

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis Doctoral

Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental de Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición

Elaine Pinto Varela Alberte

Directores: Enric Vázquez i Ramonich
 Marilda Barra Bizinotto

Barcelona, junio de 2012

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presentan y se analizan todos los resultados obtenidos durante la etapa experimental. En cada apartado se hace referencia a la normativa correspondiente indicándose únicamente los aspectos de la misma que han sido modificados o adecuados a las condiciones del estudio para que los resultados pudiesen tener más trascendencia para análisis.

Es importante resaltar que el estudio se centra en el análisis del conjunto de materiales presentes en el hormigón. Aunque la diferencia fundamental existente entre los hormigones es el contenido de árido reciclado grueso empleado, las relaciones agua-cemento son iguales en todos los casos.

Los hormigones objeto del estudio tienen las dosificaciones indicadas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Dosificaciones de los hormigones objeto del estudio

Elementos	Cantidad (kg/m ³)	Hormigones producidos						
		HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
Cemento	kg/m ³	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00
Agua	kg/m ³	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75
Árido fino natural	kg/m ³	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89
Árido grueso natural	kg/m ³	512,57	312,82	13,20	0,00	312,82	13,20	0,00
Árido medio natural	kg/m ³	489,95	489,95	489,95	0,00	489,95	489,95	0,00
Árido reciclado AH	kg/m ³	0,00	181,09	452,74	905,47	0,00	0,00	0,00
Árido reciclado AC	kg/m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	146,90	367,24	734,48
Aditivo 1ª amasada ¹	% cemento	1,44	0,70	0,89	0,80	1,50	1,74	0,72
Aditivo 2ª amasada ¹	% cemento	0,99	1,08	1,15	1,57	1,03	0,78	0,79
a/c	-	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65

¹ La cantidad inicialmente propuesta ha sido de 0,7 % de cemento. Los valores han variado en función de la necesidad de alcanzarse una buena trabajabilidad de material.

La mayor parte de los ensayos ha sido realizada con muestras triplicadas. Los resultados presentados corresponden a la media de los valores que han presentado una variación máxima de 10%.

5.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

5.2.1 DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN

El procedimiento adoptado para la realización del ensayo de densidad, porosidad y absorción sigue las especificaciones descritas en la norma UNE-EN 12390-7:2001. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.2.

Se debe resaltar que la porosidad obtenida no representa el contenido total de poros existentes. Este valor corresponde a la porosidad abierta y solo incluye los poros que están interconectados, y, por lo tanto, permiten el paso de un fluido. No se consideran los poros aislados.

Las muestras utilizadas en este ensayo han consistido de rodajas de 100 mm de diámetro y de 50 mm de altura, obtenidas por el corte de la parte central de probetas cilíndricas de 100 x 200 mm. La parte superior e inferior han sido descartadas para evitar problemas respecto a la falta de homogeneidad de los hormigones.

Tabla 5.2. Resultados de densidad y absorción de los hormigones producidos

Parámetro	Unidad	Hormigón						
		HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
Densidad sss	Kg/m ³	2338	2345	2347	2300	2311	2271	2168
Densidad seca	Kg/m ³	2213	2216	2224	2171	2189	2129	2021
Densidad aparente	Kg/m ³	2530	2544	2536	2494	2494	2483	2372
Absorción	%	5,64	5,80	5,52	5,96	5,58	6,67	7,30
Porosidad	%	12,51	12,88	12,29	12,97	12,24	14,23	14,77

Para los hormigones HRH, solo se observa una pequeña reducción de la densidad en los hormigones con 100% de sustitución de áridos reciclados (figura 5.1).

Para los hormigones HRC la reducción de densidad se presenta en todas las mezclas, y, en especial, para los hormigones hecho con 100% de árido AC. La reducción media observada fue de 7,27% para la densidad en superficie seca, 8,68% para la densidad seca y 6,25% para la densidad aparente, comparados con el hormigón de referencia HO.

Por lo general, la menor densidad de los hormigones reciclados es justificada por la menor densidad de los áridos reciclados utilizados en su producción. Según indica Alaejos Gutiérrez (2008), la

densidad del hormigón reciclado depende tanto del contenido de cemento como de la densidad y la granulometría de los áridos reciclados utilizados en su producción.

