hormigón en masa, que es responsable principal de las propiedades reológicas del hormigón. Se han presentado diferentes soluciones para controlar este inconveniente.

Si los áridos reciclados se introducen secos en la hormigonera y se mantienen las relaciones agua/cemento de la dosificación de control, puede compensarse la

disminución de agua efectiva con la incorporación de aditivos superplastificantes, tal y como se procedió en la primera de las fases. Dicha disminución del agua efectiva repercute en las prestaciones que muestran los hormigones con alto grado de sustitución, siendo superiores a las que ofrece el propio hormigón de control.

Siguiendo con los mecanismos disponibles para alcanzar una determinada consistencia o trabajabilidad del hormigón reciclado en estado fresco, una segunda opción se encuentra en la adición de una cantidad mayor de agua de amasado. Ésta ha sido la metodología seguida en las fases segunda y tercera: saturación del árido grueso y reciclado, respectivamente. No obstante, bajo estas condiciones, la consistencia no es lo suficientemente fluida, razón por la cual se complementó con un aditivo superplastificante.

En la segunda fase, hormigones H-0,65AS y H-0,50AS, la saturación de los áridos gruesos, junto con la misma proporción de aditivo superplastificante (un 0,7 % respecto del peso de cemento), proporciona valores de consistencia similares para todas las dosificaciones. Esto hace suponer que la relación agua/cemento efectiva de las amasadas correspondientes es la más parecida, entre los distintos grados de sustitución, de las tres fases.

En el caso de los hormigones reciclados fabricados mediante saturación previa de los áridos reciclados, tercera fase, puede observarse una mayor fluidez de aquéllos que presentan mayor grado de sustitución. Este efecto es debido a la mayor cantidad de agua aportada en la saturación de los mismos, principalmente, en superficie. En este caso, y debido al aporte de agua de los áridos reciclados, la demanda de aditivo superplastificante ha sido menor a medida que se incorpora mayor cantidad de árido reciclado. Por otro lado, la cantidad de aditivo superplastificante ha sido mayor en los hormigones de control de la tercera fase, en comparación con los de la segunda fase, debido a la menor relación agua/cemento teórica propuesta.

De los resultados de consistencia del hormigón en estado fresco obtenidos en las tres fases puede deducirse que, en primer lugar, la sustitución directa de áridos naturales por áridos reciclados secos (más absorbentes que los naturales) reduce la relación agua/cemento efectiva en una cuantía proporcional al porcentaje sustituido y absorción del mismo de estos áridos. En segundo lugar, la saturación del conjunto de

áridos gruesos proporciona, sin necesidad de modificaciones en el porcentaje de aditivo, la misma consistencia y trabajabilidad en todos los grados de sustitución. Por último, cuando son saturados exclusivamente los áridos reciclados, deberá prestarse especial atención a la cantidad de agua que aportan éstos en superficie y/o entre partículas, regulando los tiempos de saturación o la cantidad de agua libre que se añade a la mezcla.

4.5. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

Seguidamente, se revisan los resultados relativos a las propiedades físicas del hormigón reciclado.

En primer lugar, se valoran los resultados correspondientes a la densidad relativa. Esta densidad, la resultante del cociente entre el peso seco de la muestra y el volumen relativo de la misma, se ha calculado en base a las mediciones realizadas sobre tercios de probetas cilíndricas normalizadas, promediándose los valores obtenidos en diferentes tercios de las mismas. Se ha encontrado que el tercio inferior es aproximadamente un 0,5% más denso que el tercio superior, situándose el tercio central entre estos dos valores. El motivo, independientemente del tipo de compactación llevado a cabo, es el mayor acomodo que sufren los niveles inferiores de las probetas cilíndricas normalizadas y la acumulación mayor de burbujas de aire retenido en los niveles superiores. En el estudio de la macroporosidad se analiza, en mayor detalle, esta última afirmación.

Igualmente, se observa cierta variabilidad en cuanto a la porosidad y la absorción cuando éstas se refieren a muestras obtenidas a diferentes alturas de las probetas cilíndricas normalizadas. En el caso de la porosidad, como se ha adelantado, la mayor concentración de aire retenido supone un aumento de la porosidad y, consecuentemente, un aumento del coeficiente de absorción.

4.5.1. Densidad relativa

Inicialmente, se analizan, detalladamente, los resultados relativos a la densidad relativa de los hormigones reciclados.

4.5.1.1. Análisis de resultados por fases

Los resultados se chequean ordenados según clase y edad del hormigón, comparándose los valores de cámara normalizada y ambiente marino.

De la observación de los resultados de la primera fase se deduce que la densidad del hormigón reciclado disminuye al aumentar el grado de sustitución, haciéndose más

significativo el descenso cuando la sustitución es total. Del análisis de los valores de los hormigones H-0,65 y H-0,50 a los 28 días de edad, se desprende que existe una disminución de la densidad relativa de, aproximadamente, un 1,5% en el hormigón con 100% de sustitución.

Del análisis de la influencia ambiental, se comprueba que los H-0,65 y H-0,50 con 28 días de edad registran una evolución paralela frente a los dos distintos ambientes de curado, con valores menores para aquéllos hormigones curados en ambiente marino. Este efecto se ve acentuado en el caso del H-0,50. En general, los valores medidos de densidad, para ambas clases de hormigón, son ligeramente menores cuando el curado es en intemperie.

En cuanto al análisis de la evolución temporal, puede observarse cómo a los 365 días de edad se alcanzan valores de la densidad relativa hasta un 2% superiores a los registrados a los 28 días. De ello se deduce que se trata, tanto en los hormigones de control como en los reciclados, de una propiedad de pequeña evolución. Finalmente, a la edad de 365 días, la densidad del H-0,65 se sitúa en el intervalo 2,38-2,41 g/cm³ y la del H-0,50 entre los 2,43-2,48 g/cm³.

De forma similar al comportamiento observado en la primera campaña, en la segunda de las fases la incorporación de árido reciclado al hormigón supone, como es previsible, una disminución en la densidad relativa. Tomando como referencia los valores registrados a los 28 días de edad, para los hormigones reciclados H-0,65AS y H-0,50AS, se observa una disminución de la densidad relativa de en torno al 3,5% cuando la sustitución de árido natural por árido reciclado alcanza el 100%.

En lo referente a los cambios con la edad, revisando los valores obtenidos a 180 y 365 días, se confirma que la densidad relativa evoluciona muy débilmente pasados los primeros estadios de curado.

Siguiendo con el análisis de los resultados de la segunda fase, la comparación de sometimiento a diferentes curados, cámara e intemperie, arroja, como conclusión, que ambos ambientes propician evoluciones similares en los procesos de ganancia de densidad.

En el caso de la tercera fase, se observa, nuevamente, cómo la incorporación de un componente de menor densidad, como es el árido reciclado, supone una disminución de la densidad de los hormigones reciclados en comparación con los hormigones de control. Esta disminución, tomando como referencia los hormigones de control con 28 días de edad, puede cuantificarse en torno a un 3,5% para el H-0,55ARS y de un 5% para el H-0,45ARS. En el primer caso, los valores de densidad varían dentro del intervalo de 2,40 y 2,31 g/cm³ para el hormigón de control y 100% reciclado, respectivamente. En el caso del hormigón H-0,45ARS los valores de densidad relativa se encuentran entre 2,46 g/cm³ para el hormigón de control y 2,33 g/cm³ para el hormigón fabricado con incorporación total de árido grueso reciclado.

En cuanto a la evolución temporal de los hormigones reciclados de la tercera fase, a los 365 días de edad se alcanzan, también, porcentajes entre un 1% y un 2% de la densidad registrada a los 28 días de edad. En suma, de nuevo se observa que la densidad se ve disminuida proporcionalmente al porcentaje de incorporación de árido reciclado, siendo ésta pérdida ligeramente mayor en el caso de los hormigones con baja relación agua/cemento y cantidades mayores de cemento.

4.5.1.2. Densidad frente a la relación agua/cemento

La representación de la densidad relativa de todas las relaciones agua/cemento efectivas para cada uno de los grados de sustitución, demuestra que existe relación entre ambos parámetros. Así, la Fig. 178 recoge los datos de densidad relativa obtenidos para los hormigones de control y reciclados de las tres fases, y con una edad de 28 días, frente a la relación agua/cemento efectiva.

En el caso de la densidad relativa de los hormigones de control y reciclados con 28 días de edad curados en ambiente normalizado, se observa una clara tendencia de ésta a aumentar de forma lineal con la disminución de la relación agua/cemento. Además, todos los grados de sustitución evolucionan de forma paralela al disminuir tal relación.

Las Fig. 179 y Fig. 180 recogen la evolución de la densidad relativa de los hormigones reciclados con 180 días y 365 días de edad, curados ambos, como en el caso anterior, en cámara climática y por lo tanto con condiciones ideales de temperatura y humedad.

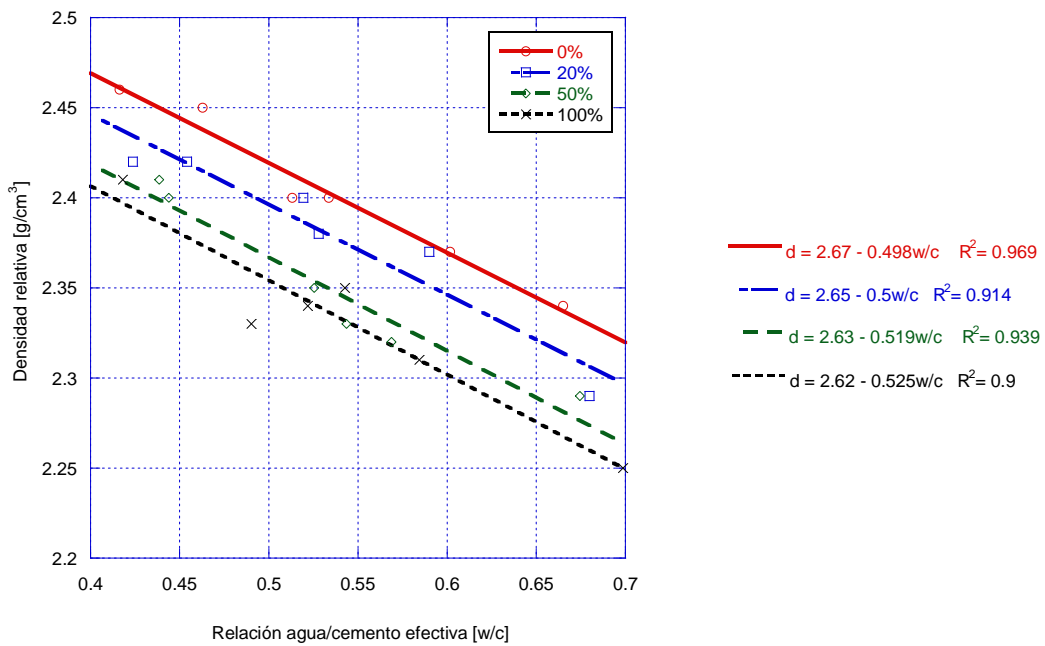


Fig. 178. Densidad relativa frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

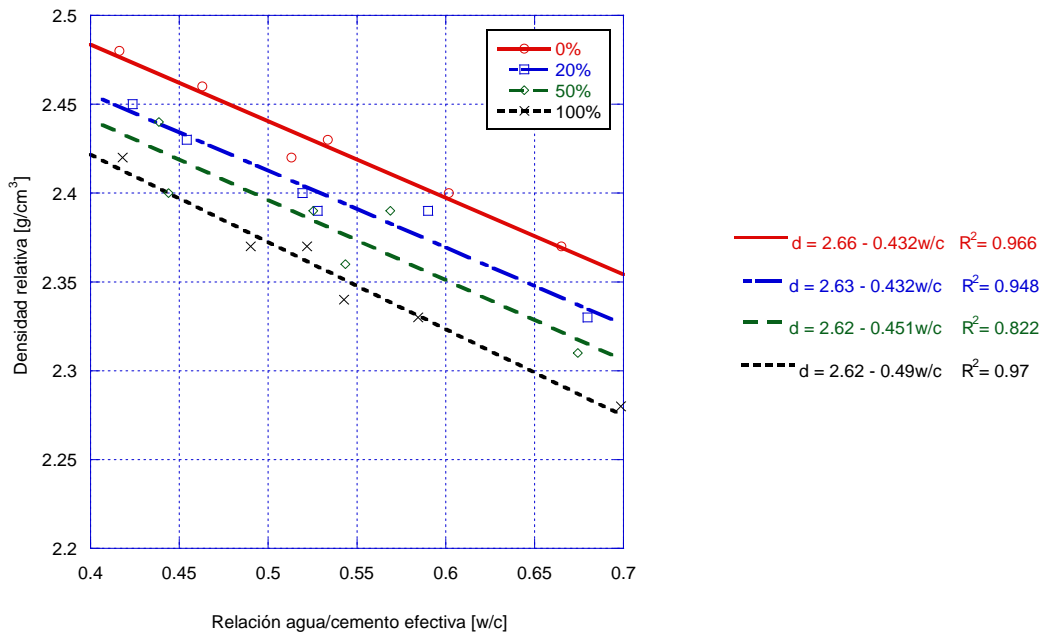


Fig. 179. Densidad relativa frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

Como ya se comentó, la evolución de la densidad, pasados los 28 días de edad del hormigón de control y reciclado, es muy pequeña y, por ello, las representaciones a 180 y 365 días son muy similares a la primera.

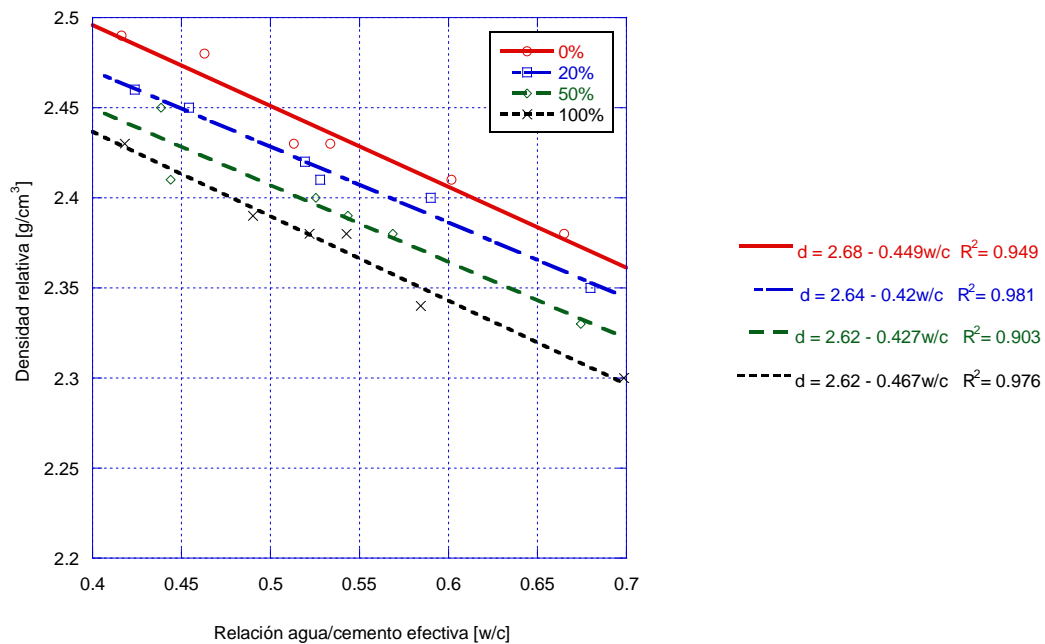


Fig. 180. Densidad relativa frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

El mismo comportamiento se detecta en el caso del hormigón curado en ambiente marino, véase el Anejo V adjunto a esta Tesis. En este ambiente los valores de densidad se sitúan, aproximadamente, un 1% por debajo de los valores obtenidos en cámara de humedad.

De forma general, la sustitución de un 20% de árido natural por reciclado conduce a una pérdida de densidad de $0,02 \text{ g/cm}^3$, de $0,04$ $0,02 \text{ g/cm}^3$ con una incorporación del 50% y de $0,06$ $0,02 \text{ g/cm}^3$ al dosificar con el 100% de grava reciclada. Por otro lado, variaciones en la relación agua/cemento de 0,1 suponen cambios de $0,05$ $0,02 \text{ g/cm}^3$ en la densidad de los hormigones.

4.5.2. Coeficiente de absorción

Dentro de lo concerniente a las propiedades físicas de los hormigones reciclados, en segundo lugar, se analizan los resultados relativos al coeficiente de absorción de los mismos.

4.5.2.1. Análisis de resultados por fases

La incorporación del árido reciclado supone, en la primera fase, una reducción del coeficiente de absorción del hormigón elaborado con el mismo. Así, para el hormigón que contiene el 100% de grava reciclada el coeficiente de absorción del hormigón un 10% en comparación con el coeficiente de absorción del hormigón de control. Por otra parte, si se comparan los coeficientes de absorción de los hormigones curados en distintos ambientes se encuentra que la diferencia entre los curados en cámara e intemperie se ve reducida con la incorporación del árido reciclado. Es decir, los hormigones con menor relación agua/cemento efectiva se ven menos influenciados por el ambiente de curado al que permanecen expuestos.

Siguiendo con los hormigones correspondientes a la primera fase, H-0,65 y H-0,50, con relación a la evolución temporal, a los 365 días de edad la disminución del coeficiente puede cuantificarse en un 12%, siendo menor a medida que aumenta el grado de sustitución.

Téngase en cuenta, como ya se ha indicado anteriormente, que la absorción está muy influenciada por la densidad del material. Así, los hormigones con altos grados de sustitución, que presentan densidades menores, proporcionarán coeficientes de absorción mayores que los hormigones de control que absorben la misma cantidad de agua.

En cuanto a los resultados relativos a la determinación del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados H-0,65AS y H-0,50AS correspondientes a la segunda fase de la investigación, se observa que, en términos generales, el coeficiente de absorción aumenta con el grado de sustitución. En particular, a los 28 días de edad, la diferencia entre los hormigones de control y aquéllos con incorporación total de árido reciclado suponen un aumento de en torno al 40% con relación al coeficiente de absorción correspondiente. Cuando se comparan los valores del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados curados en cámara e intemperie, se observan disminuciones en el coeficiente del 10% haciéndose ésta diferencia menor con el paso del tiempo.

Del análisis de la evolución temporal de los hormigones reciclados de la segunda fase, se desprende que la absorción disminuye al año entre un 15 y un 20%

correspondiendo los mayores porcentajes a los hormigones con mayor porcentaje de sustitución.

En cuanto a los resultados relativos a la determinación del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados, H-0,55ARS y H-0,45ARS, correspondientes a la tercera fase de la investigación, en términos generales, como viene siendo recogido en anteriores análisis, la incorporación de árido reciclado, en todas las observaciones realizadas, supone un aumento del coeficiente de absorción del hormigón reciclado. Cuando estos mismos hormigones han curado en un ambiente desfavorable, como es el caso de la intemperie marina, los valores que se obtienen guardan la misma relación que cuando el curado es en cámara de humedad.

Como era de esperar, el menor valor del coeficiente de absorción (3,87%), dentro de esta fase, lo presenta el hormigón de control H-0,45ARS a los 365 días de edad curado en cámara y la mayor absorción de todas (6,81%) la muestra el hormigón 100% reciclado curado en intemperie marina a la edad de 28 días.

4.5.2.2. Coeficiente de absorción frente a la relación agua/cemento efectiva

A continuación, se analiza el coeficiente de absorción de todas las relaciones agua/cemento efectivas para cada uno de los grados de sustitución. La Fig. 181 recoge los datos del coeficiente de absorción de los hormigones de control y reciclados de las tres fases curados en cámara de humedad y con una edad de 28 días.

En la Fig. 181, se observa una clara tendencia de la capacidad absorbente a aumentar de forma logarítmica con el aumento de la relación agua/cemento efectiva. El hormigón es tanto más absorbente cuanto mayor es la relación agua/cemento y el grado de sustitución. Por ejemplo, en el caso del hormigón con una relación agua/cemento de 0,65, el aumento de absorción por incorporación de un 100% de árido reciclado pasa de 6,2% a 8,4%, siendo el aumento de un 35%.

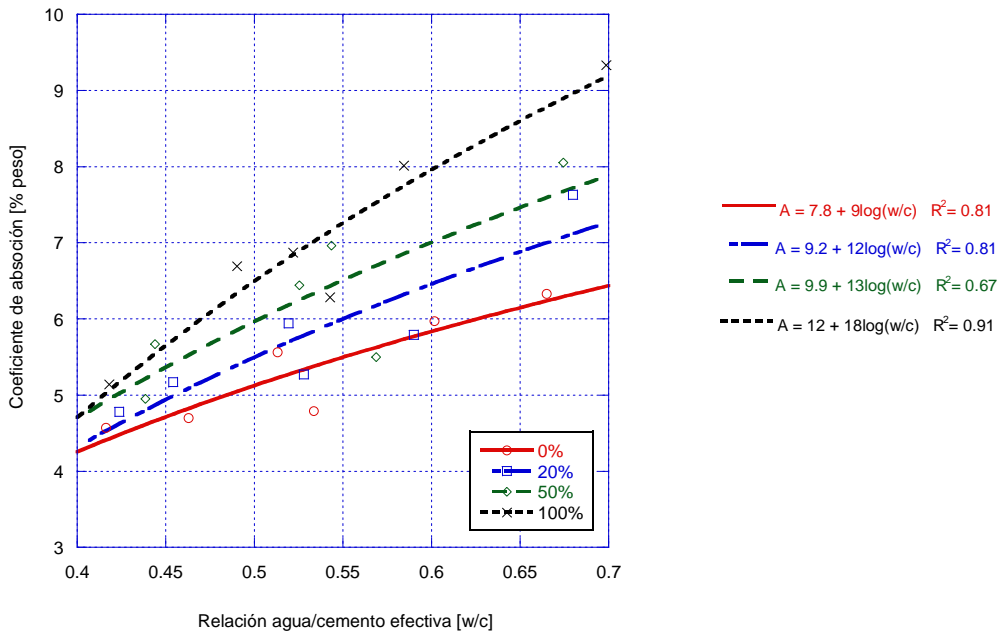


Fig. 181. Coeficiente de absorción frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

Las Fig. 182 y Fig. 183 recogen la evolución del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados con 180 días y 365 días de edad curados en cámara de humedad.

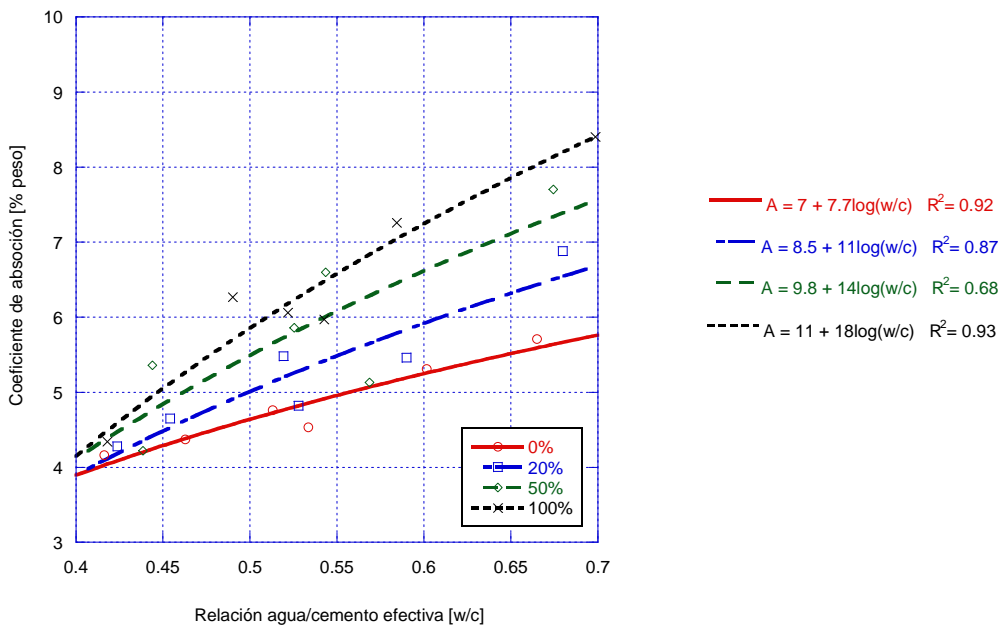


Fig. 182. Coeficiente de absorción frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

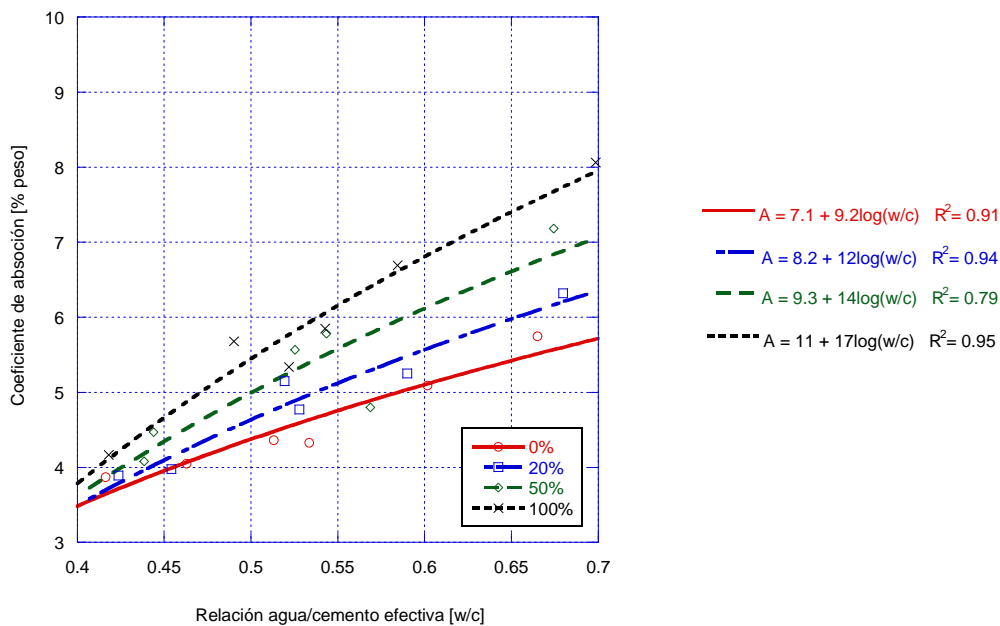


Fig. 183. Coeficiente de absorción frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

Al comparar las tres figuras anteriores, se comprueba que, con el tiempo, los hormigones con altos porcentajes de sustitución y para relaciones agua/cemento elevadas, tienden a reducir la diferencia existente a primeras edades del valor de su coeficiente de absorción comparado con el hormigón patrón.