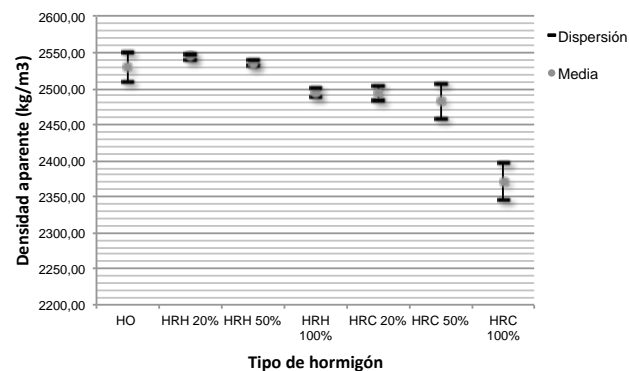


Figura 5.1. Valores medios y rango de dispersión de la densidad aparente de los hormigones producidos (kg/m³)

En cuanto a la absorción y porosidad, solo los hormigones reciclados HRC 50% y HRC 100% presentan un incremento significativo en comparación a los valores presentados por el hormigón de referencia. El aumento del coeficiente de absorción es de cerca de 18% para el HRC 50% y 29% para el HRC 100%. El aumento de la porosidad es de 14% para el HRC 50% y 18% para el HRC 100% (figura 5.2).

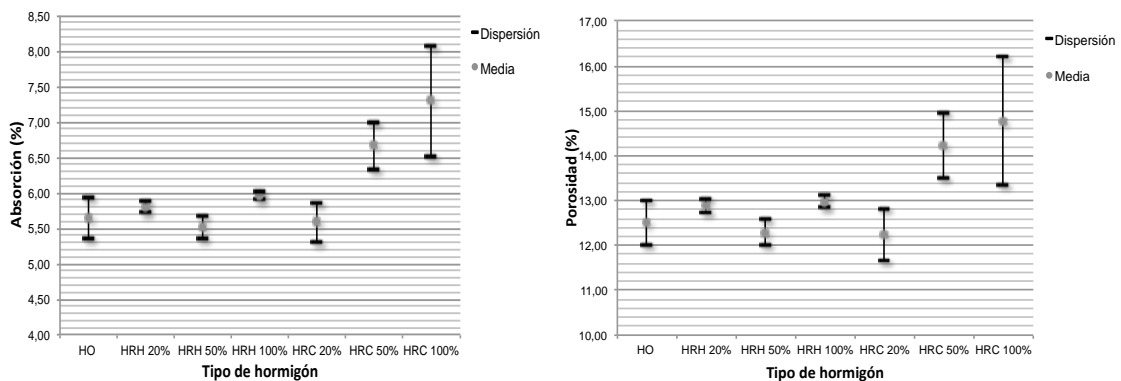


Figura 5.2. Valores medios y rango de dispersión de la absorción y la porosidad de los hormigones producidos (%)

En un primer momento, se podría afirmar que la mayor porosidad de los áridos AC ha influenciado en el incremento de los valores de absorción y porosidad. La caracterización de esos áridos indica que su absorción y porosidad son mayores que las del árido AH y del árido convencional (cerca de 5 veces más que el árido convencional y 2 veces más que el árido AH). En ese sentido, Alaejos Gutiérrez (2008) afirma que la absorción de un hormigón reciclado varía en función de la composición del árido reciclado empleado. El hormigón reciclado puede alcanzar los valores más altos cuando se utiliza áridos cerámicos, valores intermedios con áridos de hormigón y valores inferiores con el empleo de arena natural.

Sin embargo, se nota que el incremento de los valores de absorción y porosidad abierta no ha sido directamente proporcional al contenido de áridos reciclado AC. Se asume que la alta absorción y porosidad de los áridos AC no han determinado los resultados de los hormigones HRC, pero pueden haber influenciado su sistema de distribución de poros, y consecuentemente, la porosidad de la pasta.

5.2.2 RESISTENCIAS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

La resistencia a compresión de un hormigón tiene una importancia muy grande en su durabilidad, ya que permite deducir la capacidad que un elemento estructural tiene de resistir a algunas de las cargas que serán producidas durante su vida útil.

La determinación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad se ha efectuado en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm. Los procedimientos adoptados para la realización de estos ensayos siguen las especificaciones descritas en las normas UNE 83304:1984 y UNE 83316:1996.

La resistencia de referencia adoptada fue de 25 N/mm². El ensayo ha sido realizado a los 28 días de edad de la probeta.

Se considera que la relación agua / cemento ha sido constante en todos los casos ya que se ha adicionado la cantidad de agua de absorción calculada para los áridos gruesos antes de la amasada. Se ha utilizado la misma cantidad en litros de material seco. La consistencia y trabajabilidad de los hormigones ha sido garantizada por la incorporación de aditivo.

Los resultados se presentan en la figura 5.3.

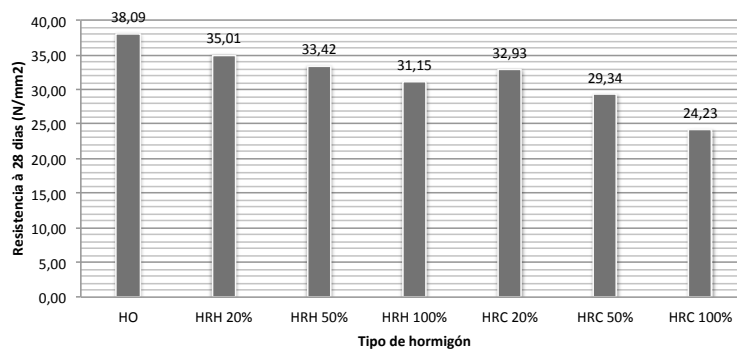


Figura 5.3. Resultados de la resistencia a compresión de los hormigones producidos

La tabla 5.3 presenta el porcentaje de reducción del valor de resistencia a compresión en un análisis comparativo entre todos los hormigones producidos.

Los hormigones reciclados HRH presentan una resistencia entre 8,08 a 18,23% inferior a la resistencia del hormigón de referencia HO. Las mermas de resistencia aumentan a medida que el contenido de árido reciclado aumenta.

Se nota el mismo comportamiento en los hormigones reciclados HRC. La disminución de la resistencia presentada por esos hormigones, sin embargo, es cerca de dos veces más alta que la presentada por los hormigones hechos con áridos reciclado AH (varían entre 13,54 a 36,40% en relación a la resistencia del hormigón de referencia HO).

Tabla 5.3. Porcentaje de reducción de la resistencia a compresión – comparación entre los diversos hormigones producidos

Hormigón de referencia comparativa	Hormigón a ser comparado						
	HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
HO	0,00	8,08	12,26	18,23	13,54	22,99	36,40

En prácticamente todos los casos, la resistencia a compresión ha sido igual o superior a la resistencia característica planteada de 25 N/mm². Se considera que las únicas variables existentes en este análisis comparativo son: el porcentaje de árido reciclado y el tipo de árido reciclado. Por lo que se puede considerar que:

- Los hormigones HRC presentan menos resistencia que los hormigones HRH;
- La resistencia del hormigón se reduce a medida que se aumenta la cantidad de árido reciclado. Este comportamiento parece indicar una relación inversamente proporcional entre el contenido de áridos y la resistencia de los hormigones. El descenso de los valores de resistencia a compresión para los hormigones reciclados puede deberse en parte a la influencia de la porosidad de los áridos reciclados;
- Parece que la introducción del árido reciclado AC promueve una mayor reducción de la resistencia en comparación a la introducción del árido reciclado AH.

Respecto al módulo de elasticidad, se nota que los resultados son coherentes con los valores de resistencia a compresión determinados (figura 5.4).