La introducción del árido reciclado penaliza la capacidad absorbente del hormigón. La sustitución de lasta el 20% incrementa un 1% el coeficiente de absorción y si se emplea el 100% de grava reciclada, el aumento puede alcanzar el 2%.

4.5.2.3. Coeficiente de absorción frente a la densidad

A continuación, en la Fig. 184, se representa el coeficiente de absorción de los distintos hormigones reciclados frente a la densidad de los mismos. Como puede comprobarse, existe una relación exponencial entre los dos parámetros, tendiendo las curvas de los distintos grados de sustitución a confluir cuando la densidad se sitúa por debajo de los $2,3 \text{ g/cm}^3$ y la absorción por encima del 8%. En este punto, la densidad del hormigón se aproxima a la densidad del árido reciclado y en estas condiciones el efecto de absorción pasa a estar gobernado por la capacidad absorbente de la pasta de cemento, dejando de ser influyente la absorción del propio árido reciclado.

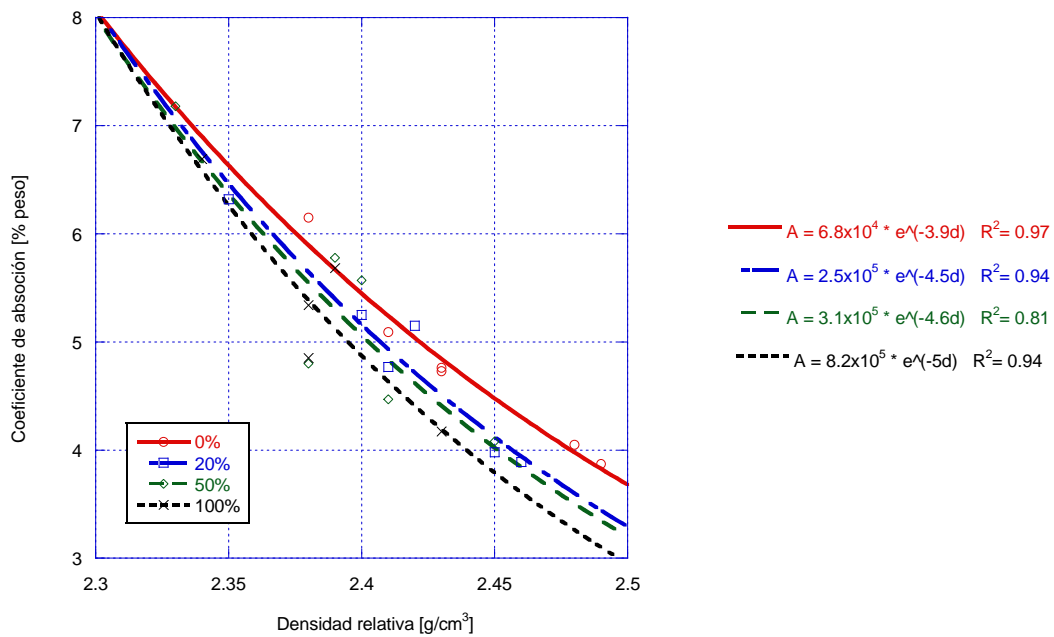


Fig. 184. Coeficiente de absorción frente a la densidad relativa de los hormigones reciclados con 365 días curados en cámara de humedad.

4.5.3. Porosidad accesible

Se insiste en que la utilización para la fabricación de hormigón estructural del árido grueso reciclado, con niveles de sustitución altos, está condicionada por su elevada absorción. Así, la comparación de la porosidad accesible en hormigones reciclados y convencionales con la misma dosificación (igual relación agua/cemento) puede llevar a resultados diferentes según cómo se compense dicha absorción: presaturando la grava reciclada o bien utilizando un aditivo superplastificante, ya que en este último caso los hormigones reciclados que se fabrican tienen una relación agua/cemento efectiva inferior.

4.5.3.1. Análisis de resultados por fases

En la primera fase de la investigación se utilizó el árido reciclado seco y un aditivo superplastificante para lograr la consistencia deseada. El hormigón reciclado obtenido, debido a su menor relación agua/cemento efectiva, ha proporcionado resultados comparables e, incluso, superiores a los hormigones de control respectivos.

En concordancia con resultados previos, cuando el árido grueso se utiliza saturado, los hormigones reciclados son más porosos que los hormigones de control, tanto más cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado sustituido.

Se observa, en todos los casos, una disminución de la porosidad accesible con el tiempo. A los 180 días de edad esta disminución se sitúa en torno al 1% y al 2% para los 365 días de edad. La mayor reducción en el valor de la porosidad accesible tiene lugar en hormigones con altos grados de incorporación de árido reciclado y, especialmente, sobre aquéllos que presentan mayores porosidades a cortas edades.

4.5.3.2. Porosidad accesible frente a la relación agua/cemento efectiva

En las Fig. 185, Fig. 186 y Fig. 187, se muestran las curvas porosidad accesible-relación agua/cemento efectiva una vez ajustada esta última.

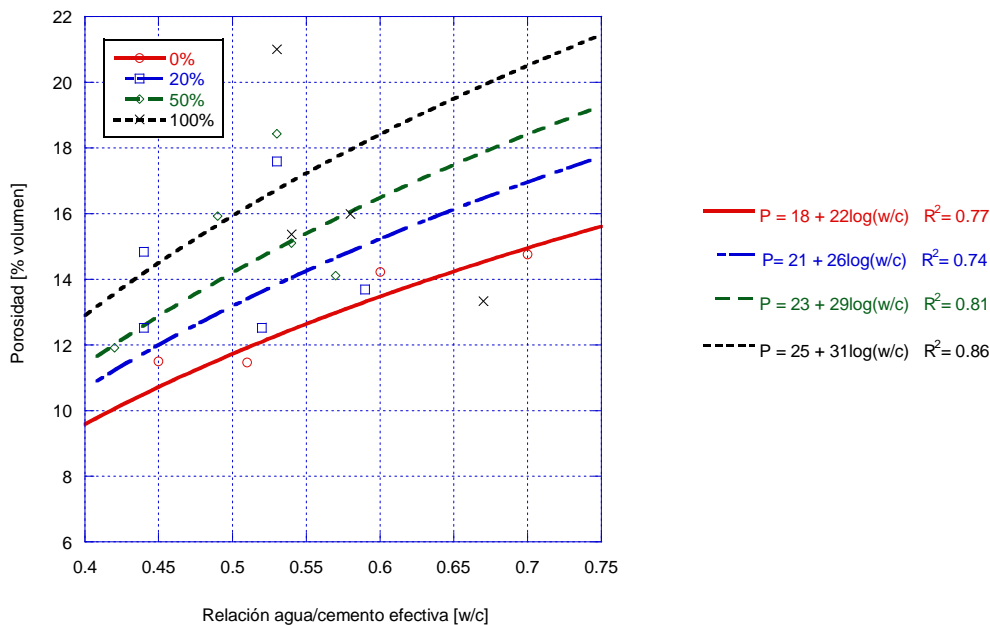


Fig. 185. Porosidad accesible frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

En el caso de curado en cámara de humedad, se observa que para iguales relaciones agua/cemento la porosidad accesible del hormigón reciclado, en comparación con el hormigón de control, es tanto mayor cuanto mayor es la relación agua/cemento y el grado de sustitución.

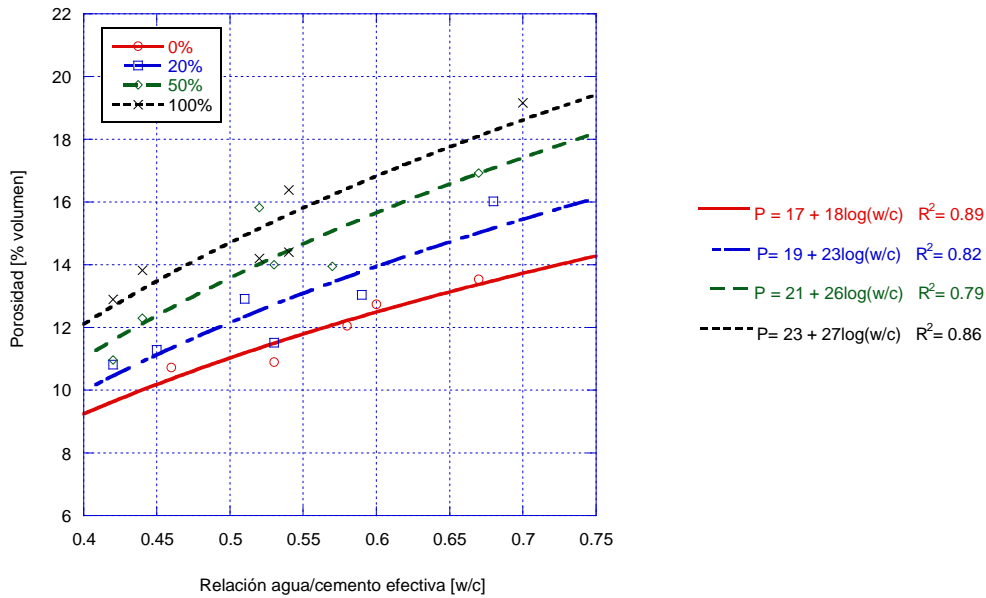


Fig. 186. Porosidad accesible frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

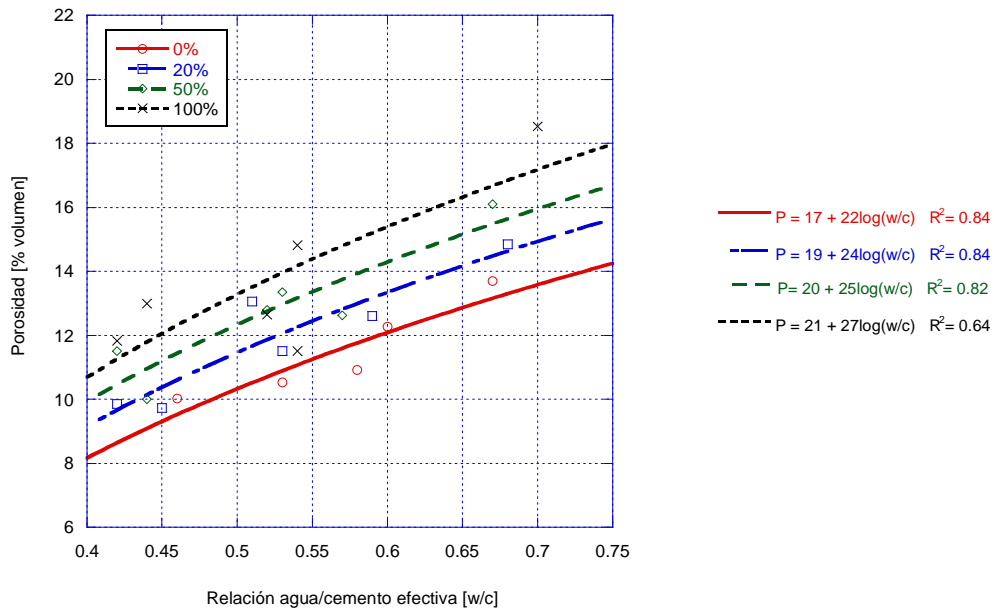


Fig. 187. Porosidad accesible frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

En cuanto al hormigón curado en ambiente marino (ver Anejo V), las curvas de comportamiento, para distintas edades, evidencian una mayor dispersión que las obtenidas a partir de los hormigones curados en cámara. No obstante, los valores

medios de éstos presentan una clara tendencia, como en análisis anteriores, situándose por debajo de aquellas probetas curadas en ambiente ideal.

En concordancia con análisis previos, se observa que las curvas de tendencia confluyen cuando la relación agua/cemento es pequeña. Así, en términos de durabilidad, esto supone que la incorporación de árido reciclado penaliza en mayor medida a los hormigones de poca calidad, efecto que se ve atenuado por la influencia de pastas de cemento más compactas.

De los resultados obtenidos, puede concluirse que, en todos los casos, la incorporación de árido reciclado implica un aumento de la porosidad accesible del hormigón. En particular, para una incorporación de un 20% y una relación agua/cemento del hormigón de control de 0,65, sería necesario disminuir esta relación en, aproximadamente, 0,05 puntos. Por su parte, si se incorpora un 50% de árido reciclado, la disminución en la relación agua/cemento que mantiene idéntica porosidad, debería ser de un 0,1 menor.

4.5.3.3. Porosidad accesible frente a la densidad

La Fig. 188 recoge la relación entre la porosidad accesible y la densidad aparente de los hormigones de los distintos grados de sustitución.

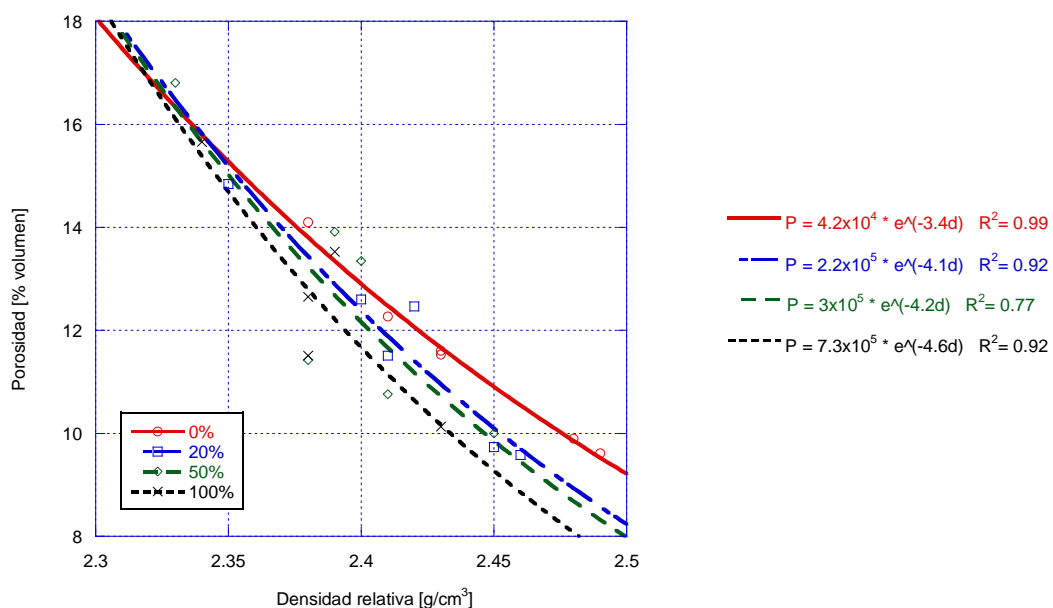


Fig. 188. Porosidad accesible frente a la densidad aparente de los hormigones reciclados con 365 días curados en cámara de humedad.

Nuevamente existe una relación de tipo exponencial entre la porosidad accesible y la densidad del hormigón reciclado. Nótese que las curvas correspondientes a los hormigones con distintos grados de sustitución (0%, 20%, 50% y 100%) tienden a confluir cuando la porosidad se sitúa por encima del 18% evidenciándose que es menor la influencia del árido reciclado cuando la porosidad del hormigón es alta o la densidad baja.

4.5.4. Macroporosidad

A continuación, se analizan los resultados relativos a con la macroporosidad de los hormigones reciclados.

4.5.4.1. Distribución de la macroporosidad en altura

En primer lugar, cabe destacar que, como se suponía, existe un gradiente en la distribución de los macroporos con la altura. Todas las probetas analizadas presentan un mayor número de poros y una mayor macroporosidad a medida que la sección analizada avanza en altura. No obstante, la evolución observada es dispar según qué parámetro se analice, número de macroporos o macroporosidad, y diferente para los distintos grados de sustitución y clase resistente.

En lo referente al número de poros del hormigón H-0,65 respecto de la altura, se observa una notable evolución. En la sección 4, la más baja de todas, el número de poros se sitúa entre los 245 y 302, para el hormigón de control y para el totalmente reciclado, respectivamente, observándose una singularidad en el de 20% de sustitución. En términos generales, el número de macroporos aumenta al aumentar el grado de sustitución. En cuanto a su distribución en altura, el número de macroporos aumenta, para todos los grados de sustitución, de forma gradual hasta situarse, en la sección 1, en un valor que duplica el correspondiente a la sección 4. Esta misma evolución se observa en los hormigones H-0,50. No obstante, estos últimos hormigones presentan una estructura considerablemente más cerrada; en este caso, la evolución creciente en altura del número de macroporos se ve atenuada, especialmente en el caso del hormigón de control.

La distribución en altura del número de poros parece ser debida a la propia naturaleza de los macroporos. Su forma esférica, representada en las secciones en forma de

círculos, sugiere que la mayoría de ellos se origina a consecuencia de burbujas de aire atrapado. En este sentido, una mayor fluidez del hormigón en estado fresco favorece el ascenso del aire atrapado acentuando el gradiente en altura. No obstante, este efecto parece tener mayor influencia en la macroporosidad, expresada en porcentaje de superficie de poros frente a la superficie total analizada, que sobre el número de estos poros. De ello se deduce que, especialmente en el caso del hormigón H-0,50, el tamaño medio de los macroporos de las secciones superiores es mayor que en el de las inferiores. Téngase en consideración, como explicación a las desviaciones obtenidas, que durante esta fase el método de compactación fue el de picado con barra. Se desprende de los resultados que la incorporación de árido reciclado supone un notable aumento de la macroporosidad, para todos los niveles de altura, y especialmente sobre los hormigones H-0,50.

4.5.4.2. Número de macroporos en función de la distancia

En términos generales, analizando la distribución de poros en función de la distancia al centro de la probeta, se comprueba que la mayor densidad de poros se encuentra en los bordes perimetrales de la sección de la misma, detectándose un aumento en el número de ellos a medida que aumenta también el porcentaje de sustitución.

En cuanto a la distribución de poros en los hormigones de control curados en cámara e intemperie, se confirma la distribución creciente en número de poros desde el centro hacia el perímetro de la probeta. Igualmente, es de destacar que el hormigón curado en intemperie presenta un mayor número de macroporos perimetrales, observándose también una mayor densidad de poros exteriores para este tipo de curado.

Para el hormigón de clase resistente H-0,65 con un 50% de sustitución de árido reciclado, se observa que, excepcionalmente, el número de poros concentrados en el exterior de la probeta no es mayor para el hormigón curado en intemperie marina. No obstante, el número global de poros sí que es mayor, encontrándole de forma más distribuida a lo largo de todo el radio de la sección. Nuevamente, el hormigón curado en intemperie presenta un número mayor de poros distribuidos más homogéneamente que en el caso del curado en cámara.

En lo referente al hormigón de clase resistente H-0,50, se deduce que el aumento en la cantidad de cemento y la disminución en la relación agua/cemento supone, como cabía esperar, una importante reducción del número de poros.

En los resultados del hormigón reciclado H-0,50 con un 20% de sustitución se observa un fuerte aumento en el número de poros total y, especialmente, los encontrados en el perímetro de la probeta curada en ambiente marino. La incorporación de un 20% de árido reciclado al hormigón H-0,50 curado en cámara no supone, en cambio, un aumento significativo en el número de poros y su distribución. Por otra parte, se observa en los hormigones con 50% de sustitución, en relación a hormigones con menor grado de incorporación, un fuerte aumento en el número y densidad en el exterior, principalmente en el hormigón curado en cámara.

En último lugar, de los resultados obtenidos para el hormigón H-0,50 completamente reciclado se deduce que el número de poros, para los dos ambientes de curado, aumenta considerablemente en comparación con el resto de los hormigones reciclados H-0,50. No obstante, el curado en ambiente marino presenta una distribución algo más homogénea que el curado en cámara de humedad.

En definitiva, existe una evidente relación entre el número de poros y el tamaño de los mismos. La tendencia más clara puede observarse cuando se analiza la superficie o volumen total de poros. La distribución de poros respecto de la distancia al centro de la probeta presenta ciertas singularidades. No obstante, en términos generales el grado de incorporación del árido reciclado guarda relación directa con el número de poros encontrados. En cuanto a la diferencia manifestada entre el hormigón curado en cámara y ambiente marino, ésta es mayor cuanto menor es el tamaño de los macroporos comparados, deduciéndose, de ello, que el ambiente normalizado favorece el cierre de los macroporos menores.

4.5.4.3. Número de macroporos según su tamaño

El análisis de la distribución del número de poros según su tamaño, proporciona una valiosa información al reparto de la macroporosidad. En términos generales, se observa que el curado en ambiente marino, provoca que el hormigón tanto convencional como reciclado presente poros de mayor tamaño.

Para las relaciones agua/cemento estudiadas H-0,65 y H-0,50, no se aprecia que, la incorporación de árido reciclado, suponga un aumento considerable del tamaño de los poros ni del número de ellos. Éstos resultados están en consonancia con los datos de otras características (porosidad accesible, absorción) obtenidos para los hormigones de la primera fase.

4.5.4.4. Tamaño de macroporos en función de la distancia

En general, se observa una clara tendencia a situarse los poros en el perímetro de la probeta. Esta circunstancia es más evidente para los poros de mayor tamaño.

Tanto para los hormigones H-0,65, como para los H-0,50, los expuestos al ambiente marino presentan mayores tamaños de poros. Como ya se ha comentado anteriormente, la incorporación de árido reciclado no aporta diferencias apreciables en la distribución y tamaño de los poros detectados.

4.5.4.5. Macroporosidad en función de la densidad

La Fig. 189 representa la relación entre la macroporosidad, expresada en porcentaje de macroporos, frente a la densidad aparente del hormigón.

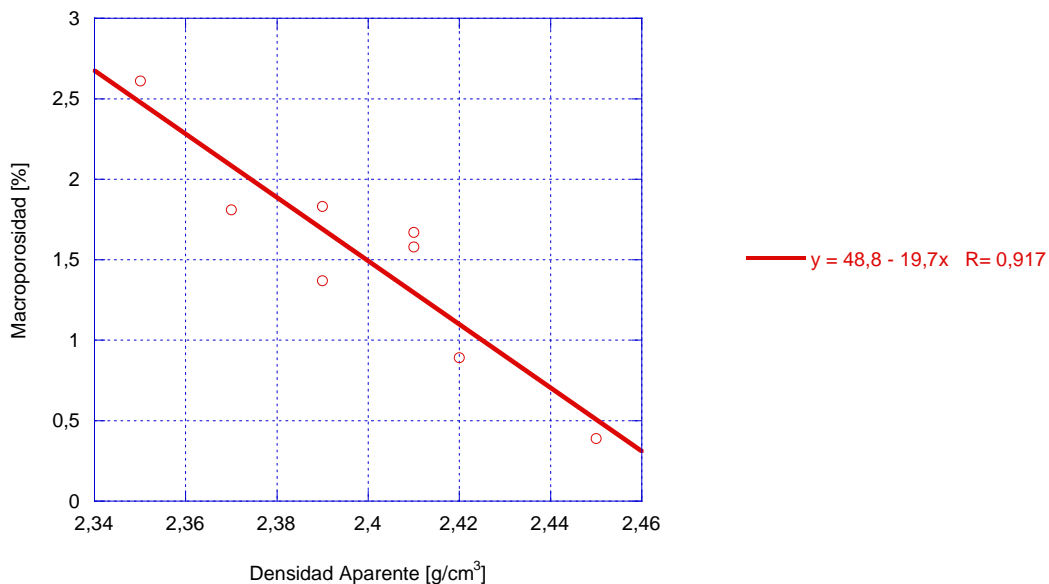


Fig. 189. Macroporosidad en función de la densidad aparente del hormigón reciclado de la fase I.

El análisis conjunto de los resultados obtenidos, indica que una disminución del 1% en la macroporosidad supone un aumento en la densidad de 0,05 g/cm³.

4.5.5. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

Es sabido que la capacidad de propagación de los impulsos ultrasónicos depende, en gran medida, de la compacidad del material. Por ello, se espera poder establecer una relación entre la densidad, macroporosidad y velocidad de los impulsos ultrasónicos.

Se ha podido analizar la capacidad de transmisión de impulsos ultrasónicos en altura a partir del análisis de tres submuestras obtenidas del corte de cada una de las probetas consideradas.

Como era de esperar, en concordancia con resultados previos, existen diferencias en cuanto a la capacidad de propagación de impulsos ultrasónicos entre las tres submuestras obtenidas de una misma probeta. Especialmente evidente es el caso de las muestras compactadas mediante mecanismos de vibrado, si bien éstos resultados podrían estar influenciados, también, por una relación agua/cemento mayor en el caso de los hormigones de las fases segunda y tercera.

4.5.5.1. Análisis de resultados por fases

Del análisis de los resultados referentes a la velocidad de los impulsos ultrasónicos, correspondientes a la primera fase, pueden destacarse las siguientes consideraciones. En términos generales, la velocidad de los impulsos ultrasónicos disminuye con el grado de incorporación de áridos reciclados. En particular, el valor promedio de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos de los hormigones de control, 4,65 km/s, disminuye en torno a un 5% cuando se sustituye el 100% de su árido grueso por árido reciclado.

Por otra parte, cuando se analizan las tres distintas submuestras, como era de esperar, la velocidad de los impulsos ultrasónicos disminuye con la altura. Comparando las distintas velocidades obtenidas de las tres secciones, se constata que, la diferencia entre el valor obtenido en la muestra inferior y superior, disminuye al aumentar el grado de sustitución.

De lo anteriormente dicho, pueden extraerse dos conclusiones. En primer lugar, la incorporación de árido grueso reciclado, a igualdad de relación agua/cemento efectiva, supone una disminución en la velocidad de los impulsos ultrasónicos en el mismo sentido que el grado de sustitución. Esta bajada se sitúa en torno al 10% cuando la sustitución es total, siendo esta diferencia porcentual menor en aquéllos hormigones que presentan matriz de cemento más compacta. Por otra parte, ha quedado demostrado que el método de compactación influye notablemente sobre la capacidad de propagación de impulsos ultrasónicos de las distintas secciones del hormigón en altura. Se hace extensible a esta particularidad que las diferencias encontradas, en distintos niveles, es mayor cuanto mayor es la relación agua/cemento efectiva.

4.5.5.2. Propagación de ultrasonidos frente a la relación agua/cemento

En la Fig. 190, se recoge la representación, frente a la relación agua/cemento efectiva, de la capacidad de propagación de impulsos ultrasónicos de los hormigones reciclados.

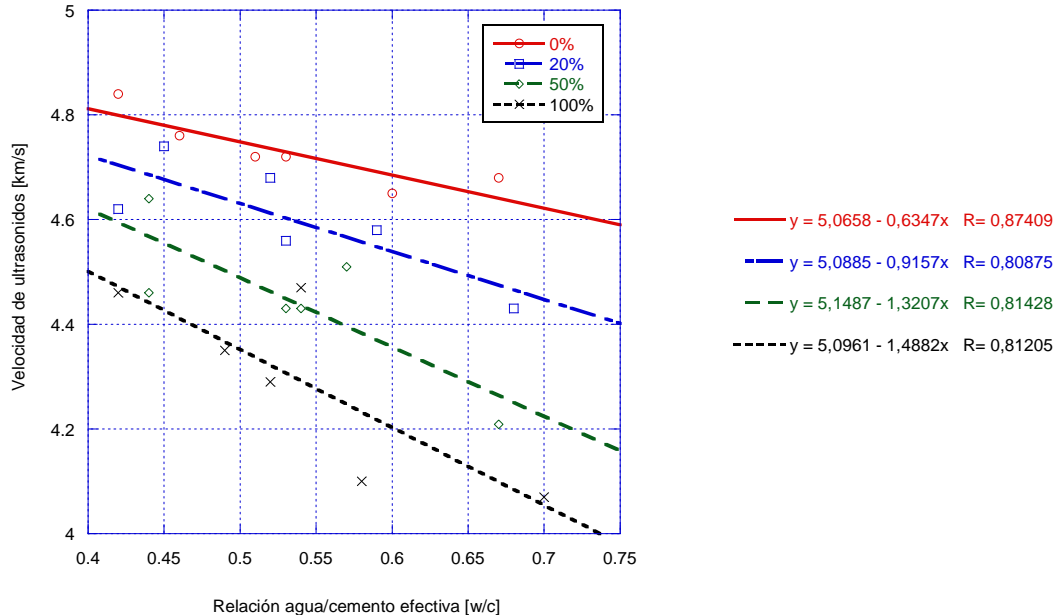


Fig. 190. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados.

Se aprecia una pérdida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas con el aumento de la relación agua/cemento efectiva. Este efecto es más acusado cuanto

mayor es el grado de incorporación de grava reciclada en el hormigón. Así, por ejemplo, para que un hormigón reciclado con un 20% de incorporación respondiese igual a los impulsos ultrasónicos que un hormigón convencional con una relación agua/cemento de 0,7, la relación agua/cemento del primero debería ser de 0,55.

Nuevamente, los valores registrados de la propiedad presentan mayor dispersión cuando se analiza ésta sobre hormigones reciclados que sobre los hormigones de control.

4.5.5.3. Propagación de impulsos ultrasónicos frente a la densidad

En la Fig. 191, se establece la comparación entre la velocidad de impulsos ultrasónicos y la densidad relativa del hormigón según los grados de sustitución de árido reciclado, para una edad de 365 días.

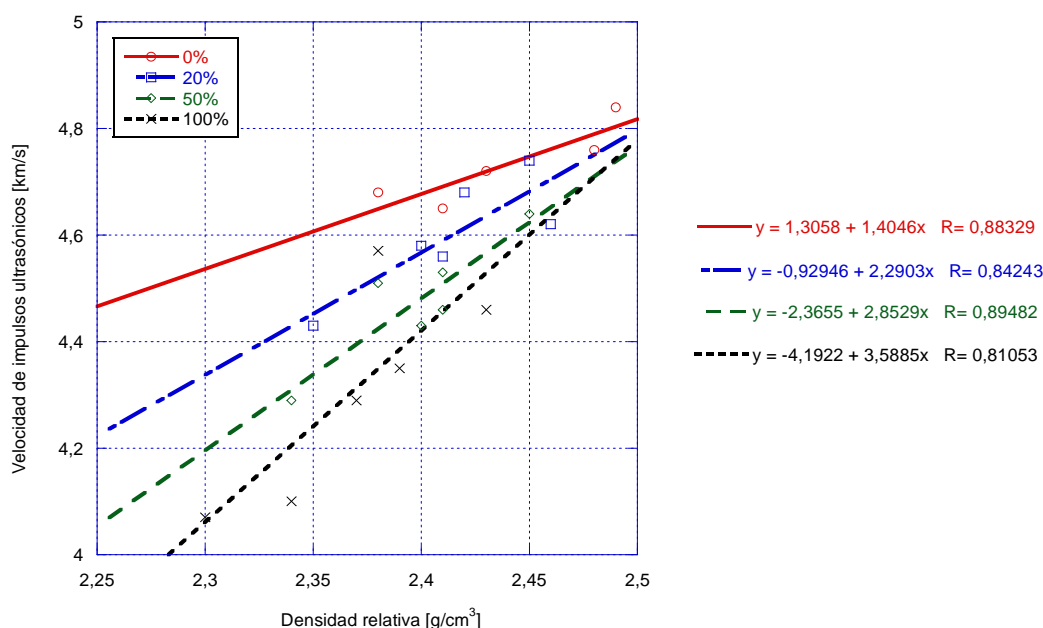


Fig. 191. Velocidad de impulsos ultrasónicos frente a la densidad relativa de los hormigones reciclados con 365 días curados en cámara de humedad.

Las líneas de tendencia de todos los grados de incorporación tienden a aproximarse a altas densidades. Los resultados permiten asegurar que, independientemente del grado de incorporación del árido reciclado, los hormigones que presentan una densidad superior a $2,5 \text{ g/cm}^3$ presentan velocidades de propagación similares, en torno a los $4,8 \text{ km/s}$. No obstante, para obtener densidades de $2,5 \text{ g/cm}^3$ con el

hormigón reciclado, debería reducirse notablemente la relación agua/cemento. Densidades menores suponen una pérdida en la capacidad de propagación mayor cuanto mayor es el grado de incorporación. La presencia de un 20 % de árido reciclado, en hormigones con una densidad de 2,3 g/cm³ conduce a una disminución en la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos de, aproximadamente, el 5%.

4.6. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada una de las caracterizaciones referentes a la durabilidad del hormigón reciclado.

4.6.1. Carbonatación por exposición a la intemperie

Como se ha comentado en la descripción de la Metodología Experimental, para la valoración de la carbonatación de la pasta de cemento, las probetas se han mantenido durante un año en exposición directa al ambiente marino o IIIa.

En cuanto a los resultados obtenidos de los hormigones H-0,65 y H-0,50 de control y reciclados, si bien la aplicación de la fenolftaleína sobre la superficie expuesta del hormigón indica que, al menos superficialmente, existe pérdida de la alcalinidad, tal y como puede observarse, el frente de carbonatación hacia el interior, en estos hormigones es muy pequeño. El valor máximo encontrado corresponde, al hormigón de control de la clase resistente H-0,65.

Nótese que este análisis comparativo se ha realizado solamente sobre los distintos grados de sustitución de los hormigones H-0,65 y H-0,50 de la primera de las fases. En este caso, cabe recordar que las matrices o pastas de cemento de los hormigones mejoran sus características al aumentar el grado de sustitución, debido a la reducción en la relación agua/cemento efectiva que estos áridos provocan.

Se observa una clara tendencia de los hormigones con mayor incorporación a ofrecer una mayor resistencia a la carbonatación. Asimismo, se aprecia una mejora significativa a favor del hormigón H-0,50. El efecto que el árido reciclado ejerce sobre las pastas de cemento cuando es incorporado directamente, sin saturación, al hormigón provoca que éstas sean más cerradas y menos porosas. Por otra parte, la diferencia encontrada entre los hormigones H-0,65 y H-0,50 es consecuencia de la mayor cantidad de cemento que poseen estos últimos.

La observación de los hormigones reciclados revela que el frente de carbonatación de éstos presenta una superficie más irregular que la de los hormigones de control. Ello es debido a la presencia de áridos reciclados en regiones perimetrales de estos

hormigones. En este sentido, la presencia de áridos reciclados carbonatados podría falsear los resultados de avance del frente de carbonatación en la nueva pasta de cemento.

4.6.2. Profundidad de penetración de agua bajo presión

La profundidad de penetración de agua bajo presión es una de las técnicas más extendidas para la valoración de la durabilidad del hormigón. La Instrucción Española del Hormigón Estructural, EHE-08, recoge este ensayo como uno de los recomendados para la valoración de la calidad de los hormigones según el ambiente en el que van a desempeñar su función.

El ensayo, tal y como se recoge en la Metodología Experimental, cuantifica la permeabilidad de los hormigones en base a la determinación de la profundidad máxima de penetración de agua bajo presión en el seno de los mismos. Cuando el agua es forzada a penetrar en el hormigón, éste circula por la red porosa y capilar alcanzando más o menos distancia según que el hormigón sea más abierto o más cerrado. El resultado es de especial relevancia cuando los hormigones se encuentren expuestos a atmósferas agresivas como lo es el ambiente marino o IIIa, ya que la red capilar o porosa es, como viene comentándose, el mecanismo de transporte de los agentes, presentes en el aire, agua o terreno, susceptibles de dañar las estructuras.

4.6.2.1. Análisis de resultados por fases

Como ya se ha podido comprobar con otros resultados, el hormigón reciclado de la primera fase presenta también un mejor comportamiento frente a la penetración de agua bajo presión. Así, para los hormigones reciclados H-0,65 y H-0,50 con 28 días, la incorporación de un 100% de árido reciclado reduce, ligeramente, la profundidad máxima registrada. Se observa, por su parte, una pequeña disminución de la resistencia a la penetración de agua de los hormigones mantenidos a la intemperie.

En el caso de la segunda fase, se observa un comportamiento diferente al registrado en la primera fase. En términos generales, tanto en el hormigón H-0,65AS como en el H-0,50AS, la incorporación de árido reciclado supone un aumento de la profundidad de penetración máxima de agua bajo presión.

Del análisis de los resultados a los 28 días de edad, se desprende que la incorporación de árido reciclado tiene un efecto negativo mayor sobre el hormigón H-0,50AS que sobre el H-0,65AS. En concreto, la incorporación total de grava reciclada supone un aumento ligeramente superior al 50% frente al hormigón de control curado en cámara. Estas notables diferencias se ven reducidas con el paso de la edad del hormigón. No obstante, esta disminución es especialmente significativa en el caso del hormigón H-0,50AS, deduciéndose, de ello, que hormigones con mayor cantidad de cemento evolucionan, con la edad y frente a la penetración de agua, más adecuadamente. Parece ser que, en el desarrollo temporal de la pasta del hormigón reciclado, la estructura debida a los productos de hidratación se va haciendo más compacta, pudiendo, con ello, aislar la permeabilidad de los áridos reciclados.

De la observación general de los resultados de la tercera fase, se concluye que el comportamiento de todas las dosificaciones es similar al que presentan los hormigones de la segunda fase, con las diferencias propias debidas a las diferentes relaciones agua/cemento y a las distintas cantidades de cemento por metro cúbico utilizadas en la dosificación. La incorporación de árido reciclado genera una importante pérdida en la capacidad protectora del hormigón reciclado frente a la penetración de agua bajo presión.

Entre todos los resultados, aquéllos que incumplirían el límite establecido por la EHE para ambientes IIIa corresponden a hormigones completamente reciclados y con relaciones agua/cemento altas. No obstante, a los 365 días de edad, solamente tres dosificaciones presenta una penetración máxima de agua superior a 50 mm.

4.6.2.2. Penetración de agua frente a la relación agua/cemento efectiva

En cuanto a la relación de la profundidad de penetración máxima frente a la relación agua/cemento, en las Fig. 192, Fig. 193 y Fig. 194, se muestran las tendencias obtenidas, una vez ajustada la relación agua/cemento efectiva.

La permeabilidad al agua aumenta con el aumento de la relación agua/cemento efectiva tanto más cuando mayor porcentaje de árido reciclado ha sido incorporado.

Como puede apreciarse, la dispersión es notable, aunque la tendencia de los hormigones con la edad es, como ya se ha visto, a mejorar ligeramente sus

propiedades. En este caso, para todas las edades analizadas, las curvas tienden a confluir en valores de la penetración de agua de unos 30 mm, siendo la relación agua/cemento efectiva menor de 0,45. Bajo estas condiciones, puede confirmarse que las diferencias registradas entre hormigones de control y reciclados son mínimas.

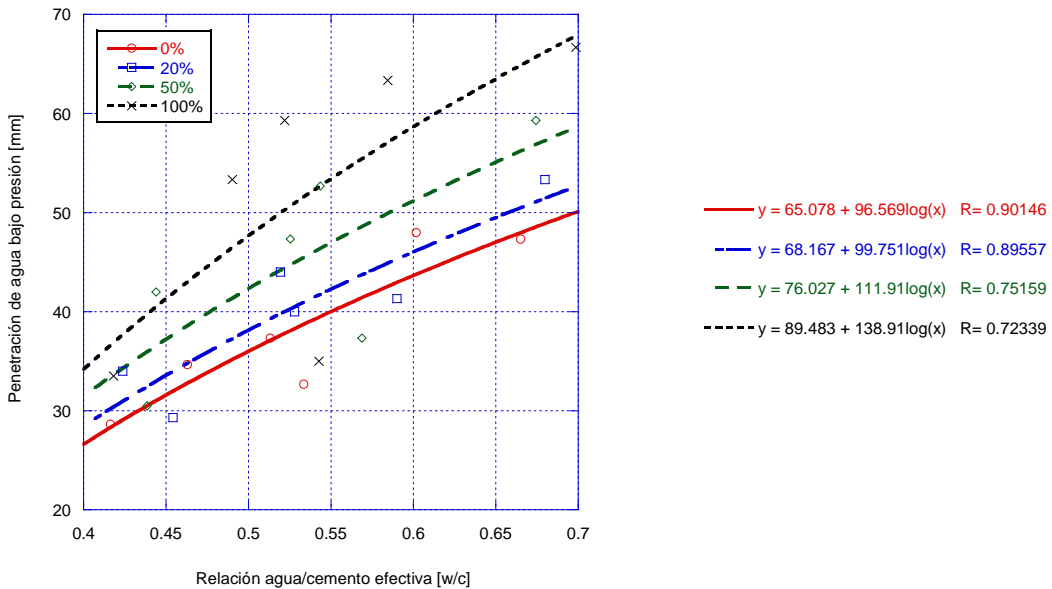


Fig. 192. Penetración de agua bajo presión frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

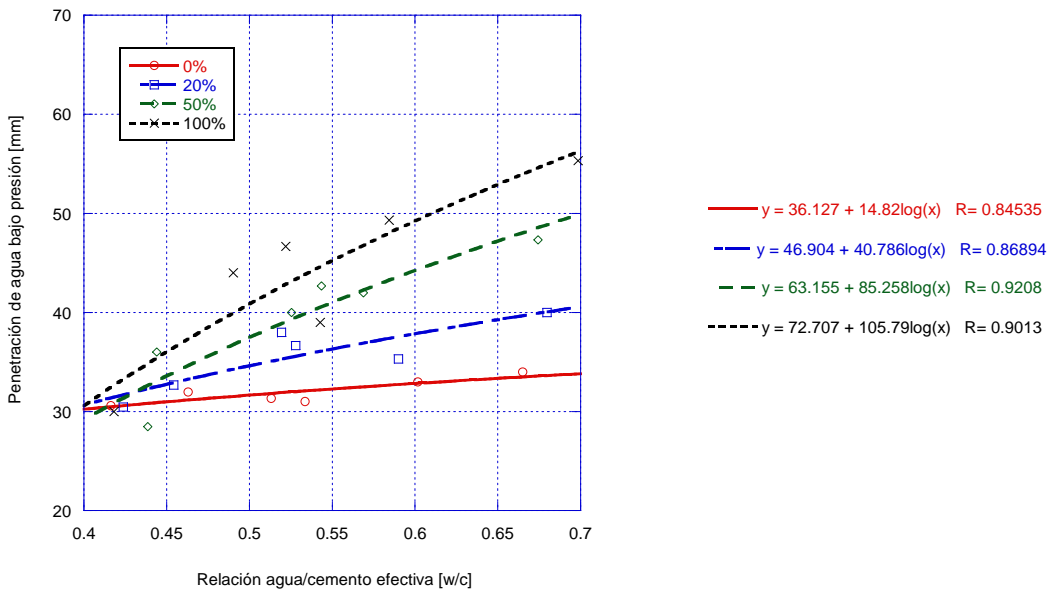


Fig. 193. Penetración de agua bajo presión frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

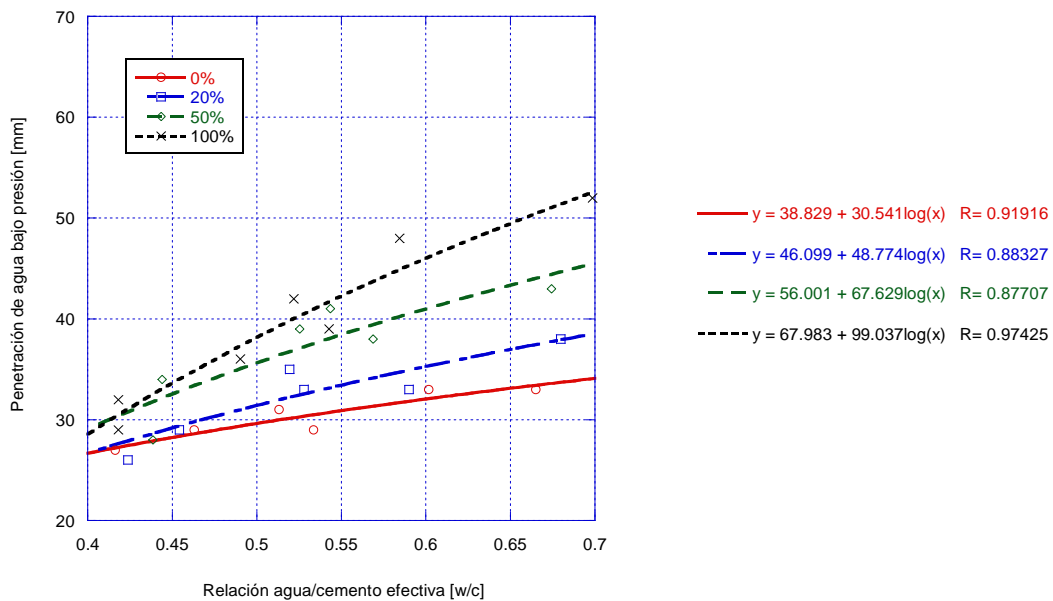


Fig. 194. Penetración de agua bajo presión frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

Como conclusión general sobre la resistencia a la penetración de agua bajo presión, la profundidad máxima registrada guarda relación con el grado de incorporación de árido reciclado, penalizando éste la durabilidad de los hormigones reciclados. No obstante, la reducción de la relación agua/cemento amortigua este efecto negativo.

Compensar la permeabilidad que introduce un 20% de sustitución para una relación agua/cemento de control de 0,65 puede suponer disminuir ésta en 0,1. No obstante, para hormigones de control con una relación agua/cemento de 0,45, la disminución de este parámetro que mantiene la profundidad de penetración de agua es de aproximadamente 0,05.

4.6.2.3. Penetración de agua bajo presión frente a la porosidad accesible

La representación Fig. 195 muestra un ajuste de tipo lineal entre la penetración de agua bajo presión y la correspondiente porosidad accesible observada.

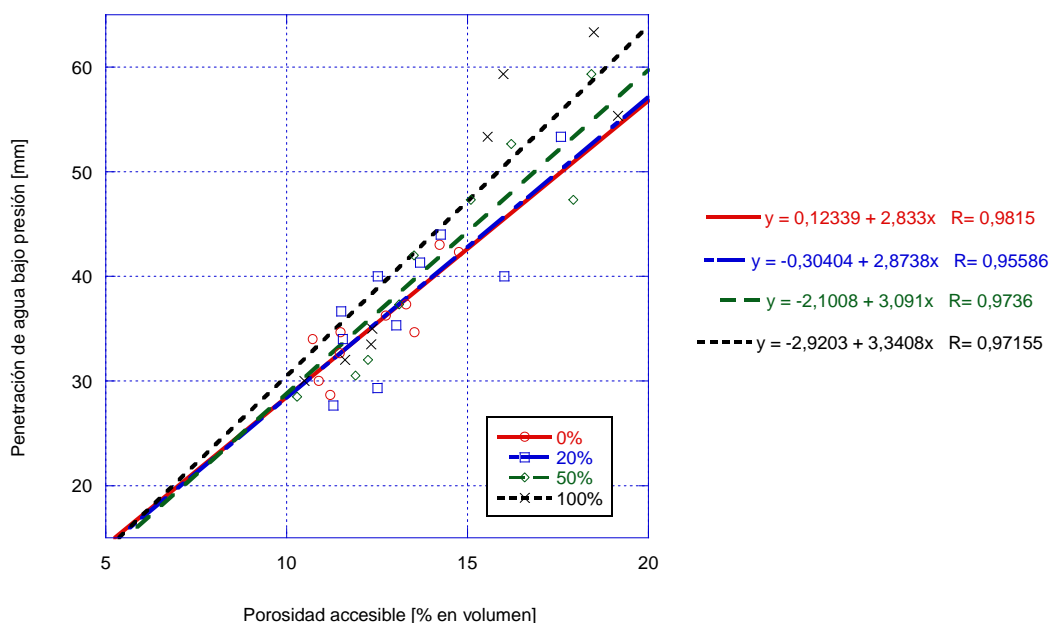


Fig. 195. Penetración de agua bajo presión frente a la porosidad accesible de todos los hormigones curados en cámara de humedad.

La relación encontrada, indica que la influencia de utilizar árido reciclado no es pequeña, dado que, para el caso más desfavorable, cuando los valores de porosidad se sitúan en el entorno del 20%, la diferencia de penetración entre el hormigón de control y el que incorpora 100% de grava reciclada no alcanza los 10 mm.

4.6.3. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno

De entre las metodologías aplicadas a los hormigones reciclados en relación a la determinación de la durabilidad, la más sensible de todas ellas es la determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno. Dada la naturaleza del gas, mucho más fluido que el agua utilizada en el ensayo de determinación de la profundidad máxima de penetración, el oxígeno es capaz de recorrer redes capilares y porosas de tamaños notablemente inferiores. Así, la comparativa que pueda establecerse en relación a las respuestas de los distintos hormigones reciclados será considerablemente más detallada.

4.6.3.1. Análisis de resultados por fases

Tal y como viene comentándose, la alta absorción de los áridos reciclados provoca la reducción de la relación agua/cemento efectiva de los hormigones con incorporación

de aquellos. Ello provoca que, también, el coeficiente de permeabilidad a los gases se vea reducido con el grado de incorporación si ésta se realiza con los áridos secos.

En cuanto a los hormigones correspondientes a la segunda fase de la investigación, en términos generales, los resultados obtenidos son coherentes con los de anteriores ensayos, ya que la permeabilidad al oxígeno tiende a aumentar, en todos los hormigones, con el grado de sustitución. Al mismo tiempo, la permeabilidad disminuye con la edad, siendo mayor, en todos los casos, en los hormigones curados en intemperie marina, ambiente IIIa.

En relación a los resultados de permeabilidad al oxígeno de los hormigones H-0,55ARS y H-0,45ARS. Se observa un aumento del coeficiente de permeabilidad al oxígeno al aumentar el grado de incorporación de árido reciclado. Por otra parte, la evolución temporal reduce, en mayor medida, la permeabilidad de los hormigones de control que los reciclados, acentuándose la diferencia entre éstos y los hormigones completamente reciclados. Esta reducción se observa, también, en los hormigones curados en ambiente con exposición marina, aunque las diferencias entre los hormigones de control y 100% de incorporación registradas son mayores que en el caso del curado en cámara de humedad, siendo aproximadamente de un 50% superior para los 365 días.

Los valores obtenidos sitúan a los hormigones analizados dentro de la catalogación de permeabilidad media-baja, encontrándose los de mayor relación agua-cemento y menor edad en el límite preocupante (permeabilidad media), mientras que las mezclas con menores relaciones agua/cemento muestran cifras de baja permeabilidad.

4.6.3.2. Permeabilidad al oxígeno frente la relación agua/cemento efectiva

Las Fig. 196, Fig. 197 y Fig. 198 recogen las curvas de comportamiento de la permeabilidad al oxígeno de los hormigones reciclados curados en cámara frente a la relación agua/cemento efectiva.

Se observa una disminución de la permeabilidad a los gases con el tiempo, especialmente para los hormigones con menor grado de incorporación. Entre los

hormigones curados en cámara, se aprecia una tendencia de todas las dosificaciones a confluir cuando la relación agua/cemento efectiva es baja.