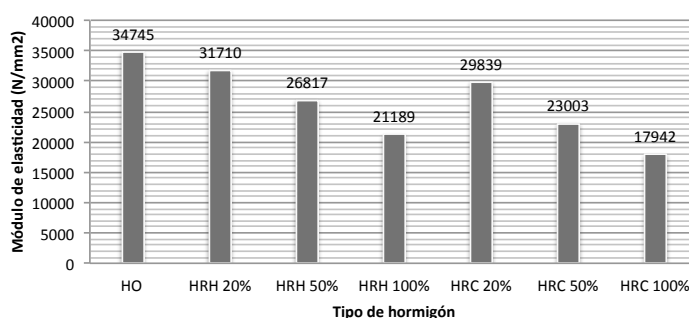


Figura 5.4. Resultados de modulo de elasticidad de los hormigones producidos

Se identifica la misma tendencia de reducción de valor del modulo a medida que se aumenta el uso de árido reciclado. Además, los hormigones reciclados HRC presentan valores de módulo de

elasticidad inferiores al hormigón reciclado HRH, que, a su vez, presenta valores inferiores al hormigón de referencia HO.

5.2.3 RETRACCIÓN POR SECADO

La retracción del hormigón es la mejor propiedad para evaluar su comportamiento reológico. La tensión superficial del agua que se seca en el interior del hormigón puede provocar fisuras y influenciar su comportamiento estructural a lo largo del tiempo.

La retracción ocurre principalmente en interiores con humedad relativa inferiores al 40%. En estas condiciones, los poros llenos con agua entre 2,5 y 50 nm pierden humedad, se forman meniscos curvos y la tensión superficial del agua tracciona la pared de los poros, provocando las fisuras. En poros mayores que 50 nm, la magnitud de la fuerza de tensión se hace despreciable, mientras que los poros menores que 2,5 nm no forman meniscos.

La retracción del hormigón se debe a las siguientes causas:

- intercambios de agua con el exterior por evaporación (retracción por secado);
- pérdida del agua libre en el interior del hormigón debido a la hidratación del cemento que se verifica en la ausencia de cambios de humedad con el exterior (retracción autógena);
- combinación del dióxido de carbono de la atmósfera con los componentes hidratados del cemento (retracción por carbonatación).

Se han adoptado dos procedimientos para analizar el comportamiento de retracción por secado de los hormigones producidos en este trabajo. Los resultados de los dos métodos se presentan a continuación.

5.2.3.1 Retracción por secado – Método UNE 83318:1994

La retracción, de acuerdo con la norma UNE 83318:1994, se calcula por la diferencia entre el valor del largo de una probeta inmediatamente después de su desmolde y su largo al secarse bajo condiciones especificadas.

Para el ensayo se ha utilizado dos probetas prismáticas de 75 mm de arista y 254 mm de altura. Se han incorporado puntas metálicas en sus bases para que pudieran ser utilizadas como puntos de medición de sus variaciones de longitud en el tiempo.

Inicialmente, las probetas desmoldadas han sido sumergidas en agua durante 30 minutos, para asegurar que la primera lectura ocurre en la condición de saturación del ejemplar. A continuación, las probetas han sido mantenidas sumergidas en agua hasta la edad de 28 días (figura 5.5).



Figura 5.5. Registros fotográficos del ensayo de retracción por secado – Método UNE 83318:1994

A los 28 días, se ha realizado una segunda medida, que ha permitido analizar la retracción de las probetas durante el periodo de curado (figura 5.6).

Según se percibe en la figura 5.6, la retracción de los hormigones HRH 20% y HRC 20% fue inferior a la presentada por el hormigón HO. Las mezclas con 100% de árido reciclado han presentado los mayores valores de retracción.

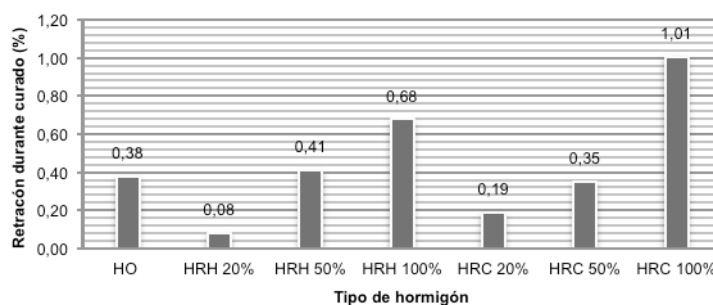


Figura 5.6. Retracción durante periodo de curado por hormigón estudiado – Método UNE 83318:1994

A partir de esta etapa, se han mantenido las probetas en aire. Las probetas han sido mantenidas en condiciones de temperatura y humedad del laboratorio. Durante ese periodo de tiempo, los valores de humedad variaron entre 11,5 y 79 %RH y los valores de temperatura entre 12,7 y 27,6°C. Durante el ensayo también se ha determinado la masa de las probetas para registrar su pérdida de peso.