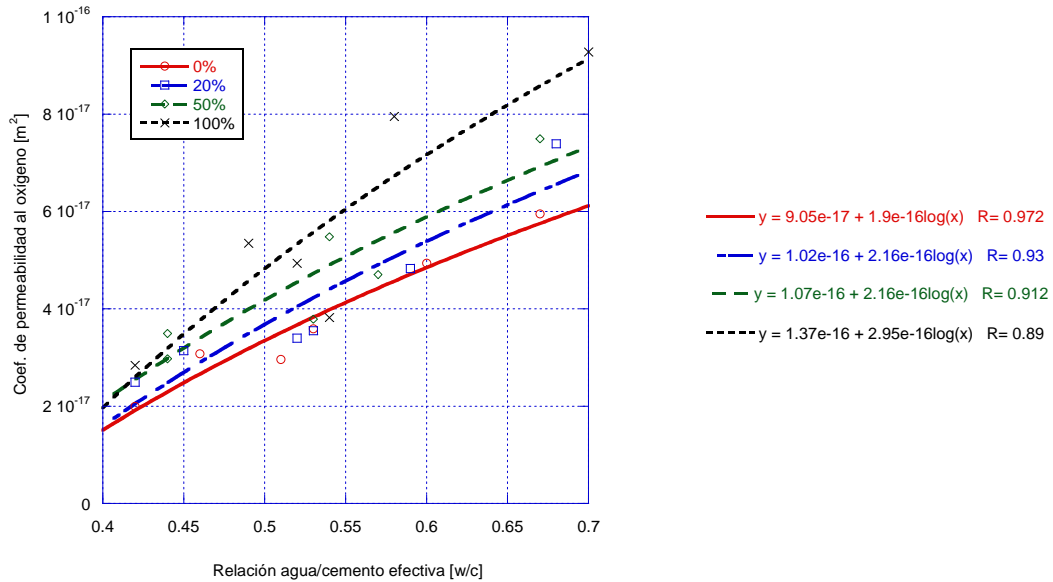


Fig. 196. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

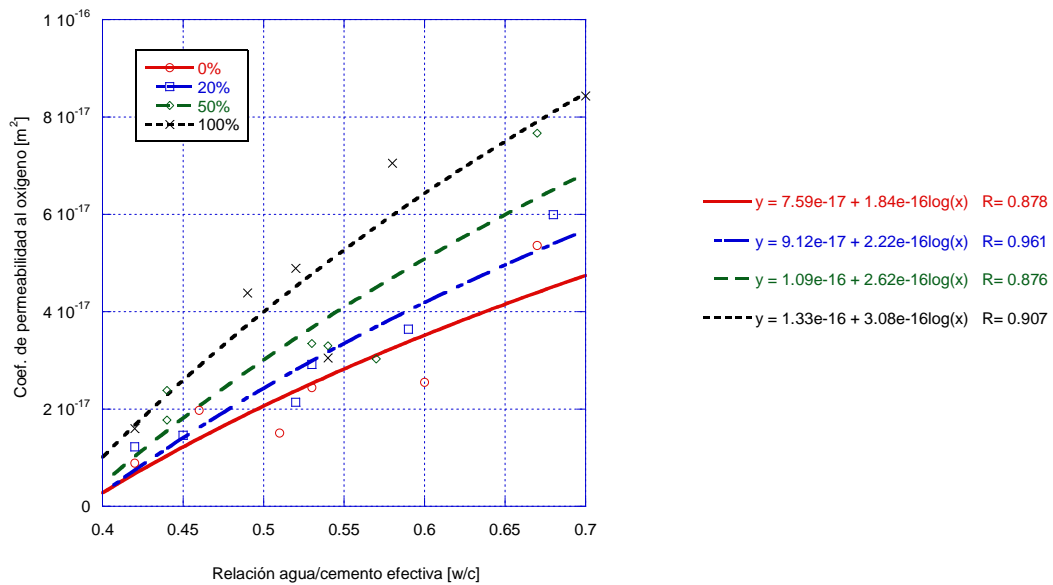


Fig. 197. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

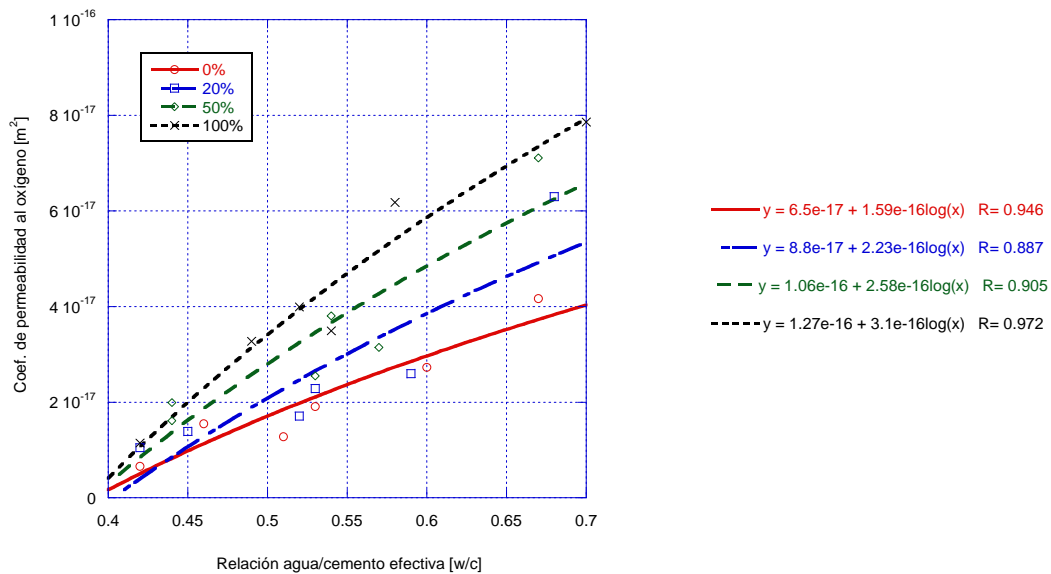


Fig. 198. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

La evolución con el tiempo es mejor en el caso de relaciones agua/cemento bajas. A los 28 días de edad, la permeabilidad al oxígeno para una relación agua/cemento de 0,4 está por encima de los $2 \cdot 10^{-17} m^2$ y a los 180 y 365 días de edad, se registran valores claramente por debajo de este valor. Por el contrario, en relaciones agua/cemento altas, entre los 28 y los 180 días se registran valores similares.

Finalmente, si se pretende obtener, con una incorporación de un 20%, la misma permeabilidad a los gases, se deberá reducir la relación agua/cemento, que presenta el hormigón de control en, aproximadamente, 0,05 cuando la relación agua/cemento del mismo sea de 0,65. Si la relación agua/cemento del hormigón de control es menor, la reducción que mantiene invariante la permeabilidad se ve reducida y si ésta es mayor será necesaria una reducción de mayor cuantía.

4.6.3.3. Permeabilidad al oxígeno frente a la porosidad accesible

En la Fig. 199, se han representado las curvas de permeabilidad al oxígeno frente a la porosidad accesible correspondientes a todos los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

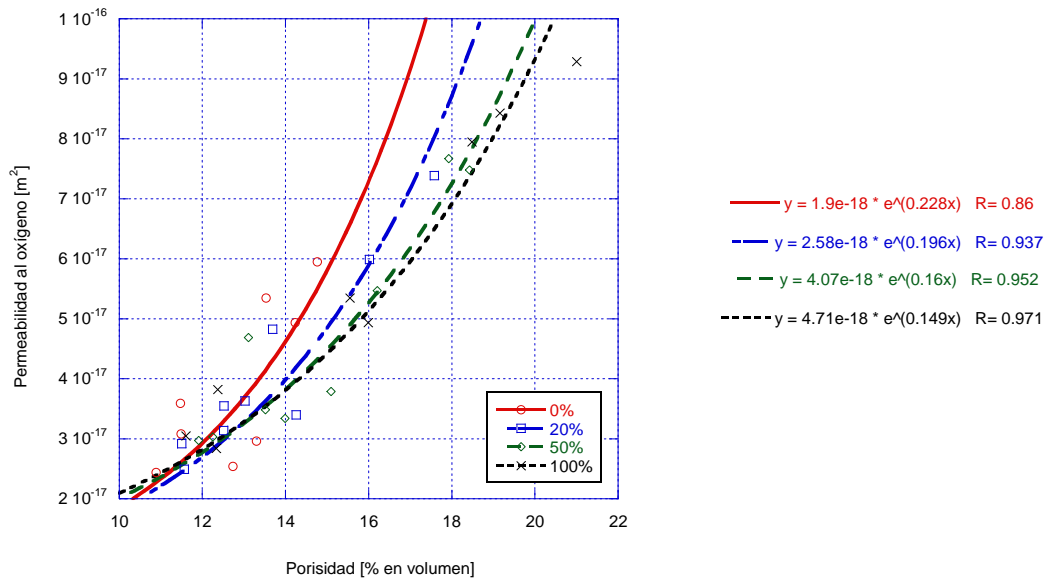


Fig. 199. Permeabilidad al oxígeno frente a porosidad accesible correspondiente a los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

Estos resultados difieren, si se comparan con los obtenidos en el ensayo de penetración de agua bajo presión (Fig. 195). Las relaciones aquí encontradas indican que, el aumento de la porosidad que origina la incorporación de árido reciclado, no repercute en la permeabilidad del hormigón. Por ejemplo, un hormigón de control con una porosidad del 15% exhibe la misma permeabilidad que un hormigón con el 100% de sustitución de grava reciclada y dotado de una porosidad del 17%.

4.6.3.4. Permeabilidad al oxígeno frente a la penetración de agua bajo presión

En la Fig. 200 se han representado las curvas de permeabilidad al oxígeno frente a la penetración máxima de agua bajo presión correspondiente a todos los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

Los ajustes establecidos, aunque con un pobre coeficiente de correlación, corroboran lo observado en el apartado anterior. Los dos parámetros de permeabilidad estudiados reflejan de manera similar la circulación de un fluido a través de la red capilar del hormigón.

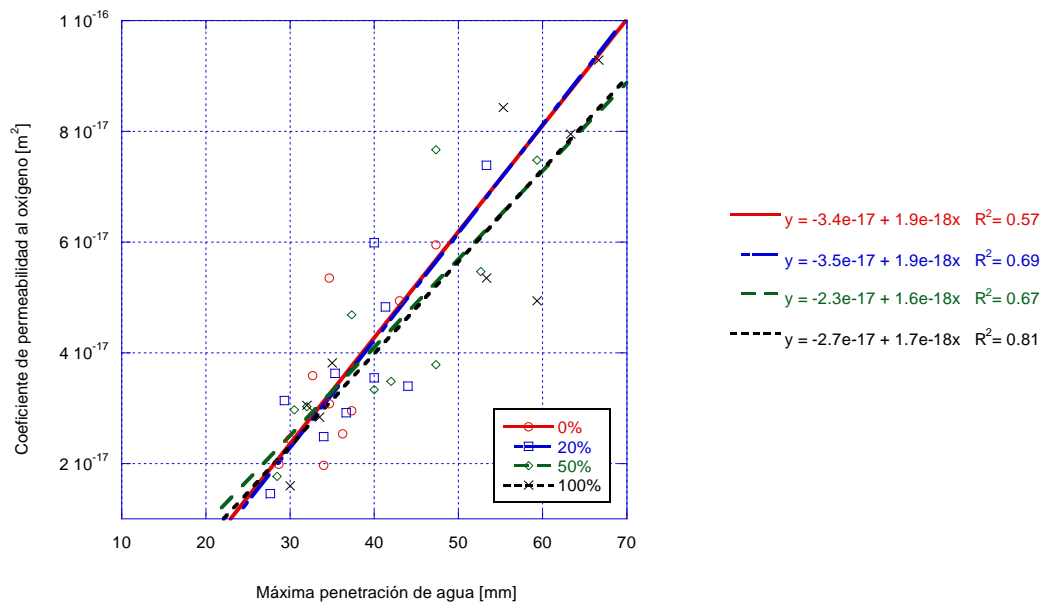


Fig. 200. Permeabilidad al oxígeno frente a la penetración máxima de agua bajo presión correspondiente a los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

4.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

Dentro del apartado dedicado a las propiedades mecánicas se contempla el análisis de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad.

4.7.1. Resistencia a compresión uniaxial

4.7.1.1. Análisis de resultados por fases

En relación a los resultados obtenidos, correspondientes a la primera de las fases, los hormigones con mayores grados de incorporación presentan mejores comportamientos y resistencias frente a cargas de compresión. Con 28 días de edad, el hormigón con incorporación total de árido reciclado muestra unas resistencias, para el H-0,65 y H-0,50, un 20% y un 10% mayores que el hormigón de control respectivamente, reduciéndose ligeramente esta diferencia con el paso del tiempo. Así, cuando se comparan distintas edades, se observa cómo la diferencia entre el hormigón de control y el completamente reciclado se ve reducida, especialmente en el caso de los hormigones curados en cámara de humedad. La diferencia a los 28 días entre los hormigones completamente reciclados y de control, para el H-0,65, curados en ambiente marino, es menor que en el caso de los curados en cámara, no sucediendo lo mismo para el H-0,50 con una menor relación agua/cemento. Se vuelve a demostrar que los hormigones con incorporación de áridos reciclados secos presentan mejores prestaciones que los hormigones de control debido a la reducción de la relación agua/cemento efectiva.

Al contrario de lo que ocurre en el caso de la primera fase, en la segunda fase, cuando los hormigones se fabrican con incorporación de árido grueso saturado, las resistencias disminuyen con la incorporación de árido reciclado. No obstante, esta disminución no es debida exclusivamente a las peores características mecánicas del árido reciclado sino, también, a la mayor incorporación de agua por unidad de volumen de hormigón dosificado. En este caso, las resistencias a compresión se sitúan entre los 30 y 36 MPa, a los 28 días para el H-0,65AS y entre 40 y 45 MPa para el H-0,50AS. Se observa una evolución paralela entre los hormigones curados en cámara y los curados en intemperie registrándose aumentos en la resistencia a los

365 días de hasta unos 10 MPa. En este sentido, es destacable que en el caso del hormigón reciclado con mayor relación agua/cemento, la evolución con el tiempo es menor que en los de control.

En lo referente a los resultados de la tercera fase, como se ha podido observar en otras propiedades, la incorporación de árido reciclado saturado provoca la disminución de las resistencias cuando se comparan con los hormigones de control. En este caso, las diferencias registradas son consecuencia de la combinación de diferentes relaciones agua/cemento efectivas y de la incorporación de árido reciclado. Ahora, la incorporación de un 20% de árido reciclado saturado implica una reducción en la resistencia de aproximadamente un 10%. La evolución temporal de los hormigones curados en cámara e intemperie es paralela en todos los casos para el caso de hormigón curado en ambiente marino. No obstante, se observa nuevamente, que esta diferencia se reduce con el paso del tiempo, especialmente en el caso de los hormigones con altas incorporaciones de cemento.

4.7.1.2. Resistencia a compresión frente a la relación agua/cemento efectiva

Es habitual, en investigaciones relacionadas con las propiedades mecánicas del hormigón, relacionar la resistencia a compresión y/o la resistencia a tracción con la relación agua/cemento efectiva de las dosificaciones. En el caso que nos ocupa es especialmente importante para poder plantear comparaciones, ya que las relaciones agua/cemento efectivas varían con respecto de las originalmente dosificadas. En este sentido, los siguientes puntos recogen el análisis comparativo de la resistencia a compresión, para distintas edades, de las distintas dosificaciones y grados de sustitución, frente a la relación agua/cemento de las mismas curados en cámara de humedad y, después, en ambiente marino.

La Fig. 201 recoge las curvas de resistencia a compresión de los distintos hormigones reciclados frente a la relación agua/cemento efectiva de los mismos a los 28 días de edad y curados en cámara de humedad.

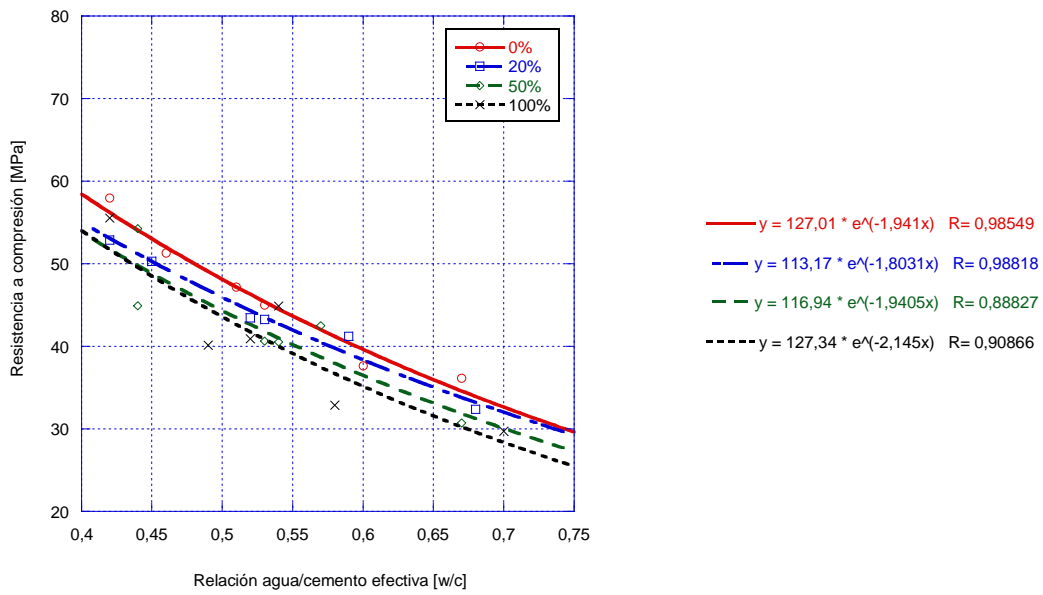


Fig. 201. Resistencia a compresión frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

La Fig. 202 muestra las curvas de resistencia a compresión de los distintos hormigones reciclados frente a la relación agua/cemento efectiva de los mismos a los 180 días de edad.

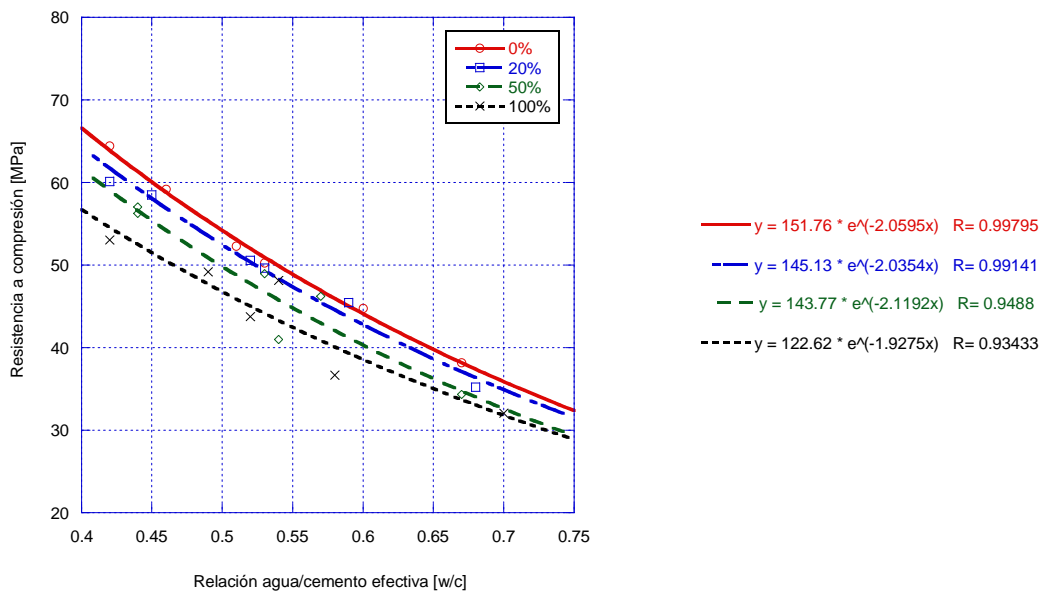


Fig. 202. Resistencia a compresión frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

La Fig. 203 muestra las curvas de resistencia a compresión de los distintos hormigón reciclado frente a la relación w/c de los mismos a los 365 días de edad.

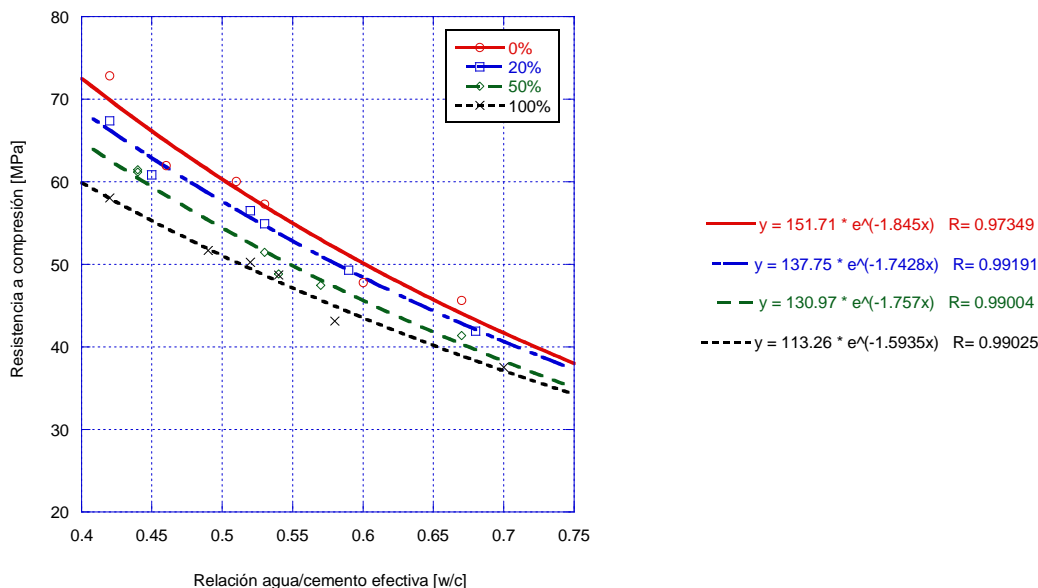


Fig. 203. Resistencia a compresión frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

Los resultados obtenidos indican que la utilización de un 20% de grava reciclada no produce cambios resistentes significativos respecto al hormigón patrón. Cuando la sustitución es del 100%, se observa una pérdida reseñable, de tal manera que, para garantizar iguales niveles resistentes, es necesario reducir la relación agua/cemento en un 0,05.

4.7.1.3. Resistencia a compresión frente al coeficiente de absorción

Puede observarse, en la Fig. 204, la representación de la resistencia a compresión frente a la absorción, para todas las edades. La misma revela la existencia de una relación de tipo exponencial decreciente de la resistencia a medida que aumenta la absorción.

Se comprueba que la presencia de árido reciclado no influye en la resistencia para hormigones con una absorción inferior al 4%. En estas condiciones, puede garantizarse que, independientemente del grado de árido reciclado incorporado, la resistencia se sitúa por encima de los 60 MPa. Para valores elevados de absorción, la mayor porosidad del árido reciclado no penaliza las resistencias. Así por ejemplo, un

hormigón con el 100% de grava reciclada y una absorción del 7% alcanza 10 MPa más de resistencia a compresión que el hormigón patrón de igual absorción.

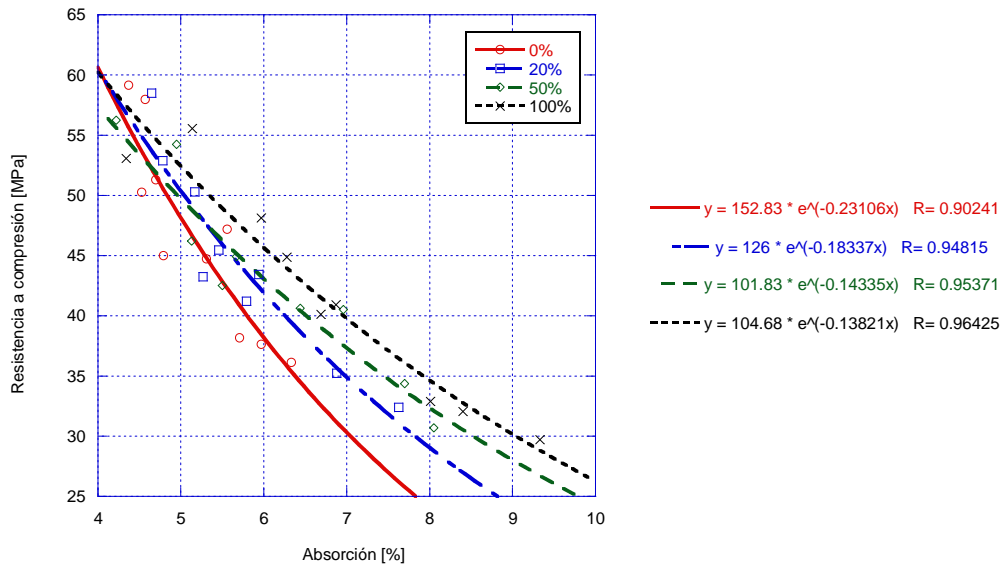


Fig. 204. Resistencia a compresión frente a la absorción de los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

4.7.1.4. Resistencia a compresión frente a la porosidad accesible

Puede observarse, en la Fig. 205, la similitud con las curvas registradas en el apartado anterior.

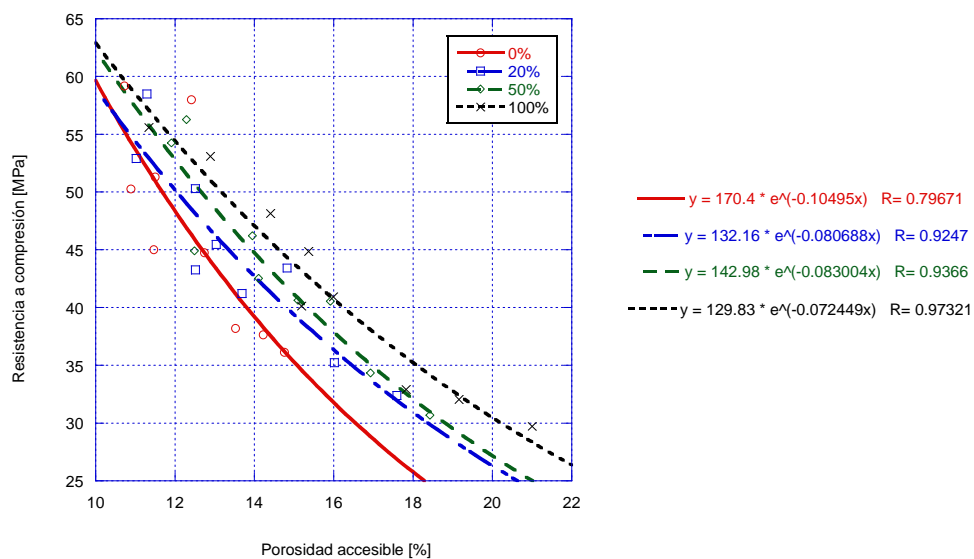


Fig. 205. Resistencia a compresión a la porosidad accesible frente de los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

En este caso, las conclusiones vertidas para el 4% de absorción equivalen a hormigones con un 10% de porosidad accesible y el 7% de absorción con el 18% de porosidad.

4.7.1.5. Resistencia a compresión frente a la penetración de agua bajo presión

La representación de la Fig. 206 aún mostrando las mismas tendencias que los parámetros de apartados anteriores manifiesta algunas peculiaridades.

Obsérvese que no hay apenas diferencia entre las curvas correspondientes a los hormigones de control y aquéllos con un grado de incorporación de árido reciclado del 20%. Igualmente, independientemente del grado de incorporación, que las curvas de tendencia tienden a confluir para valores de la penetración de agua de 20 mm, alcanzándose resistencias de en torno a los 60 MPa.

Por último, para penetraciones máximas de 50 mm, límite máximo exigido por la EHE-08 para ambientes IIIa, la resistencia del hormigón de control se sitúa próxima a los 35 MPa aunque si la incorporación asciende al 100% la resistencia que garantiza la misma penetración de agua deberá ser mayor de 40 MPa.

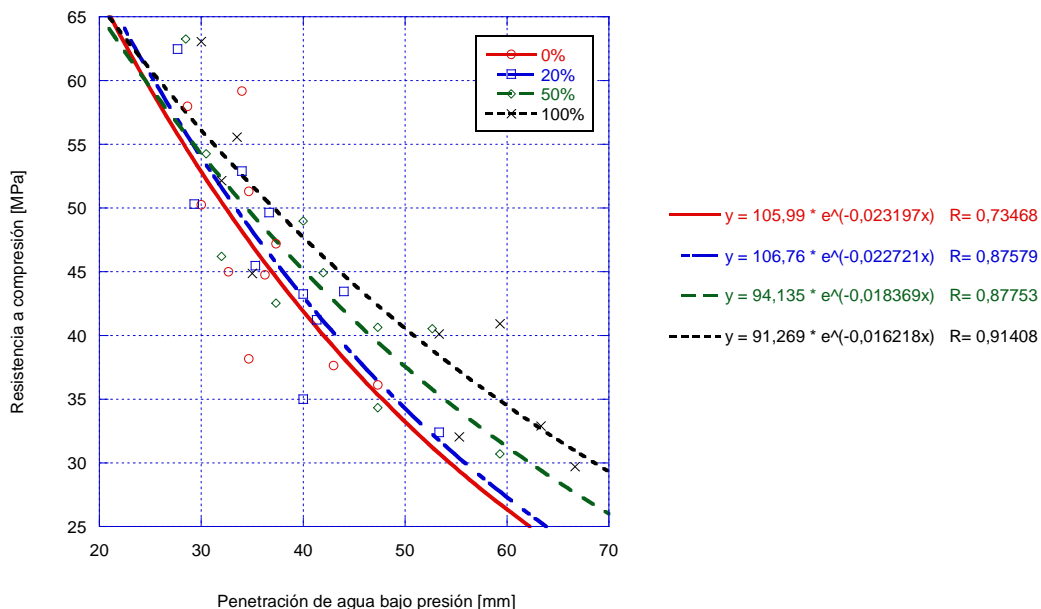


Fig. 206. Penetración de agua bajo presión frente a la resistencia a compresión de todos los hormigones curados en cámara de humedad.

4.7.1.6. Resistencia a compresión frente a la permeabilidad al oxígeno

Pueden observarse en la Fig. 207 las curvas de evolución de las resistencias a compresión frente a la permeabilidad al oxígeno, para todas las edades.

Se destaca que este último parámetro es el que mejor evalúa la naturaleza porosa del material, mostrando una correlación con el comportamiento mecánico del mismo que es independiente de las características físicas de los componentes utilizados para la elaboración de los distintos hormigones analizados.

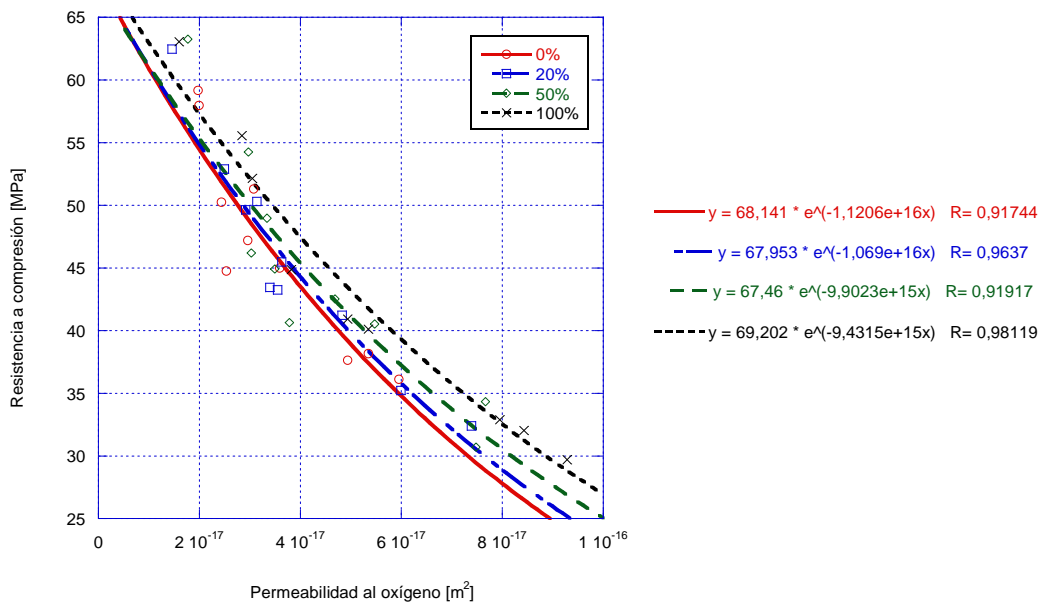


Fig. 207. Resistencia a compresión frente a la permeabilidad al oxígeno correspondiente de los hormigones reciclados curados en cámara de humedad.

4.7.1.7. Influencia del porcentaje de sustitución en la resistencia a compresión

En la Fig. 208 se representan los valores de resistencia a compresión de todos los hormigones ensayados, curados en cámara de humedad, frente a la del hormigón de control correspondiente.

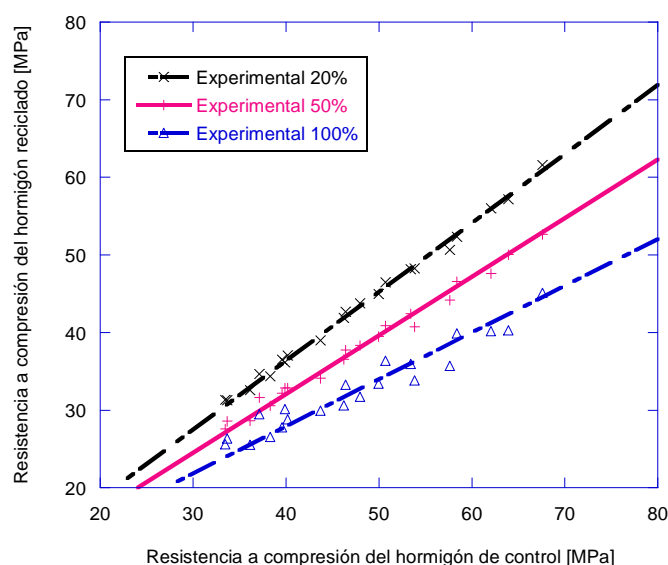


Fig. 208. Resistencia a compresión de los hormigones reciclados frente a la resistencia del hormigón de control correspondiente.

Se observa una buena correlación lineal entre las resistencias a compresión del hormigón reciclado respecto de las del hormigón de control:

$$F_{RC} = a + b \cdot F_{cc} \quad (44)$$

donde F_{RC} es la resistencia del hormigón reciclado y F_{cc} la del hormigón de control, dados en MPa. Los parámetros a y b de ajuste, obtenidos de Fig 21, incluyendo el hormigón de control, se presentan en la Tabla 129.

Tabla 129. Parámetros de ajuste lineal de la comparativa entre la resistencia del hormigón de control y la resistencia del hormigón reciclado.

Sustitution:	0%	20%	50%	100%
a	0	0	0,3	2,1
b	1	0,94	0,87	0,75
R ²	1	0,97	0,92	0,80

Los parámetros a y b , Tabla 129, presentan un adecuado ajuste lineal respecto del grado de incorporación de árido reciclado, γ , dado en %. Tales ajustes se presentan en (45) y (46).

$$a = 0,08 \cdot \gamma \quad (45)$$

$$b = 1 + 0,005 \cdot \gamma \quad (46)$$

De la combinación de las 3 ecuaciones se obtiene el modelo de resistencia del hormigón reciclado:

$$F_{RC} = 0,08 \cdot \gamma + (1 - 0,005 \cdot \gamma) \cdot F_{CC} \quad (47)$$

La Fig. 209 recoge, a modo ilustrativo, las resistencias a compresión de hormigones reciclado con distintos grados de sustitución, calculadas según (47).

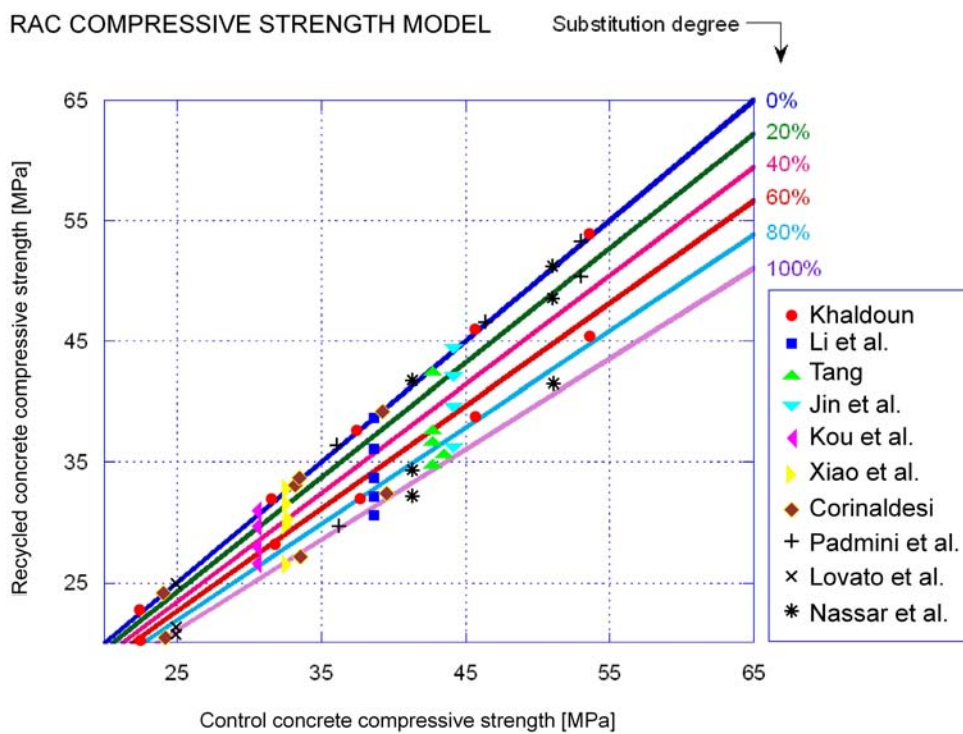


Fig. 209. Modelo de resistencia a compresión del hormigón reciclado Fig. 24. comparado con los resultados obtenidos por Li et al. [152], Tang [153], Jin et al. [154], Kou et al. [155], Rahal [156], Xiao [157], Corinaldesi [158]; Padmini et al. [159], Lovato et al. [160], Nassar y Roz-Ud-Di [161].

Además, dada la expresión (47), la variación de la resistencia del RC con respecto del grado de incorporación γ indica que ha de haber un valor para el cual la incorporación de árido reciclado no afecte negativamente.

$$\frac{\partial F_{RAC}}{\partial \gamma} = 0,022 - 0,0025 \cdot F_{CC} = 0 \Rightarrow F_{CC} = 8,8 \text{ MPa} \quad (48)$$

Con lo cual se deduce que CC con una resistencia a compresión por debajo de 9 MPa no se ven afectados por la incorporación de árido reciclado. Asimismo, este límite es aquel a partir del cual puede aplicarse la expresión (47).

4.7.2. 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. De la misma manera que sucedió en el caso de la resistencia a compresión, se analizan, en primer lugar, los resultados obtenidos para las distintas fases por separado.

4.7.2.1. Análisis de resultados por fases

Con respecto a los resultados de la primera fase, de nuevo se repite la tendencia a presentar resistencias a tracción mayores en los hormigones con mayor grado de sustitución, debido a que la incorporación de los áridos reciclados secos ha supuesto una importante reducción en la relación agua/cemento efectiva y, en consecuencia, una mejora en las características de la pasta de cemento correspondiente.

Del análisis de la resistencia a tracción de los hormigones de la segunda fase, se desprende, como viene siendo habitual, que el hormigón pierde capacidad resistente a medida que se incorpora mayor cantidad de árido reciclado. Como es sabido, la utilización de árido grueso saturado ha derivado en una mayor aportación de agua. En consecuencia, las pérdidas de resistencias no son solo debidas a la incorporación de un árido menos resistente sino que están influenciadas, también, por el aumento en la relación agua/cemento efectiva.

En la tercera fase, se observa el mismo comportamiento que en el caso de la resistencia a compresión. La incorporación de árido reciclado supone una pérdida en la capacidad resistente, tanto a compresión como a tracción, de los hormigones reciclados.

4.7.2.2. Resistencia a tracción frente a la relación agua/cemento efectiva

Tal y como se procedió con los datos obtenidos de la resistencia a compresión de los diferentes hormigones reciclados, en lo referente a la resistencia a tracción indirecta se han representado las curvas de comportamiento frente a la relación agua/cemento efectiva. Las Fig. 210, Fig. 211 y Fig. 212 recogen los distintos comportamientos de las dosificaciones planteadas.

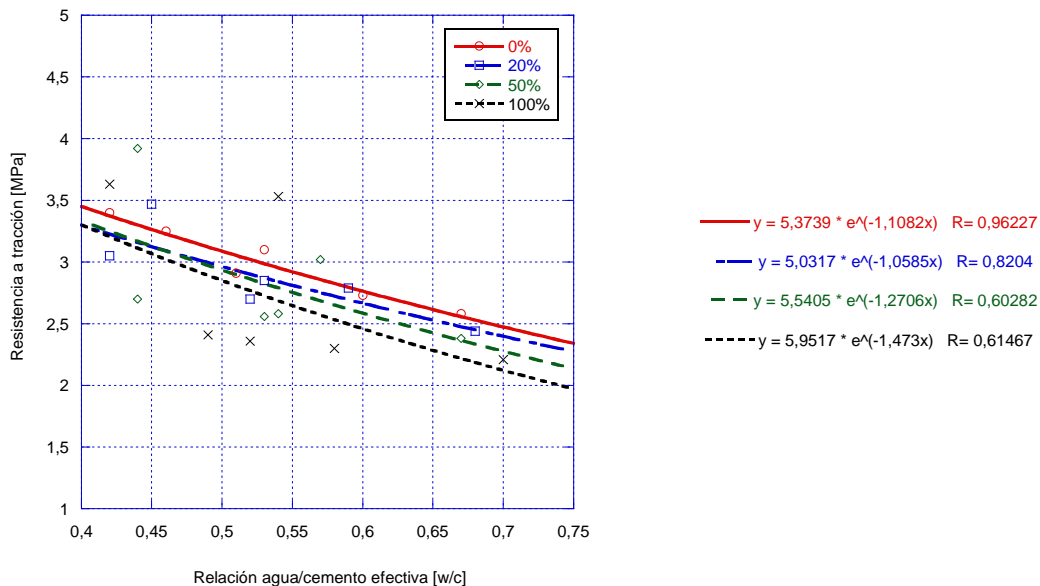


Fig. 210. Resistencia a tracción indirecta frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 28 días de edad curados en cámara de humedad.

Se observa, para todas las edades analizadas, una fuerte dispersión de los resultados. Los parámetros de ajuste son bajos, por lo que únicamente se puede significar la tendencia a presentar una mayor resistencia a la tracción los hormigones y dosificaciones con una baja relación agua/cemento efectiva.

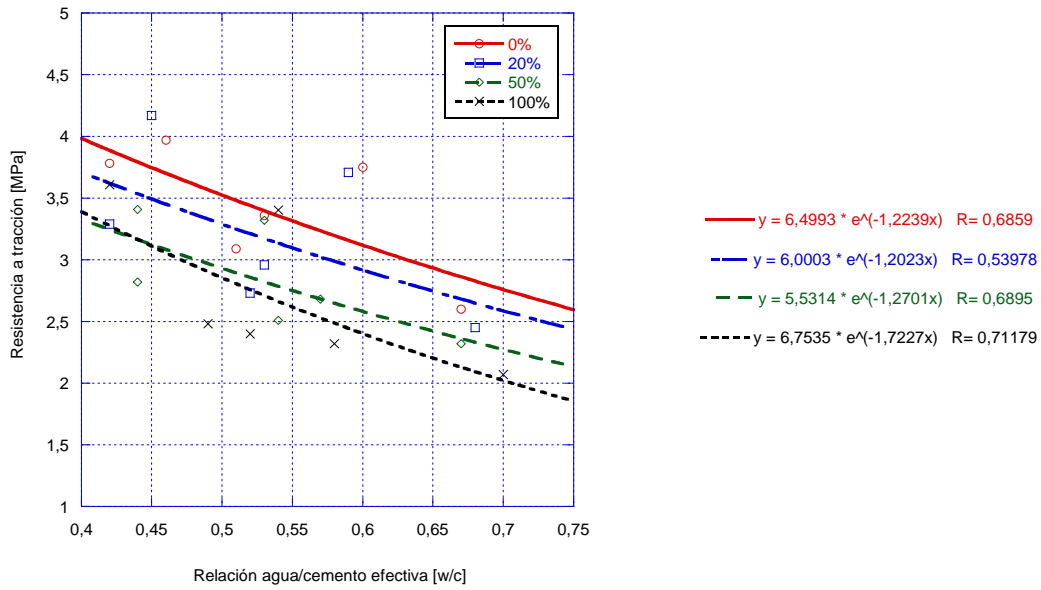


Fig. 211. Resistencia a tracción indirecta frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 180 días de edad curados en cámara de humedad.

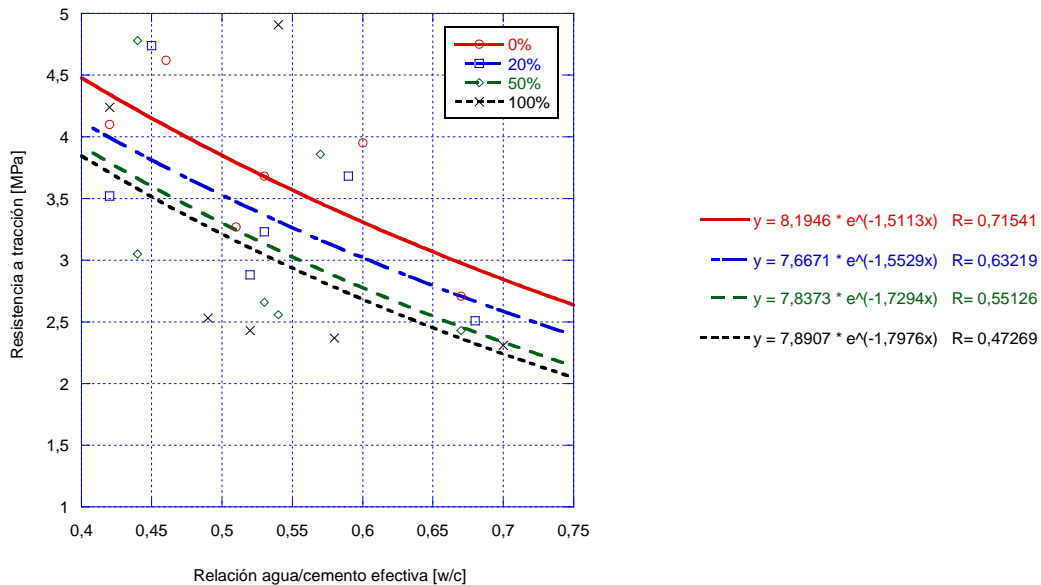


Fig. 212. Resistencia a tracción indirecta frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados con 365 días de edad curados en cámara de humedad.

4.7.3. Módulo de elasticidad del hormigón reciclado

El módulo de elasticidad de los hormigones estudiados se sitúa entre los 35 y los 40 GPa para los hormigones de control. A continuación, se analizan los valores obtenidos según fase y relación agua/cemento efectiva correspondiente.

4.7.3.1. Análisis de resultados por fases

En el caso de los hormigones de la primera fase, a diferencia de la tendencia observada en otras propiedades, los hormigones con mayor grado de incorporación, de árido reciclado presentan, módulos de elasticidad menores que los de control, disminuyendo a medida que aumenta el grado de incorporación. En este sentido, parece que la incorporación del árido reciclado supone una importante pérdida de rigidez en los hormigones reciclados cuya pérdida se puede estimar entre un 10% y un 15% en el módulo de elasticidad y puede justificarse con los resultados obtenidos del comportamiento bajo cargas de compresión del conjunto de áridos, índice de machacabilidad. En este sentido, parece que la mejora en las características de la pasta de cemento debidas a la reducción de la relación agua/cemento efectiva, no compensa la disminución en la rigidez del esqueleto de áridos debida a la incorporación de áridos reciclados.

En cuanto a los hormigones de la segunda fase, a partir de los resultados obtenidos, se observa, también, una pérdida en el módulo de elasticidad asociada a la incorporación del árido reciclado, pudiendo superar el 20% para el hormigón con mayor relación agua/cemento. En este sentido, la combinación de un árido menos rígido que el natural y el aumento de la relación agua/cemento contribuyen a la pérdida de rigidez del material.

De la observación de los resultados de la tercera fase pueden extraerse las mismas conclusiones que en el caso de la segunda fase, destacándose una importante disminución (26,7%) del módulo en el H-0,45ARS para el hormigón totalmente reciclado. Por este motivo, se hace necesario, al igual que en otras ocasiones, comprobar cómo es la evolución de esta propiedad en proporción con la relación agua/cemento efectiva de la dosificación.

4.7.3.2. Módulo de elasticidad frente a la relación agua/cemento efectiva

En la Fig. 213 se presentan las curvas de evolución del módulo de elasticidad del hormigón reciclado frente a la relación agua/cemento efectiva. Pueden observarse comportamientos prácticamente paralelos para los distintos grados de sustitución. No obstante, en este caso, las separaciones entre los distintos ajustes lineales, debidas a la incorporación de árido reciclado, son notablemente mayores que, por ejemplo, en

el caso de la resistencia a compresión. Mantener el módulo de elasticidad de un hormigón con un 20% de árido reciclado, en comparación con su hormigón de referencia, supondría reducir la relación agua/cemento en prácticamente un 0,1 y para una incorporación del 50% en un 0,25.

Nuevamente, los hormigones reciclados son los que introducen mayor incertidumbre en los resultados y, en consecuencia, los que peor ajuste arrojan. Esta peculiaridad es, supuestamente, debida a la mayor heterogeneidad del propio material.

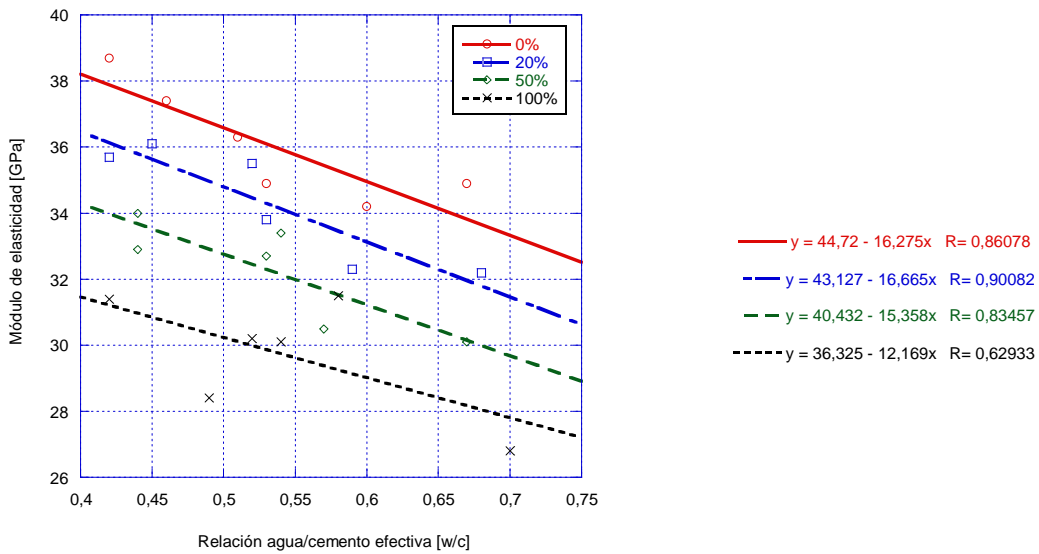


Fig. 213. Módulo de elasticidad frente a la relación agua/cemento de los hormigones reciclados.