Los gráficos presentados en las figuras 5.7 y 5.8, muestran la retracción por secado de las probetas sometidas al ensayo, mientras las figuras 5.9 y 5.10, muestran su pérdida de peso.

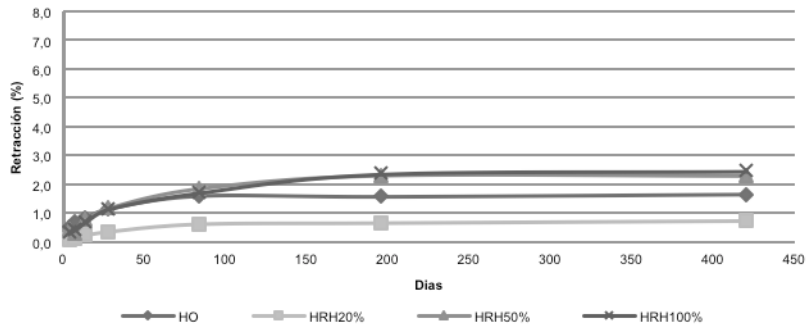


Figura 5.7. Retracción por secado de los hormigones HO y HRH (UNE 83318:1994)

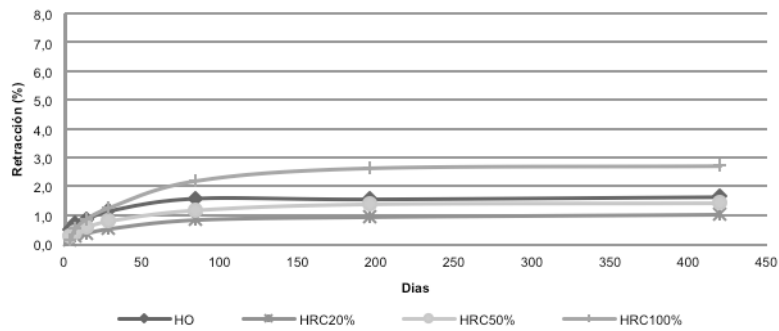


Figura 5.8. Retracción por secado de los hormigones HO y HRC (UNE 83318:1994)

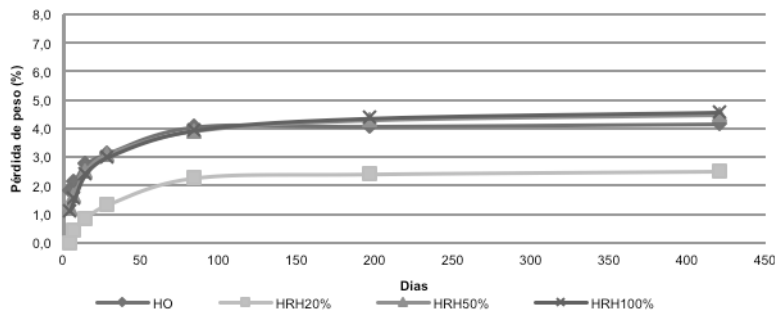


Figura 5.9. Pérdida de peso de los hormigones HO y HRH (UNE 83318:1994)

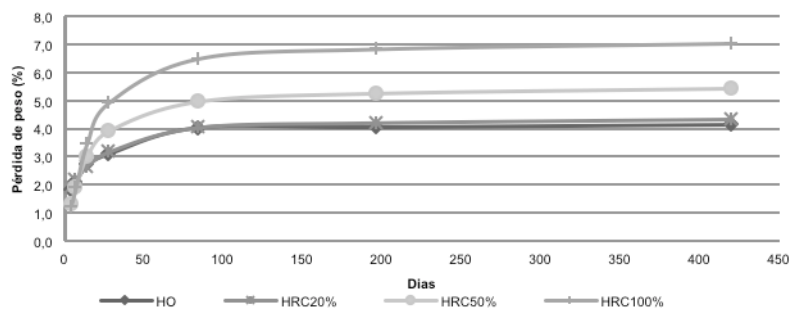


Figura 5.10. Pérdida de peso de los hormigones HO y HRC (UNE 83318:1994)