La Fig. 214 recoge una comparativa con los resultados obtenidos por diferentes autores.

Zilch y Roos [162] sugieren que el módulo de elasticidad es dependiente de resistencia a la compresión del hormigón y de su densidad. Evangelista y de Brito [163] utilizan árido fino reciclado y la misma ecuación que Zilch y Roos con coeficientes de regresión distintos. Se ha encontrado que estos dos modelos encajan razonablemente bien con los resultados obtenidos, especialmente en torno al valor de 35 GPa. El resto de modelos muestran diferencias significativas entre ellos y los resultados obtenidos. La ecuación Dillmann [164] es la que más se aleja de los resultados obtenidos.

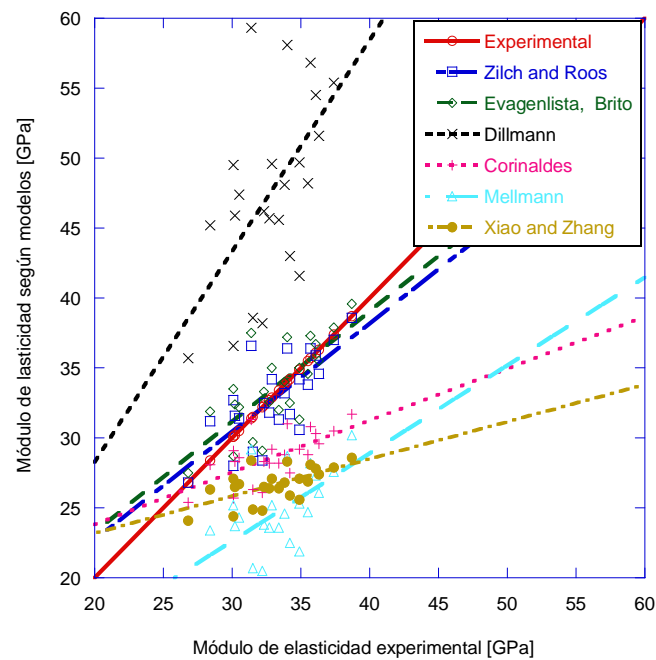


Fig. 214. Comparación de los distintos modelos encontrados en la bibliografía: Zilch and Roos [162]; Evangelista and de Brito [163]; Dillmann [164]; Corinaldesi [158]; Mellmann [165]; Xiao Li y Zhang [157].

4.7.3.3. Módulo de elasticidad frente a la resistencia a compresión

Una manera alternativa de valorar el efecto que supone la incorporación de árido reciclado en la elasticidad del material es comparar este parámetro con la resistencia a compresión de los hormigones correspondientes. En este sentido, en la Fig. 215 quedan recogidas las curvas de evolución del módulo de elasticidad frente a la resistencia a compresión.

Puede comprobarse, en este caso, como existe una relación lineal, con notable dispersión, entre estas dos propiedades del material. De esta interpretación se concluye que los hormigones con mayor grado de incorporación sufren una deformación máxima, en rotura, sustancialmente mayor que los hormigones de control. Esta característica se analizará en detalle a continuación, en el apartado correspondiente al comportamiento bajo cargas cíclicas del material.

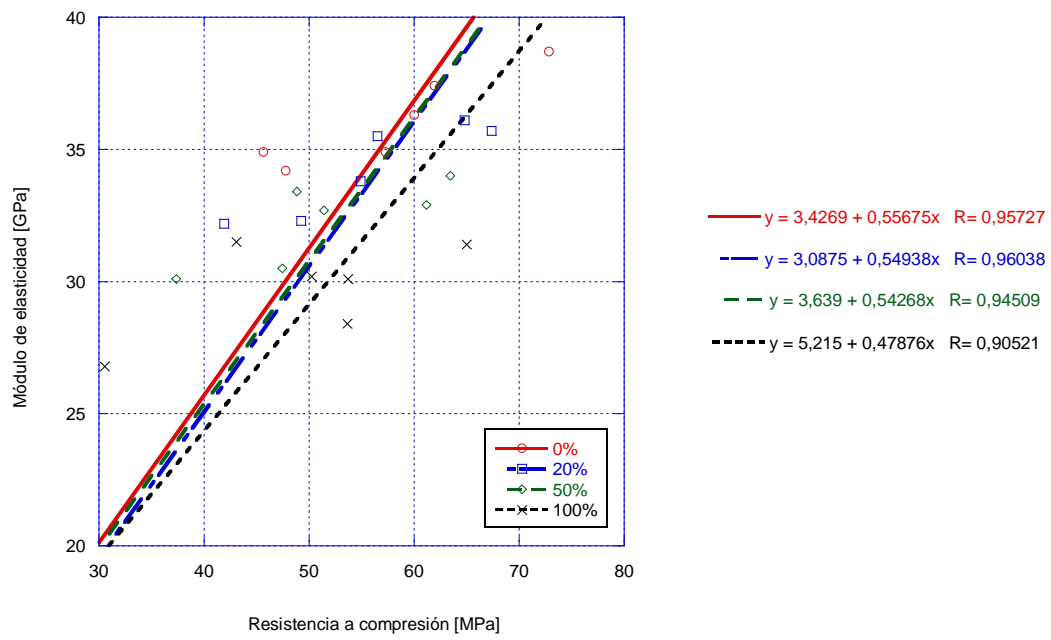


Fig. 215. Módulo de elasticidad frente a la resistencia a compresión de los hormigones reciclados.

4.8. COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL HORMIGÓN RECICLADO

A continuación, se analizan los resultados relativos al comportamiento a fatiga de los hormigones reciclados y su comparación con los hormigones de control.

4.8.1. Método STAIRCASE

En el presente apartado se contrastan los comportamientos y los resultados obtenidos a partir de los ensayos STAIRCASE realizados sobre los hormigones reciclados y de control de las tres fases.

4.8.1.1. Evolución de la rigidez

En primer lugar, se presenta la evolución de la rigidez tras la consecución de los ciclos a niveles tensionales constantes. En la Fig. 216, se recoge la variación de la deformación con el tiempo, destacándose tres etapas de respuesta del hormigón.

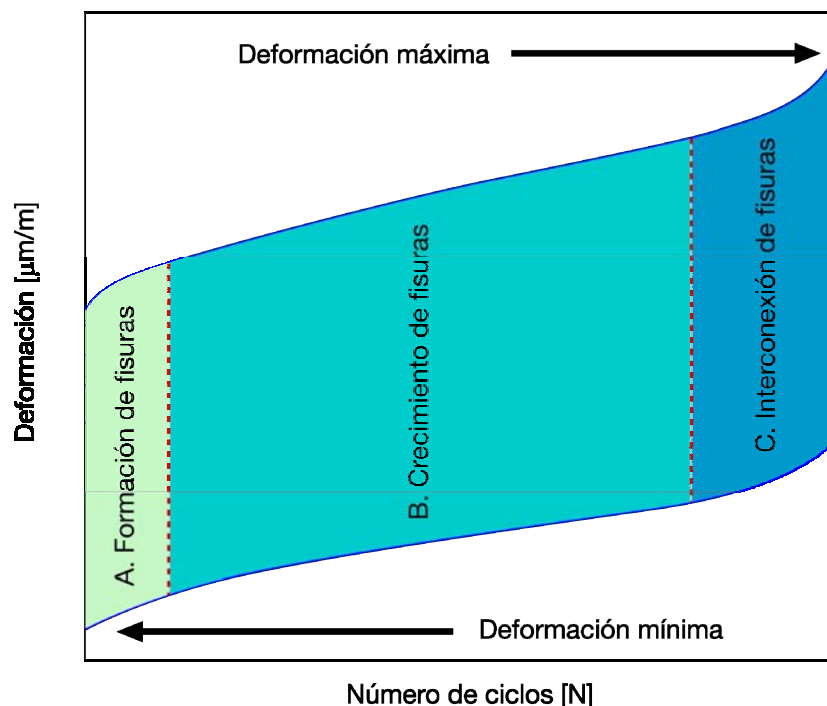


Fig. 216. Representación esquemática de la respuesta en la deformación, frente al número de ciclos, de un ensayo a incremento de tensión constante.

La primera de las etapas, *A*, corresponde a la formación inicial de las fisuras. Esta está caracterizada por un aumento logarítmico atenuado de la deformación máxima y mínima, siendo ligeramente mayor la velocidad de aumento de la deformación máxima que de la mínima. El segundo tramo, *B*, se asocia con la estabilización de las fisuras formadas en la primera de las etapas manifestado en un crecimiento de las mismas. Se observa un aumento de deformación prácticamente lineal hasta la tercera de las etapas de comportamiento, la cual se alcanza por la acumulación de daño debida a los ciclos. En todo el segundo tramo, el crecimiento de fisuras provoca una pérdida de rigidez evidenciada por la ligera separación que se constata entre las deformaciones máxima y mínima. Teniendo en cuenta que los niveles de tensiones se mantienen constantes durante todo el ensayo, la rigidez en este tramo disminuye de forma lineal. En cuanto a la respuesta del hormigón en su última etapa, *C*, de interconexión de fisuras y colapso, el aumento de la deformación, a diferencia de las fases anteriores *A* y *B*, es de tipo exponencial: la pérdida acelerada de rigidez va acompañada de una mayor separación entre las envolventes superior e inferior de deformaciones máximas y mínimas con la consecución de los ciclos.

Como alternativa a la variación de la deformación frente al número de ciclos, se ha representado la evolución del módulo de elasticidad o de la rigidez del hormigón frente al número de ciclos, curva *E-N*. Del cociente entre la diferencia de tensiones, constante en todos los ciclos, y la diferencia entre la deformación máxima y mínima en cada uno de los ciclos, se obtiene la rigidez, E_N .

La Fig. 217, recoge el comportamiento de un hormigón, con un módulo de elasticidad convencional E_c , capaz de soportar un número de ciclos N_c . En esta figura, representativa de todos los hormigones ensayados en los que la probeta colapsó antes de alcanzar el número de ciclos establecido como *vida infinita*, $2 \cdot 10^6$ ciclos, pueden reconocerse las tres etapas de comportamiento antes analizadas e identificarse tres puntos característicos.

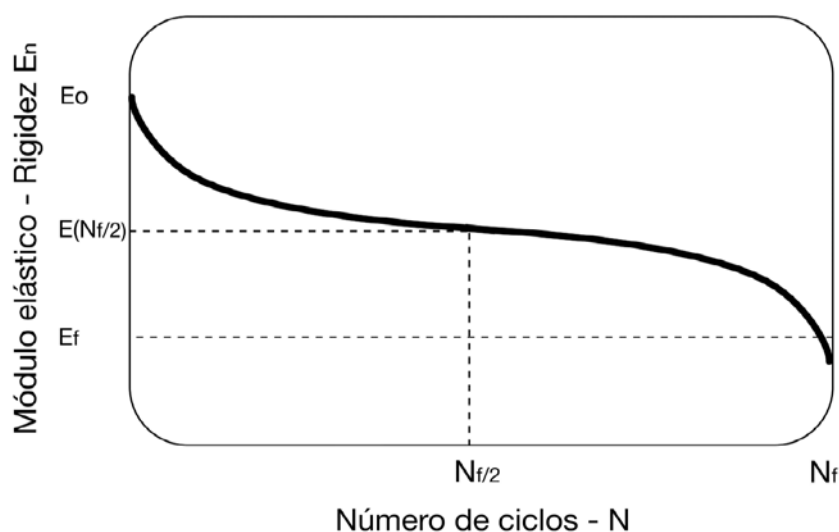


Fig. 217. Representación esquemática de la rigidez frente al número de ciclos, de un ensayo STAIRCASE.

En el origen, $N=0$, se obtiene el módulo de elasticidad convencional del hormigón, E_0 . A medida que el número de ciclos aumenta, la rigidez disminuye, a consecuencia del daño acumulado, de tres formas bien diferenciadas. En primer lugar, se observa una caída hasta alcanzar un tramo de estabilización. Dentro de este tramo, coincidente con la etapa *B* anteriormente comentada, se aprecia un punto de inflexión $(E(N_{f/2}), N_{f/2})$ a partir del cual, la rigidez continúa disminuyendo, siguiendo un ritmo acelerado.

Un análisis preliminar de todos los ensayos STAIRCASE en los que han quedado representados los tres tramos de la curva, indica que, aproximadamente, el punto de inflexión se encuentra en el punto medio de la curva. Es decir, el número de ciclos $N_{f/2}$ del punto de inflexión, se sitúa aproximadamente hacia la mitad del número total de ciclos y corresponde con el punto medio, $E(N_{f/2})$, entre el módulo de elasticidad en el origen, E_0 , y el módulo de elasticidad en rotura por fatiga, E_f .

A continuación, desde la Tabla 130 hasta la Tabla 145 se recogen los datos de los parámetros M_0 , M_1 , M_2 y M_3 de la ecuación de ajuste de las curvas de evolución del módulo de elasticidad o rigidez, $E(N)$, frente al número de ciclos, N , de las dosificaciones de hormigón ensayadas a fatiga de tipo STAIRCASE en el transcurso de la segunda y tercera fase. En la primera de las fases no se consideró registrar la deformación de los hormigones ensayados según esta metodología.

$$E(N) = E_0 + M_1 \cdot N + M_2 \cdot N^2 + M_3 \cdot N^3 \quad (49)$$

Tabla 130. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,65AS-0%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,65AS-0%-01-4	34,38	$-1,71 \cdot 10^{-06}$	$1,03 \cdot 10^{-12}$	$-2,69 \cdot 10^{-19}$	0,74
H-0,65AS-0%-02-5	32,67	$-2,97 \cdot 10^{-06}$	$1,78 \cdot 10^{-12}$	$-4,29 \cdot 10^{-19}$	0,94
H-0,65AS-0%-03-6	31,91	$-1,45 \cdot 10^{-04}$	$4,39 \cdot 10^{-09}$	$-5,16 \cdot 10^{-14}$	0,99
H-0,65AS-0%-04-5	30,67	$-7,51 \cdot 10^{-06}$	$5,37 \cdot 10^{-12}$	$-2,03 \cdot 10^{-18}$	0,99
H-0,65AS-0%-05-4	32,01	$-3,76 \cdot 10^{-06}$	$2,17 \cdot 10^{-12}$	$-5,23 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,65AS-0%-07-4	33,33	$-4,11 \cdot 10^{-06}$	$2,34 \cdot 10^{-12}$	$-5,89 \cdot 10^{-19}$	0,98

Tabla 131. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-065AS-20%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,65AS-20%-02-4	31,90	$-1,91 \cdot 10^{-04}$	$4,89 \cdot 10^{-09}$	$-4,04 \cdot 10^{-14}$	0,98
H-0,65AS-20%-03-3	32,18	$-3,91 \cdot 10^{-06}$	$2,74 \cdot 10^{-12}$	$-7,24 \cdot 10^{-19}$	0,93
H-0,65AS-20%-04-4	31,6	$-2,98 \cdot 10^{-06}$	$1,67 \cdot 10^{-12}$	$-3,24 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,65AS-20%-05-5	31,27	$-4,71 \cdot 10^{-06}$	$2,18 \cdot 10^{-12}$	$-5,18 \cdot 10^{-19}$	0,99

Tabla 132. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,65AS-50%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,65AS-50%-03-4	27,13	$-1,10 \cdot 10^{-06}$	$6,89 \cdot 10^{-13}$	$-1,54 \cdot 10^{-19}$	0,88
H-0,65AS-50%-04-5	29,44	$-1,29 \cdot 10^{-04}$	$1,87 \cdot 10^{-09}$	$-1,00 \cdot 10^{-14}$	0,98
H-0,65AS-50%-05-4	29,62	$-4,88 \cdot 10^{-06}$	$3,24 \cdot 10^{-12}$	$-7,83 \cdot 10^{-19}$	0,91
H-0,65AS-50%-06-5	29,34	$-3,79 \cdot 10^{-06}$	$2,33 \cdot 10^{-12}$	$-5,88 \cdot 10^{-19}$	0,92
H-0,65AS-50%-07-4	29,39	$-1,89 \cdot 10^{-06}$	$8,36 \cdot 10^{-13}$	$-1,42 \cdot 10^{-19}$	0,90

Tabla 133. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,65AS-100%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,65AS-100%-01-3	23,56	$-3,71 \cdot 10^{-06}$	$2,65 \cdot 10^{-12}$	$-6,76 \cdot 10^{-19}$	0,92
H-0,65AS-100%-02-4	23,10	$-1,84 \cdot 10^{-05}$	$9,54 \cdot 10^{-16}$	$-3,30 \cdot 10^{-16}$	0,99
H-0,65AS-100%-03-3	23,86	$-4,39 \cdot 10^{-06}$	$2,86 \cdot 10^{-12}$	$-7,22 \cdot 10^{-19}$	0,95
H-0,65AS-100%-04-4	23,51	$-3,90 \cdot 10^{-06}$	$2,46 \cdot 10^{-12}$	$-6,19 \cdot 10^{-19}$	0,97
H-0,65AS-100%-05-5	23,15	$-5,56 \cdot 10^{-06}$	$1,01 \cdot 10^{-11}$	$-1,15 \cdot 10^{-17}$	0,99

Tabla 134. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,50AS-0%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,50AS-0%-02-6	35,39	$-2,08 \cdot 10^{-04}$	$1,32 \cdot 10^{-12}$	$-3,41 \cdot 10^{-19}$	0,95
H-0,50AS-0%-03-7	35,51	$-1,01 \cdot 10^{-04}$	$3,56 \cdot 10^{-09}$	$-6,51 \cdot 10^{-14}$	0,99
H-0,50AS-0%-04-6	35,16	$-9,34 \cdot 10^{-05}$	$1,83 \cdot 10^{-09}$	$-1,23 \cdot 10^{-14}$	0,97
H-0,50AS-0%-05-5	35,26	$-1,89 \cdot 10^{-06}$	$1,29 \cdot 10^{-12}$	$-3,32 \cdot 10^{-19}$	0,94
H-0,50AS-0%-06-6	34,74	$-1,77 \cdot 10^{-06}$	$9,92 \cdot 10^{-13}$	$-2,51 \cdot 10^{-19}$	0,98

Tabla 135. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,50AS-20%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,50AS-20%-02-6	34,49	$-6,43 \cdot 10^{-05}$	$6,17 \cdot 10^{-10}$	$-2,48 \cdot 10^{-15}$	0,98
H-0,50AS-20%-03-5	33,91	$-2,08 \cdot 10^{-06}$	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$-2,27 \cdot 10^{-19}$	0,99
H-0,50AS-20%-04-6	32,96	$-3,43 \cdot 10^{-06}$	$2,04 \cdot 10^{-12}$	$-5,23 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,50AS-20%-05-6	34,01	$-1,68 \cdot 10^{-04}$	$3,53 \cdot 10^{-09}$	$-6,41 \cdot 10^{-16}$	0,99

Tabla 136. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,50AS-50%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,50AS-50%-01-5	33,74	$-8,09 \cdot 10^{-07}$	$1,15 \cdot 10^{-12}$	$-3,65 \cdot 10^{-19}$	0,93
H-0,50AS-50%-02-6	35,18	$-1,81 \cdot 10^{-05}$	$5,65 \cdot 10^{-11}$	$-1,31 \cdot 10^{-16}$	0,99
H-0,50AS-50%-03-5	34,35	$-3,57 \cdot 10^{-06}$	$2,45 \cdot 10^{-12}$	$-6,16 \cdot 10^{-19}$	0,96
H-0,50AS-50%-05-5	31,56	$-6,19 \cdot 10^{-06}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$-6,61 \cdot 10^{-18}$	0,94
H-0,50AS-50%-06-6	36,79	$-2,74 \cdot 10^{-06}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$	$-1,68 \cdot 10^{-17}$	0,96

Tabla 137. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,50AS-100%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,50AS-100%-02-5	24,86	$-1,15 \cdot 10^{-04}$	$3,81 \cdot 10^{-09}$	$-8,97 \cdot 10^{-14}$	0,98
H-0,50AS-100%-03-4	23,26	$-2,19 \cdot 10^{-06}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$	$-2,72 \cdot 10^{-19}$	0,99
H-0,50AS-100%-04-5	28,11	$-3,72 \cdot 10^{-04}$	$1,55 \cdot 10^{-08}$	$-2,48 \cdot 10^{-13}$	0,99
H-0,50AS-100%-07-4	26,92	$-1,06 \cdot 10^{-04}$	$118 \cdot 10^{-09}$	$-4,91 \cdot 10^{-15}$	0,98

Tabla 138. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,55ARS-0%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,55-0%-01-4	38,75	$-8,81 \cdot 10^{-07}$	$7,29 \cdot 10^{-13}$	$-1,75 \cdot 10^{-19}$	0,96
H-0,55-0%-02-5	37,25	$-2,61 \cdot 10^{-06}$	$1,86 \cdot 10^{-12}$	$-4,63 \cdot 10^{-19}$	0,95
H-0,55-0%-03-6	36,44	$-4,09 \cdot 10^{-06}$	$2,03 \cdot 10^{-13}$	$-2,98 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,55-0%-04-7	34,35	$-2,59 \cdot 10^{-06}$	$1,51 \cdot 10^{-12}$	$-5,17 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,55-0%-05-8	36,71	$-8,44 \cdot 10^{-06}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$	$-4,84 \cdot 10^{-18}$	0,82

Tabla 139. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,55ARS-20%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,55ARS-20%-01-5	35,28	$-3,03 \cdot 10^{-06}$	$2,12 \cdot 10^{-12}$	$-5,32 \cdot 10^{-19}$	0,97
H-0,55ARS-20%-02-6	33,56	$-2,26 \cdot 10^{-06}$	$1,13 \cdot 10^{-12}$	$-2,11 \cdot 10^{-19}$	0,97
H-0,55ARS-20%-05-5	36,97	$-5,83 \cdot 10^{-07}$	$2,49 \cdot 10^{-13}$	$-3,71 \cdot 10^{-19}$	0,95
H-0,55ARS-20%-06-5	35,38	$-5,10 \cdot 10^{-06}$	$3,68 \cdot 10^{-12}$	$-9,75 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,55ARS-20%-09-5	36,48	$-2,99 \cdot 10^{-06}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$	$-5,66 \cdot 10^{-19}$	0,93

Tabla 140. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,55ARS-50%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,55ARS-50%-01-6	31,05	$-2,72 \cdot 10^{-05}$	$5,07 \cdot 10^{-10}$	$-7,53 \cdot 10^{-15}$	0,99
H-0,55ARS-50%-02-5	32,52	$-1,26 \cdot 10^{-06}$	$4,22 \cdot 10^{-13}$	$-7,41 \cdot 10^{-20}$	0,94
H-0,55ARS-50%-03-6	33,47	$-1,98 \cdot 10^{-05}$	$2,83 \cdot 10^{-11}$	$-1,55 \cdot 10^{-17}$	0,99
H-0,55ARS-50%-05-4	35,97	$-3,17 \cdot 10^{-05}$	$8,16 \cdot 10^{-10}$	$-6,71 \cdot 10^{-15}$	0,90
H-0,55ARS-50%-07-4	35,06	$-6,00 \cdot 10^{-06}$	$5,56 \cdot 10^{-12}$	$-1,79 \cdot 10^{-18}$	0,96

Tabla 141. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,55ARS-100%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,55ARS-100%-03-2	32,92	$-2,66 \cdot 10^{-06}$	$2,33 \cdot 10^{-12}$	$-6,28 \cdot 10^{-19}$	0,73
H-0,55ARS-100%-04-3	31,52	$-1,26 \cdot 10^{-06}$	$4,22 \cdot 10^{-13}$	$-7,41 \cdot 10^{-20}$	0,94
H-0,55ARS-100%-05-4	30,01	$-4,47 \cdot 10^{-06}$	$3,22 \cdot 10^{-12}$	$-8,79 \cdot 10^{-19}$	0,94

Tabla 142. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,45ARS-0%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,45ARS-0%-01-10	43,10	$-4,88 \cdot 10^{-05}$	$1,97 \cdot 10^{-14}$	$-2,68 \cdot 10^{-19}$	1,00
H-0,45ARS-0%-02-9	37,90	$-1,89 \cdot 10^{-04}$	$7,04 \cdot 10^{-13}$	$-8,92 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,45ARS-0%-03-8	35,20	$-1,94 \cdot 10^{-05}$	$7,58 \cdot 10^{-12}$	$-1,99 \cdot 10^{-19}$	1,00
H-0,45ARS-0%-05-8	38,24	$-2,23 \cdot 10^{-06}$	$4,62 \cdot 10^{-13}$	$-2,90 \cdot 10^{-18}$	0,67
H-0,45ARS-0%-06-9	34,50	$-4,13 \cdot 10^{-04}$	$5,34 \cdot 10^{-12}$	$-2,20 \cdot 10^{-18}$	0,98

Tabla 143. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,45ARS-20%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,45ARS-20%-01-7	34,33	$-1,60 \cdot 10^{-06}$	$1,16 \cdot 10^{-12}$	$-2,70 \cdot 10^{-19}$	0,77
H-0,45ARS-20%-02-8	36,23	$-8,91 \cdot 10^{-07}$	$4,84 \cdot 10^{-13}$	$-9,44 \cdot 10^{-20}$	0,58

Tabla 144. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,45ARS-50%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,45ARS-50%-02-4	35,57	$-3,04 \cdot 10^{-06}$	$2,58 \cdot 10^{-12}$	$-7,02 \cdot 10^{-19}$	0,66
H-0,45ARS-50%-03-5	32,88	$-2,41 \cdot 10^{-06}$	$2,05 \cdot 10^{-12}$	$-5,74 \cdot 10^{-19}$	0,84
H-0,45ARS-50%-04-6	31,61	$-5,58 \cdot 10^{-06}$	$5,90 \cdot 10^{-12}$	$-2,77 \cdot 10^{-18}$	0,97
H-0,45ARS-50%-05-5	33,03	$-8,68 \cdot 10^{-08}$	$1,13 \cdot 10^{-13}$	$-1,27 \cdot 10^{-19}$	0,45
H-0,45ARS-50%-06-6	32,16	$-1,90 \cdot 10^{-06}$	$1,93 \cdot 10^{-12}$	$-2,96 \cdot 10^{-19}$	0,93
H-0,45ARS-50%-07-7	32,12	$-7,65 \cdot 10^{-05}$	$1,13 \cdot 10^{-09}$	$-5,62 \cdot 10^{-15}$	0,97
H-0,45ARS-50%-08-6	33,09	$-1,48 \cdot 10^{-06}$	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$-4,78 \cdot 10^{-19}$	0,98

Tabla 145. Parámetros del ajuste polinomial de tercer orden de cada una de las curvas rigidez frente al número de ciclos del hormigón H-0,45ARS-100%.

Muestra-Escalón	E_0	M_1	M_2	M_3	R
H-0,45ARS-100%-01-3	29,49	$-2,95 \cdot 10^{-06}$	$2,07 \cdot 10^{-12}$	$-5,34 \cdot 10^{-19}$	0,90
H-0,45ARS-100%-02-4	29,06	$-3,87 \cdot 10^{-06}$	$2,28 \cdot 10^{-12}$	$-5,44 \cdot 10^{-19}$	0,96
H-0,45ARS-100%-03-5	27,47	$-2,32 \cdot 10^{-06}$	$5,87 \cdot 10^{-13}$	$-3,78 \cdot 10^{-20}$	0,96
H-0,45ARS-100%-04-4	28,26	$-2,24 \cdot 10^{-06}$	$1,39 \cdot 10^{-12}$	$-3,36 \cdot 10^{-19}$	0,93
H-0,45ARS-100%-05-5	27,86	$-3,99 \cdot 10^{-06}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	$-5,79 \cdot 10^{-19}$	0,98
H-0,45ARS-100%-07-5	28,09	$-1,19 \cdot 10^{-05}$	$3,03 \cdot 10^{-11}$	$-4,32 \cdot 10^{-17}$	0,97

El parámetro E_0 corresponde al valor del módulo de elasticidad en el origen o módulo de elasticidad convencional del hormigón. El resto de parámetros, proporciona información acerca de la evolución de la rigidez. Puede observarse cómo a medida que los intervalos de carga son mayores, el parámetro M_1 también incrementa.

El parámetro M_2 está íntimamente relacionado con el número de ciclos que, bajo las correspondientes tensiones, el hormigón es capaz de soportar. El valor de este último parámetro es tanto mayor cuanto menor es el número de ciclos soportado por el hormigón y, en los casos en los que el hormigón no hubiera alcanzado la rotura antes de los $2 \cdot 10^6$ ciclos, su valor podría proporcionar una estimación del número total de ciclos que podría resistir. En general, se observa que todos aquellos hormigones que presentan un parámetro M_2 mayor de $2 \cdot 10^{-12}$ no superan los $2 \cdot 10^6$ ciclos.

El último parámetro, M_3 , está relacionado con la curvatura de las gráficas en la etapa de interconexión de fisuras.

Igualando la segunda derivada de $E(N)$, expresión (49), respecto del número de ciclos evaluada en el punto $N_{f/2}$ e igualando a cero, puede obtenerse el punto de inflexión, antes descrito y es posible situar el punto de cambio de comportamiento cóncavo-convexo, expresión, a partir de los datos experimentales.

$$\left. \frac{d^2 E(N)}{dN^2} \right|_{N_{f/2}} = 0 \Rightarrow N_{f/2} = -\frac{M_2}{3M_3} \quad (50)$$

Como se ha comentado anteriormente, de los resultados obtenidos se desprende que el punto de inflexión, $N_{f/2}$, se sitúa hacia la mitad del número de ciclos totales, por lo tanto el número de ciclos totales que la probeta es capaz de resistir, calculado a partir del punto $N_{f/2}$ es:

$$N_f = 2N_{f/2} = -\frac{2M_2}{3M_3} \quad (51)$$

Ahora, imponiendo como criterio de vida infinita $N=2 \cdot 10^6$ ciclos se obtiene que:

$$\text{Si } N_f = 2N_{f/2} = -\frac{2M_2}{3M_3} > 2 \cdot 10^6 \Rightarrow \text{Vida infinita} \quad (52)$$

De lo que puede deducirse, conocida la ecuación $E(N)$, que la relación entre los parámetros M_2 y M_3 ha de ser:

$$\text{Si } M_2 > -3M_3 \cdot 10^6 \Rightarrow \text{Vida infinita} \quad (53)$$

Gráficamente, se han representado todos los valores experimentales obtenidos a partir de la expresión (51) en la Fig. 218, donde se denota con el símbolo "O" a los ensayos que superaron los $2 \cdot 10^6$ ciclos y "X" aquellos en los que hubo rotura antes de los $2 \cdot 10^6$ ciclos. Se observa que aquellos ensayos en los que se verifica la condición de vida infinita se sitúan por encima del valor $2N_{f/2} = 2 \cdot 10^6$ ciclos.

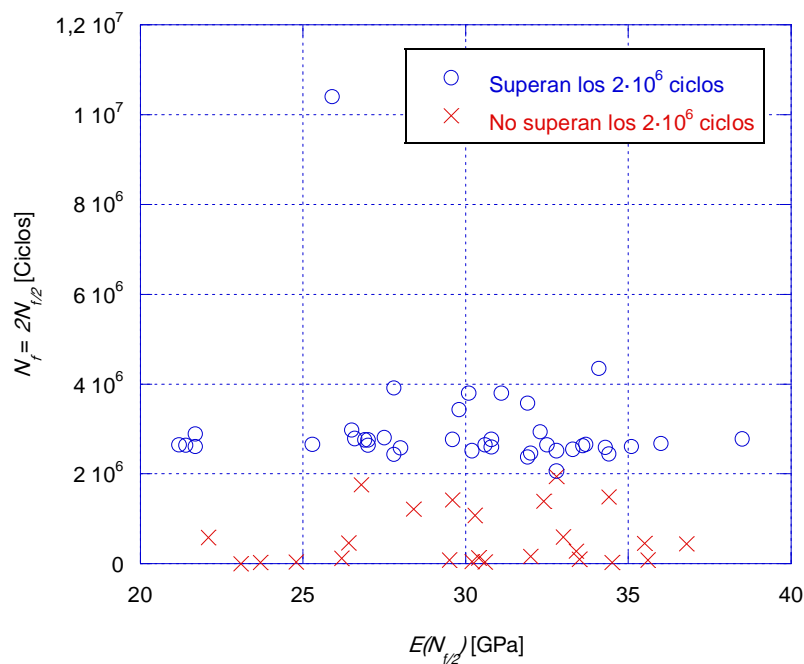


Fig. 218. Representación del valor N_f calculado según (51), donde se han representado con "O" a los ensayos en los que no hubo rotura y "X" aquellos que no superaron los $2 \cdot 10^6$ ciclos.

Puede concluirse, por lo tanto, que sin alcanzar el número máximo de ciclos que el hormigón es capaz de acumular antes de su rotura y una vez superado el valor $N_{f/2}$, puede predecirse si el hormigón presenta vida infinita para los niveles tensionales correspondientes, comprobando la condición (52). El punto $E(N_{f/2})$ es aquel en el que se verifica que la segunda derivada de la función $E(N)$ es nula y, en la práctica, es identificable geoméricamente como el punto de inflexión en el que el comportamiento cambia de cóncavo a convexo.

Con el propósito predecir si el hormigón presenta "vida infinita" en un intervalo de tensiones, a continuación, se analiza la variación de rigidez en los $1 \cdot 10^5$ primeros ciclos. La determinación de la velocidad de pérdida de rigidez o flexibilización en este intervalo de ciclos podrá, posteriormente, compararse con la obtenida en los ensayos LOCATI. Así, en la Fig. 219 se ha representado la *velocidad de pérdida de rigidez* [Pa/ciclo], durante los $1 \cdot 10^5$ primeros ciclos, de todos los ensayos STAIRCASE. En ella puede comprobarse que los ensayos en los que las probetas han superado los $2 \cdot 10^6$ de ciclos (vida infinita), presentan menores velocidades de pérdida de rigidez que los que no superaron el número de ciclos establecido. Puede observarse, también, que aquellos ensayos en los que durante los $1 \cdot 10^5$ primeros ciclos no se supera la

velocidad de pérdida de rigidez de 5000 Pa/ciclo, son aquellos capaces de superar los $2 \cdot 10^6$ de ciclos (vida infinita).

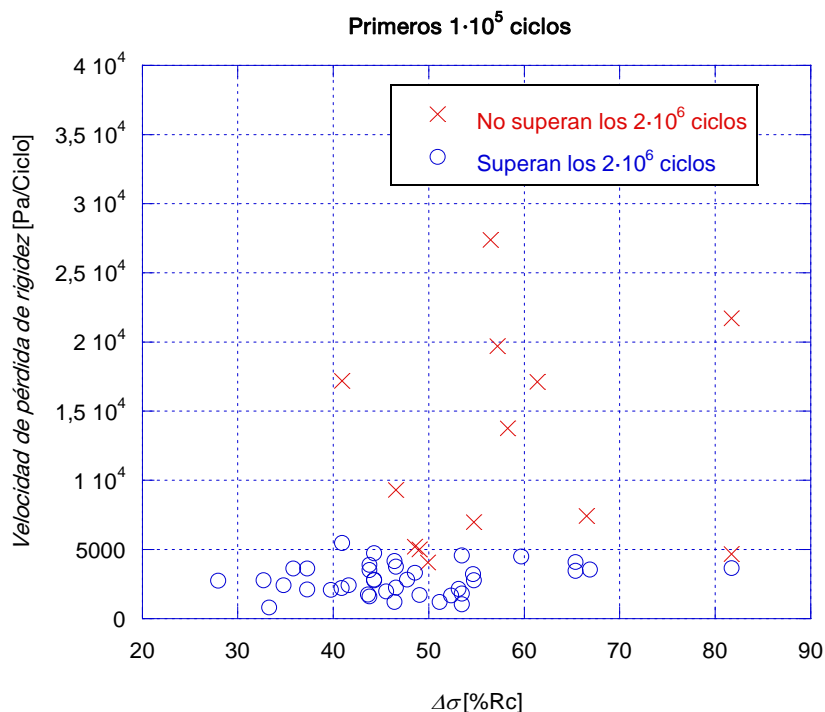


Fig. 219. Representación de la velocidad de pérdida de rigidez en los $1 \cdot 10^5$ primeros ciclos, de todos los ensayos STAIRCASE, donde se han representado con "O" a los ensayos en los que no hubo rotura y "X" aquellos que no superaron los $2 \cdot 10^6$ ciclos.

En el apartado en el que se confrontan las dos metodologías a fatiga se comparan las velocidades de pérdida de rigidez presentadas en Fig. 219, con las obtenidas en el escalón de rotura y anterior de los ensayos STAIRCASE.

4.8.1.2. Límite a fatiga

En cuanto a los análisis de los resultados obtenidos del ensayo de determinación del límite a fatiga, mediante la técnica STAIRCASE, se han obtenido valores en un rango que va desde el 40% hasta el 80% de la resistencia a compresión de los hormigones. No obstante, se observa que para un hormigón de control el rango se reduce considerablemente entre el 60% y el 70% de la resistencia a compresión mientras que los hormigones reciclados son los que aportan mayores dispersiones. Teniendo en cuenta los valores de resistencia a compresión obtenidos, el límite a fatiga se sitúa entre los 25 y 45 MPa.

En términos generales, la incorporación de un 20% de árido reciclado reduce, en el peor de los casos, el límite a fatiga en un 10%, siendo mayor la diferencia cuando la relación agua/cemento efectiva es alta. En este sentido, cabe destacar que a medida que la relación agua/cemento efectiva aumenta, los valores del límite a fatiga tienden a aproximarse entre sí, independientemente del grado de sustitución. Como conclusión final, en relación a los análisis realizados, los resultados obtenidos evidencian que el límite a fatiga está influenciado por la presencia de árido reciclado, especialmente cuando la relación agua/cemento es baja.

4.8.1.3. Límite a fatiga según la relación agua/cemento efectiva

En la Fig. 220 se ha representado el límite a fatiga, obtenido mediante la técnica STAIRCASE frente a la relación agua/cemento efectiva.

Comparando con los ajustes de límite a fatiga según la relación agua/cemento efectiva, se constata que para relaciones agua/cemento superiores a 0,6 la presencia del árido reciclado no influye en el comportamiento a fatiga de los hormigones. Sin embargo, para relaciones agua/cemento bajas, inferiores a 0,5, se observa una fuerte disminución del límite de fatiga, mayor cuanto menor es el porcentaje de árido reciclado utilizado.

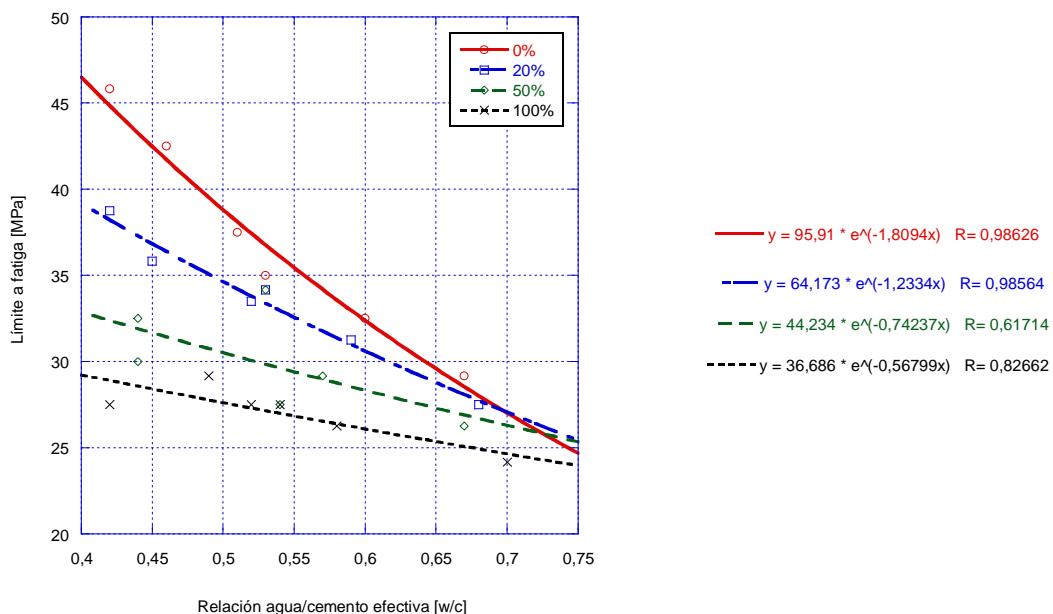


Fig. 220. Límite a fatiga frente a la relación agua/cemento efectiva de los hormigones reciclados.

4.8.2. Método LOCATI

Como paso previo al análisis de los resultados de número de ciclos y deformación obtenidos mediante la técnica LOCATI, se lleva a cabo un análisis del comportamiento de estos hormigones frente a escalones de fatiga consecutivos con nivel tensional superior creciente.

La Fig. 221 recoge la respuesta en términos de deformación de una probeta de hormigón sometida a sucesivos trenes de onda de compresión variables en su nivel tensional máximo cada 100000 ciclos.

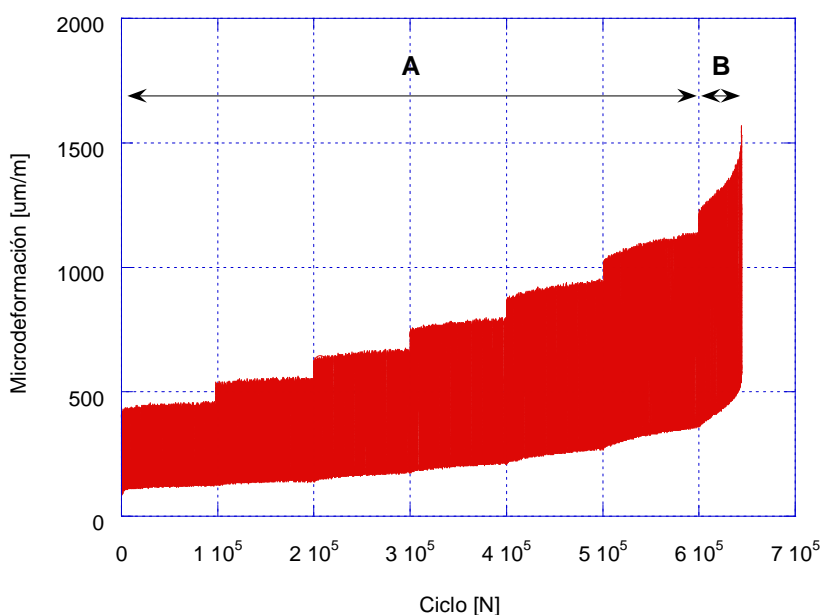


Fig. 221. Representación de la respuesta en deformación frente al número de ciclos de un ensayo LOCATI.

Se han detectado dos distintos tipos de evolución, indicados en la Fig. 221 como *A* y *B*, tanto en los hormigones de control como reciclados. Durante el tramo *A*, la respuesta del material, en cada uno de los escalones *A_i*, es similar, ajustándose a los niveles tensionales establecidos. Sin embargo, el tramo *B*, coincidente con el escalón en el que se produce la rotura, presenta una variación de la deformación que recuerda a la forma descrita en los anteriores ensayos STAIRCASE para el caso de ensayos en los que tiene lugar el fallo por fatiga del hormigón.

Como ha quedado esquematizado, los distintos escalones, *i*, poseen, salvo el último, el mismo número de ciclos y un valor de tensión máxima que se va incrementado. En

el último escalón, el número de ciclos programado es idénticamente igual a los anteriores, no obstante es en este escalón en el que el daño acumulado debido a los sucesivos ciclos provoca el colapso del material. En primera instancia, el límite a fatiga del material se encuentra por debajo del nivel tensional correspondiente al último escalón ya que se ha alcanzado la rotura con un número de ciclos aplicados inferior a los $2 \cdot 10^6$, incluyendo los de los escalones previos.

La Fig. 222 recoge las deformaciones máxima y mínima de cada uno de los escalones frente al número de ciclos: envolventes de la Fig. 221.

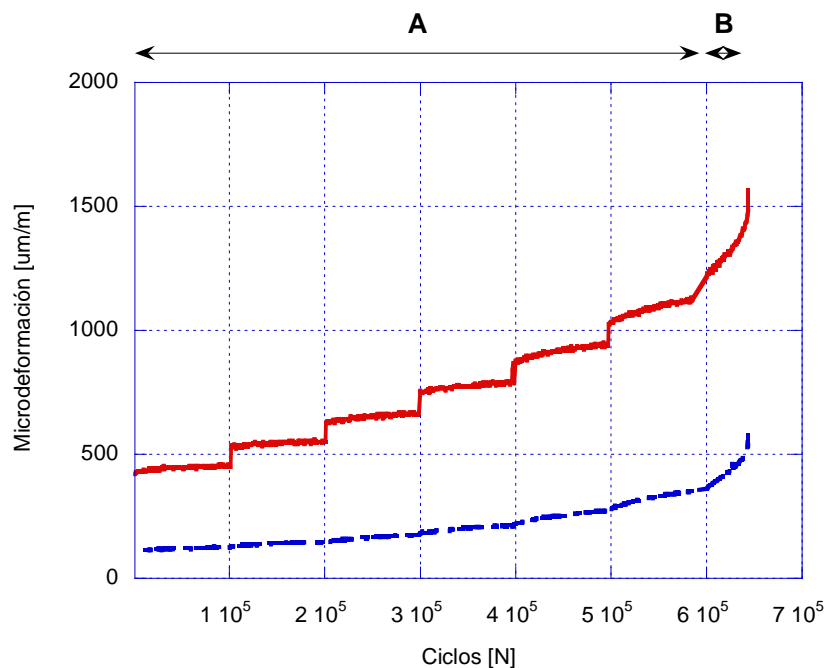


Fig. 222. Deformaciones máxima y mínima de todos los escalones de un ensayo LOCATI.

En cuanto a la primera de las etapas, A, la misma está compuesta por sucesivos escalones A_i . El primer escalón A_1 se representa en detalle en la Fig. 223, donde, como en el resto, los niveles tensionales se mantienen constantes. No obstante, si se atiende a la deformación sufrida por el material durante la acumulación de ciclos, se observan dos distintos comportamientos: A_1 y A_2 .

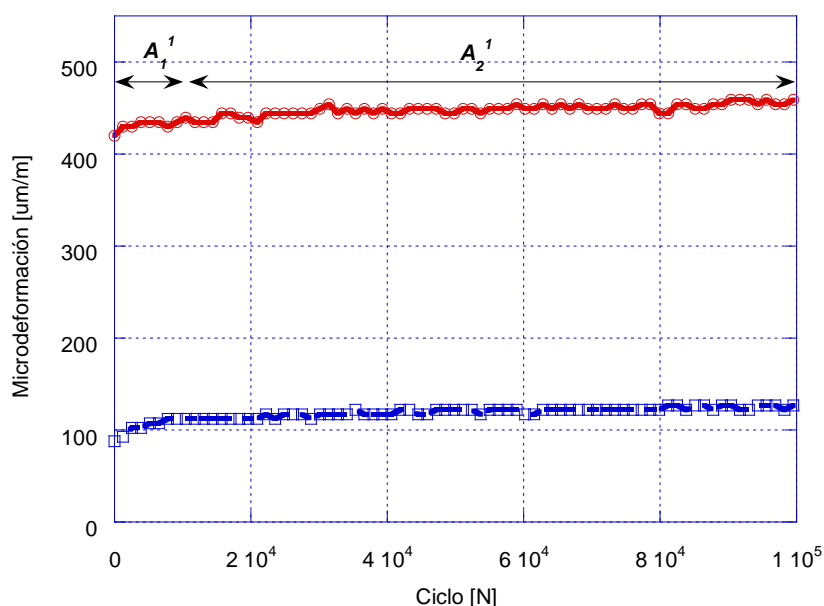


Fig. 223. Deformación máxima (superior) y mínima (inferior) del primer escalón del ensayo LOCATI.

En el primero de los dos tramos, A_1' , se aprecia un aumento de la deformación máxima y mínima, Fig. 223. Además, la velocidad de aumento de la deformación máxima, como se demostrará, es mayor que la de la mínima. Esta diferencia entre las velocidades de aumento de deformación se manifiesta en todos los tramos y etapas hasta la rotura del hormigón. Otra característica singular de este tramo, A_1' , es un aumento, tanto de la deformación máxima como de la mínima, de tipo logarítmico.

En el tramo A_2' se observa, nuevamente, cómo la deformación máxima y mínima aumentan con la acumulación de ciclos. No obstante, en este caso, la velocidad de aumento de deformación, frente al número de ciclos, parece presentar un comportamiento lineal o cuasilineal.

Durante toda la etapa A, como se ha indicado, las deformaciones máximas y mínimas aumentan con un cierto desfase entre ellas a favor de la deformación máxima, con la acumulación del número de ciclos. Ello supone que el módulo de elasticidad del material, por ser los niveles tensionales constantes en cada uno de los escalones, se verá reducido y, por lo tanto, el material flexibiliza con la acumulación del número de ciclos.

En cada uno de los escalones A^i de la etapa A , el subtramo A^i , es cada vez menos significativo ocupando prácticamente todo el escalón el componente A^i_2 de evolución cuasilineal.

Por último, la región B (Fig. 224) en la que tiene lugar la rotura, es aquella en la que las microfrazas generadas en los escalones precedentes y, especialmente, las debidas a las tensiones propias de este escalón, comienzan a interconexión entre sí. En este tramo, se encuentra la máxima velocidad de aumento de deformaciones máximas y mínimas y la mayor diferencia entre ellas.

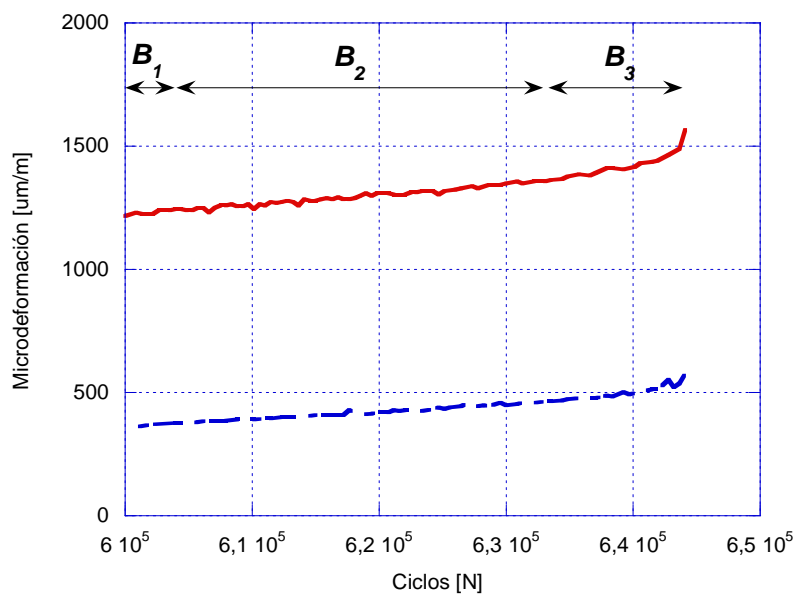


Fig. 224. Deformación máxima y mínima respecto del número de ciclos del escalón de rotura, región B .

En este escalón, Fig. 224, pueden identificarse nuevamente el tramo de crecimiento, B_1 , notablemente menor que en el caso del ensayo STAIRCASE apenas apreciable debido a que el mismo tiene lugar en escalones precedentes, el de crecimiento de la deformación cuasilineal, B_2 , ambos presentes también en los anteriores escalones, y un nuevo comportamiento de tipo exponencial en cuanto al crecimiento de la deformación, máxima y mínima, con respecto al número de ciclos, B_3 .

4.8.2.1. Deformación por fatiga LOCATI

Una manera de analizar el daño sufrido por el material a lo largo de la consecución de los distintos ciclos es el estudio de la evolución de la diferencia entre la deformación

máxima y mínima del material a lo largo de los sucesivos ciclos. En las Fig. 225 y Fig. 226 se han representado los tramos de deformación máxima y mínima en cada uno de los escalones, del ejemplo analizado, ajustados linealmente.

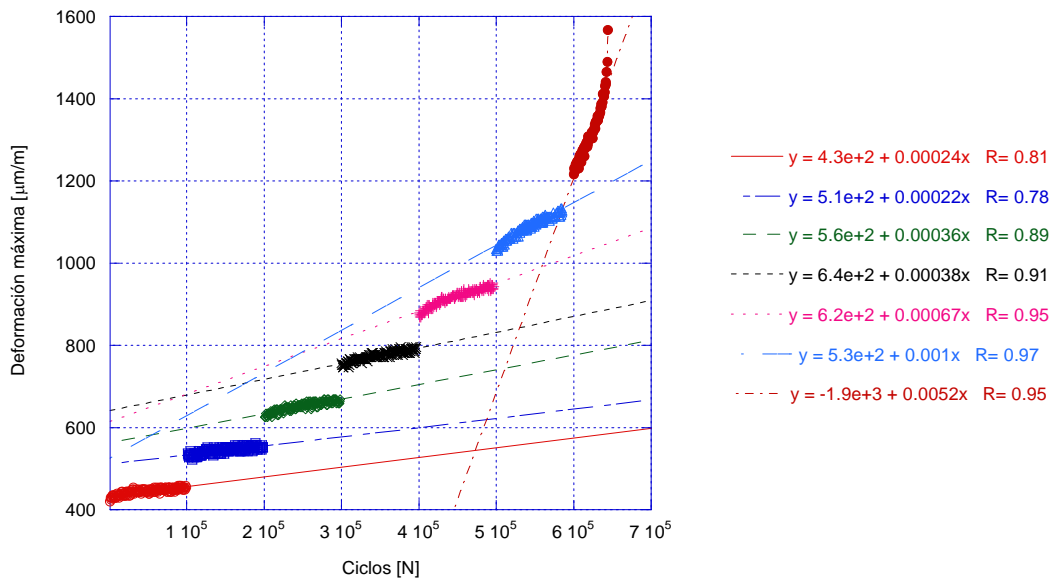


Fig. 225. Tramos de deformación máxima frente al número de ciclos y su ajuste lineal.

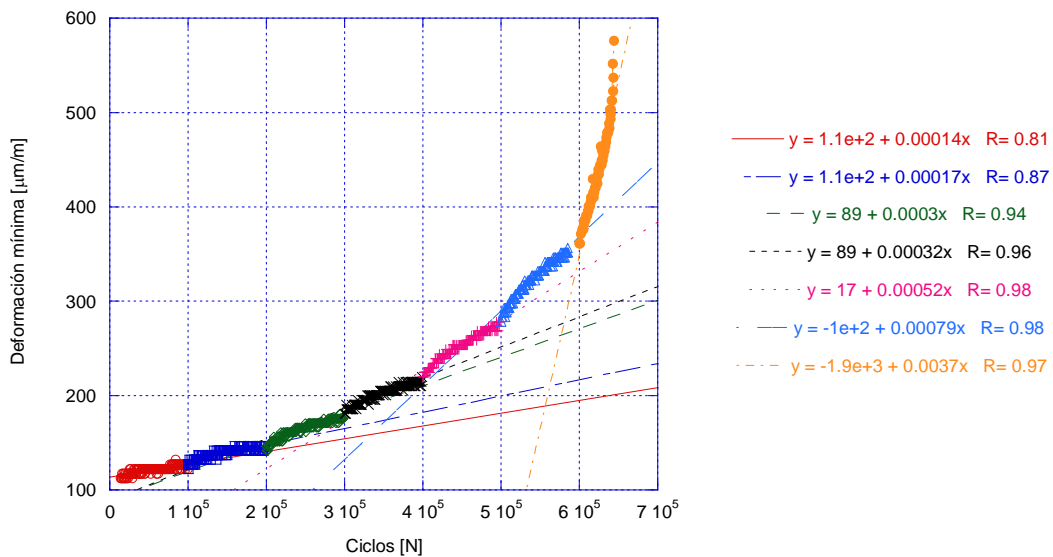


Fig. 226. Tramos de deformación mínima frente al número de ciclos y su ajuste lineal.

Nótese que el ajuste presenta mejores coeficientes de regresión a medida que aumenta el número de ciclos, salvo en el último. Ello es debido a que a medida que se suceden los escalones el tramo A_i^j , no lineal es cada vez menos significativo. No

obstante, una vez alcanzado el escalón de rotura y la consecuente aparición del comportamiento B_3 el coeficiente de regresión se ve reducido.

En el caso de la deformación mínima, el mayor valor de la deformación de un escalón corresponde con el menor valor de deformación del siguiente escalón.

En primera aproximación, puede considerarse que la deformación máxima en cada uno de los escalones aumenta linealmente con el número de ciclos. Esta suposición permite nuevamente, en base a la comparación de las pendientes de cada tramo frente al número de ciclos, identificar el escalón en el que se sitúa el límite a fatiga del hormigón objeto de estudio.

En la Fig. 227 se ha representado la evolución de la pendiente de deformación máxima y mínima respecto de la tensión máxima del escalón correspondiente del ejemplo anterior.

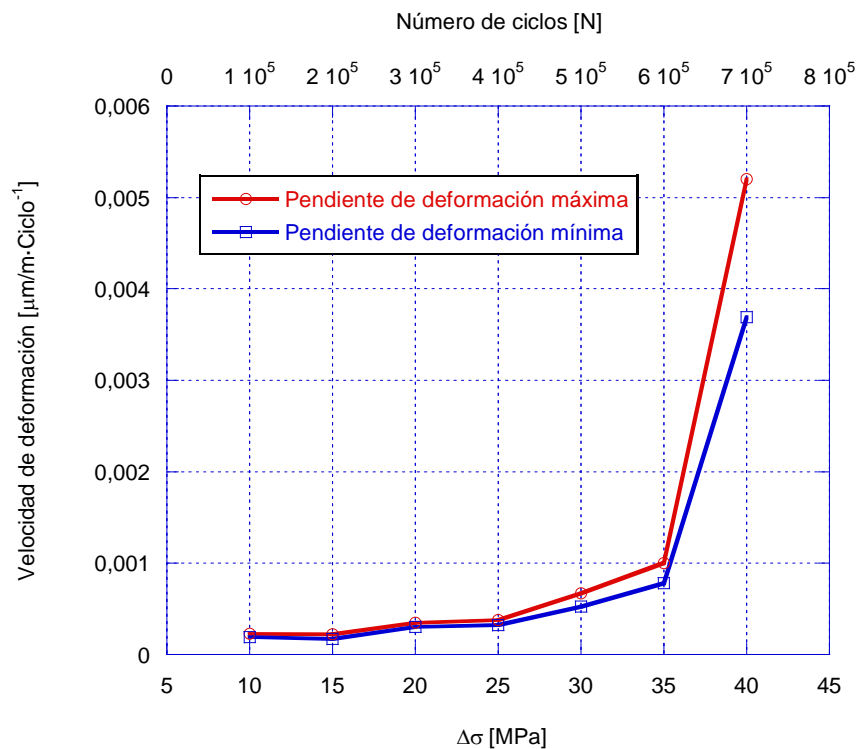


Fig. 227. Velocidad de deformación respecto de la tensión del escalón y número de ciclos.

En consecuencia, la velocidad de deformación puede ser utilizada como un indicador del daño acumulado por el hormigón. Esta variable aumenta ligeramente al aumentar

la tensión máxima aplicada hasta que se supera el límite a fatiga del material. A partir del límite a fatiga, la velocidad de deformación del material en el escalón aumenta desproporcionadamente, en comparación con los escalones anteriores.

Como se ha señalado anteriormente, el límite a fatiga del material ha de encontrarse en algún intervalo de tensiones anterior al de colapso. En particular, la evolución de la deformación máxima parece ser el parámetro más adecuado para el estudio del comportamiento del hormigón frente a trenes de onda LOCATI, por su mayor variación en el escalón de rotura.

En Fig. 228, Fig. 229, Fig. 230 y Fig. 231 se recoge la evolución de la pendiente de deformación máxima (una vez estabilizada) frente a la tensión del escalón correspondiente, expresada en porcentaje con respecto del límite a fatiga obtenido por el método STAIRCASE, para los hormigones con 0%, 20%, 50% y 100% de incorporación de árido reciclado respectivamente. En cada una de las figuras se han identificado los puntos correspondientes al antepenúltimo, penúltimo y último escalón del ensayo correspondiente.

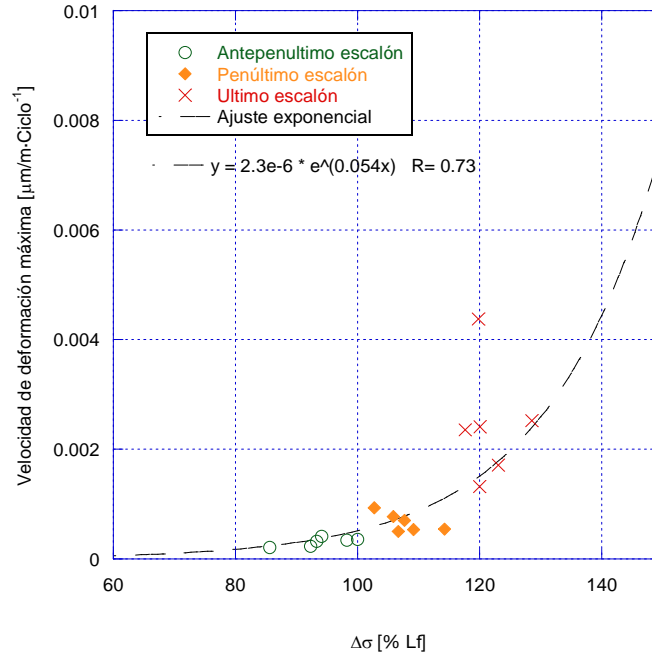


Fig. 228. Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones de control.

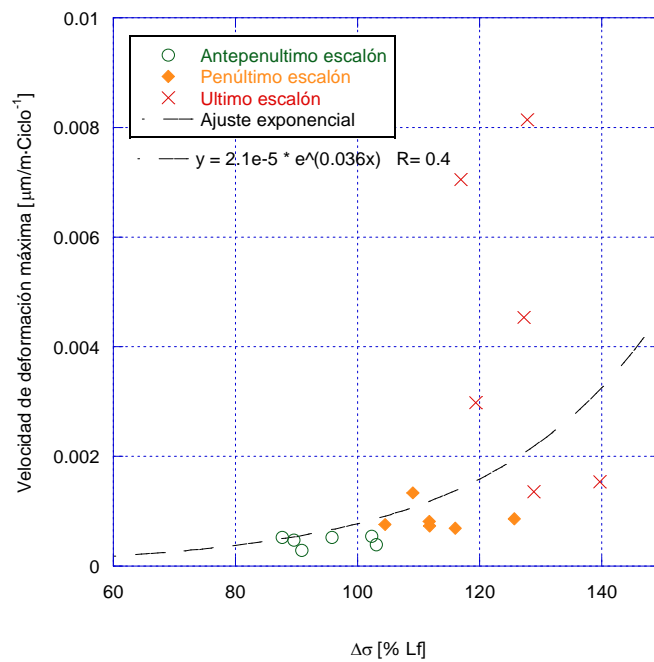


Fig. 229. Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 20% de incorporación.

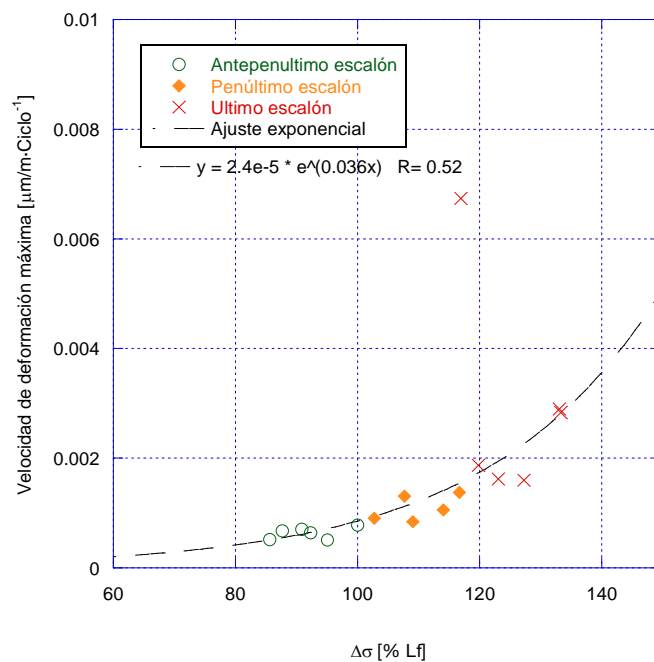


Fig. 230. Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 50% de incorporación.

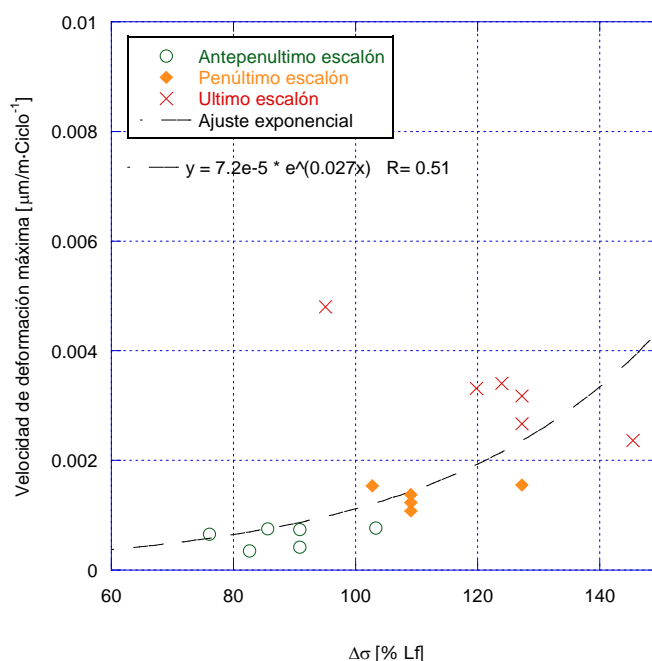


Fig. 231. Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 100% de incorporación.

En términos generales, el antepenúltimo escalón se sitúa entre el 80% y 100% del límite a fatiga del material, el penúltimo escalón entre el 100 y el 120% y, finalmente, el escalón de rotura del ensayo LOCATI se sitúa aproximadamente entre el 120% y 140% del límite a fatiga obtenido en el ensayo STAIRCASE.

La Tabla 146 recoge los valores de velocidad de deformación máxima, del ajuste exponencial de cada uno de los grados de sustitución, en el punto donde el intervalo de tensiones alcanza el límite a fatiga del hormigón correspondiente.

Tabla 146. Velocidad de deformación máxima y deformación estimada a los $2 \cdot 10^6$ ciclos.

Hormigón	V_{DM}^{100} [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{Ciclo}^{-1}$] al 100% del Lf	ϵ_{max} [$\mu\text{m}/\text{m}$] a $2 \cdot 10^6$ ciclos
H-0%	0,00060	1200
H-20%	0,00075	1500
H-50%	0,00086	1750
H-100%	0,00100	2000

El valor de deformación crítica obtenido predice una deformación máxima a los $2 \cdot 10^6$ ciclos de entre 1200 y 2000 microdeformaciones. Este valor coincide en gran medida con los valores de deformación, obtenidos en los ensayos STAIRCASE y LOCATI, en rotura: 1338, 1517, 1629 y 1819 para 0%, 20%, 50% y 100% de sustitución.

De los análisis correspondientes puede concluirse que los hormigones de control son más rígidos que los reciclados. El aumento del grado de incorporación proporciona hormigones más flexibles. La diferencia entre la deformación en rotura estática y la deformación por fatiga es tanto menor cuanto mayor es el grado de incorporación de árido reciclado. En comparación con la resistencia a compresión correspondiente, los hormigones reciclados colapsan a porcentajes de tensión menores.

Tras la obtención de estos resultados, se sugiere un nuevo ensayo LOCATI, en esta ocasión entre las tensiones del antepenúltimo y penúltimo escalón, con intervalos de tensión menores a 5 MPa, que permitirá afinar, en mayor medida, el límite a fatiga del hormigón mediante esta metodología.

4.8.2.2. Análisis de resultados por fases

En lo referente a los ensayos LOCATI efectuados sobre los distintos hormigones reciclados correspondientes a la primera fase, se observa que, a medida que aumenta el grado de incorporación de árido reciclado, el número de ciclos que resiste el hormigón reciclado se ve disminuido, así como la tensión máxima aplicada. En ambos hormigones, la rotura se ha producido cuando la rigidez ha disminuido a un valor de aproximadamente el 80% del que presentaba antes de la fatiga. La influencia del árido reciclado a este respecto, es mayor sobre el hormigón H-0,50 que sobre el H-0,65.

En relación a los resultados correspondientes a la segunda fase, hormigones H-0,50AS y H-0,65AS, nuevamente la combinación del nivel tensional de rotura y el número de ciclos alcanzado guarda relación directa con el límite a fatiga calculado por el método STAIRCASE. No obstante, en este caso, los niveles tensionales de rotura, como sucede con la resistencia a compresión, se sitúan por debajo de los correspondientes a los hormigones reciclados de la primera fase.

4.8.3. Relación entre los métodos LOCATI y STAIRCASE

La caracterización realizada pretende ser un punto de partida que permita establecer una relación entre los resultados obtenidos, en cuanto a comportamiento a fatiga, mediante las dos distintas metodologías: LOCATI y STAIRCASE.

Como ya se ha comentado, el planteamiento LOCATI requiere de una sola probeta para estimar el intervalo de tensiones donde se produce el fallo por fatiga, mientras que, la metodología STAIRCASE proporciona un valor estadístico del límite a fatiga a través del ensayo de un importante número de probetas basado en el concepto *pass-fail*.

En los dos casos, LOCATI y STAIRCASE, se ha observado un comportamiento de los hormigones similar: una etapa de creación de fisuras, otra de estabilización y crecimiento y, finalmente, una de interconexión de las mismas. Cada una de estas etapas está asociada a una evolución de la rigidez. Así, en la primera de las etapas (primeros ciclos) la generación de daños en forma de fisuras es de tipo exponencial decreciente. En el caso del ensayo LOCATI esta etapa es tanto más pronunciada cuanto menos escalones previos haya superado la probeta. Por lo tanto máxima siempre en el primer escalón. Por el contrario, en el ensayo STAIRCASE, bajo niveles tensionales constantes, esta etapa tiene lugar en los primeros miles de ciclos para, después, evolucionar a un comportamiento cuasilineal.

Cuando los niveles tensionales se sitúan en las proximidades del límite a fatiga, las velocidades de deformación son mayores que en el caso en el que los niveles se encuentren alejados de éste. Finalmente, la última etapa, interconexión de fisuras, en el ensayo LOCATI tiene lugar siempre en el escalón de rotura y no antes. En el caso del ensayo STAIRCASE, aparece o no en función de si los niveles de tensión están próximos o no al límite a fatiga.

En este sentido, una observación detallada revela que el daño generado, representado por la evolución de la rigidez, por la acumulación de ciclos es similar en los dos casos cuando los niveles tensionales son equivalentes. De ello, se deduce que existe una relación entre las dos metodologías. En todos los casos se ha encontrado que el escalón de rotura del ensayo LOCATI se sitúa por encima del límite a fatiga obtenido por el método STAIRCASE. Este resultado es consecuencia de que

el daño acumulado por el material durante el transcurso de los primeros ciclos es mínimo. En este sentido, los resultados sugieren que el límite a fatiga obtenido mediante la metodología STAIRCASE, L_F , puede obtenerse como función de la tensión del escalón de rotura en el ensayo LOCATI $\Delta\sigma_L$:

$$L_F = f(\Delta\sigma_L) \quad (54)$$

En la Fig. 232 se presentan todos los valores de la tensión del escalón de rotura del ensayo LOCATI frente al límite a fatiga obtenido mediante la técnica STAIRCASE, de todas las dosificaciones estudiadas.

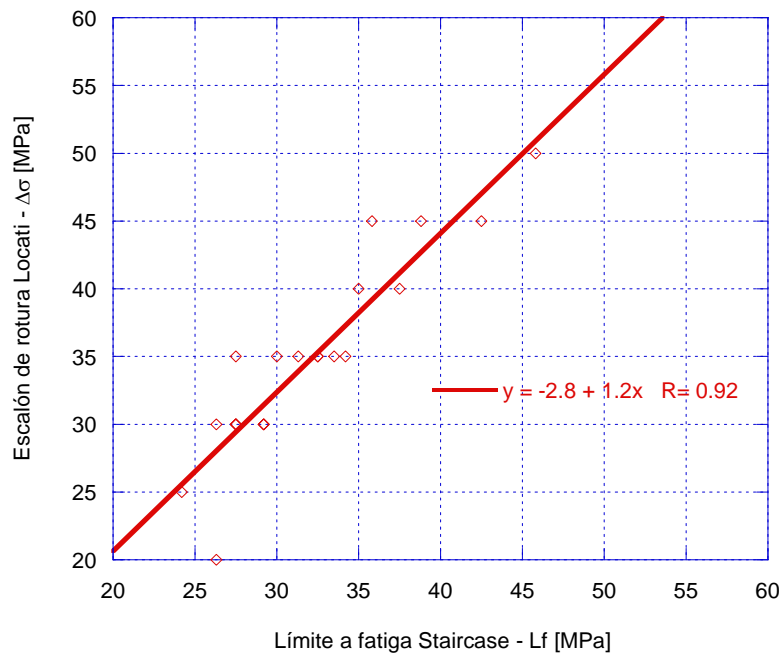


Fig. 232. Tensión del escalón de rotura LOCATI frente al límite a fatiga obtenido mediante la técnica STAIRCASE para todos los hormigones estudiados.

Del ajuste lineal observado entre ambos valores, se obtiene que:

$$L_F = \frac{\Delta\sigma_L + 2,8}{1,2} = 0,8 \cdot \Delta\sigma_L + 1,4 \quad (55)$$

Dada la naturaleza estadística de la metodología STAIRCASE, el valor del Límite a Fatiga lleva asociada una incertidumbre que se sitúa en torno a los 3 MPa. Por ello, en primera aproximación, puede afirmarse el Límite a Fatiga del hormigón se sitúa en un 80% de la tensión del escalón de rotura del ensayo LOCATI, $\Delta\sigma_L$, despreciando el término independiente de (55).

Se concluye, en primera aproximación, que el Límite a Fatiga del hormigón puede ser determinado mediante la técnica LOCATI según:

$$L_F = 0,8 \cdot \Delta\sigma_L \quad (56)$$

Este resultado es además coherente con los deducidos de las Fig. 228, Fig. 228, Fig. 229, Fig. 230 y Fig. 231, donde se puede observar que el escalón de rotura se sitúa en torno ligeramente por encima del 120% del límite a fatiga. No obstante, tal y como se ha comentado, se recomienda realizar un nuevo ensayo LOCATI entre los niveles tensionales correspondientes al antepenúltimo y último escalón con el objetivo de ajustar aún más los resultados y confirmar lo propuesto en (56).

4.9. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

De las micrografías presentadas en el capítulo de resultados, obtenidas de probetas ensayadas y rotas a fatiga, pueden extraerse las siguientes conclusiones.

La forma de rotura de las probetas es similar a la que tiene lugar cuando éstas son ensayadas a compresión. No obstante, la superficie correspondiente a la fractura principal presenta una mayor disgregación que las superficies correspondientes a la rotura a compresión simple. En efecto, la observación microestructural de la superficie de rotura revela la presencia de multitud de fracturas secundarias observables desde la fractura principal. Se observa, por una parte, que las microfisuras tienden a unirse formando fisuras mayores a lo largo de la superficie observada, superficie de fractura principal. Por otra parte, la mayor parte de fisuras observadas tienen su origen en los poros, también, observados aunque en ocasiones, parece ser que, las fisuras se propagan a través de éstos.

Por último, se ha procedido a analizar los distintos tipos de fractura que pueden observarse en una muestra ensayada a fatiga. La Fig. 233 recoge algunos detalles de interés en la fractura por fatiga de una probeta de hormigón completamente reciclado.



Fig. 233. Observación macroscópica de algunos detalles de interés en la fractura por fatiga de una probeta de hormigón reciclado.

En primer lugar, se ha detectado el fallo por fatiga de la unión adherente entre la pasta de cemento y un árido natural procedente del árido reciclado Fig. 233-(1). En segundo lugar, el punto Fig. 233- (2) recoge la observación macroscópica de la pérdida de unión entre un árido reciclado contaminado superficialmente con betún y la pasta de cemento circundante. Ya se comentó que la incorporación de áridos contaminados superficialmente podría tener una importante influencia sobre la unión de éstos con la matriz de cemento. No obstante, en el punto Fig. 233-(3) se observa un árido contaminado con betún a través del cual se ha propagado la fractura principal. En el caso del árido cerámico, debido a su fragilidad, se observa siempre fracturado como queda representado en Fig. 233-(4). Entre otros áridos naturales procedentes del hormigón de origen, se han encontrado árido de naturaleza silícea, caliza y arenisca como en el caso de Fig. 233-(5) que, al igual que el árido cerámico, transmite la fractura principal formando un plano con la pasta de cemento. El árido reciclado de mortero (6), como en los dos casos anteriores, suele transmitir la fractura por rotura del propio árido, sin fallo de la interfase. A diferencia de lo observado en Fig. 233-(1), cuando la unión a la pasta de cemento es lo suficientemente competente, la propagación de la fractura principal se produce, también, a través del árido redondeado Fig. 233-(7). En general, la unión con los áridos de naturaleza caliza es muy resistente y, como se observa en Fig. 233-(8), la fractura suele propagarse por rotura de los mismos.