Analizando los resultados de esas figuras, es posible verificar que:

- A edades tempranas, todas las mezclas con contenido de árido reciclado, sea árido AH o AC, han presentado valores de retracción por secado inferiores al presentado por el hormigón de referencia HO. Esta diferencia disminuye con el tiempo de exposición;
- Dentro de los primeros 84 días se produjeron las deformaciones más importantes para todas las mezclas. Mientras que para los hormigones HO, HRH 20% y HRC 20% es notoria la tendencia a estabilizarse a partir de esta medida, los demás hormigones tienden a estabilizarse a edades próximas a los 196 días;
- Los hormigones reciclados HRH 20%, HRC 20% y HRC 50% han presentado una retracción por secado inferior a lo hormigón de referencia HO a lo largo de todo el ensayo, mientras los hormigones reciclados HRH 50%, HRH 100% y HRC 100% han presentado una retracción por secado igual o superior a partir de la medida realizada en el 28° día de ensayo.
- Los hormigones HRC tienen una tendencia a presentar mayor pérdida de peso que los demás tipos de hormigón.

De modo general, el aumento del contenido de árido reciclado hasta 50% no aumenta la retracción por secado. Sin embargo, en comparación al hormigón convencional, el hormigón con 100% de árido reciclado si que presenta mayor retracción por secado.

5.2.3.2 Retracción por secado – Método del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción

Con el objetivo de confirmar / comparar los resultados obtenidos en el ensayo anterior, se ha realizado otro ensayo de retracción por secado utilizando el método interno del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción. Este método se basa en las normas ASTM C426 - 10 “Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units” y BS 1881-206:198 “Testing concrete. Recommendations for determination of strain in concrete”.

Para el ensayo se ha utilizado tres probetas prismáticas de 75 mm de arista en la base y 254 mm de altura. Inicialmente, las probetas desmoldadas han sido mantenidas en cámara húmeda hasta la edad de 28 días. A los 28 días, se han incorporado seis puntos metálicos con resina epoxi en tres de las seis caras de cada probeta (2 puntos por cara) para que pudieran ser utilizadas como puntos de medición de sus variaciones de longitud al largo del tiempo. En este mismo día se ha realizado la primera medida de referencia con un extensómetro.

A continuación, las probetas han sido colocadas en una cámara de secado, donde han sido mantenidas hasta el final del ensayo. Las condiciones climáticas de la cámara de secado han sido mantenidas en 50 ± 4 % de humedad relativa y $23 \pm 1,1$ °C de temperatura. Las medidas realizadas durante el periodo han sido de 1, 3, 7, 14, 28, 56, 120, 180, 360 y 778 días (figura 5.11).



Figura 5.11. Registros fotográficos del ensayo de retracción por secado – Método Interno del Laboratorio

La retracción de cada probeta, de acuerdo con este método, se calcula por la media de las tres medidas realizadas por cada cara de la probeta. La medida de cada cara de la probeta es obtenida por la diferencia entre el valor de la longitud de la cara en la medida de referencia y el valor de la longitud de la cara al secarse bajo condiciones especificadas para cada día, dividido por 150 mm (distancia entre los dos puntos fijos).

Analizando los resultados obtenidos (figuras 5.12 y 5.13), se observa que:

- Efectivamente, en los primeros días de ensayo, los valores de retracción por secado de las mezclas con árido reciclado son similares o inferiores a los valores presentados por el hormigón sin árido reciclado;
- A partir del 14° día de ensayo ya se puede observar que las mezclas de hormigón reciclado presentan un crecimiento gradual de la retracción por secado, siendo superior a la del hormigón convencional. A partir de esta medida, todos los valores encontrados en las mezclas con árido reciclado son superiores a las presentadas por el hormigón de referencia, en especial en las mezclas HRH 100%, HRC 50% y HRC 100%;
- De modo general, los hormigones HRH 20%, HRH 50% y HRC 20% presentan una retracción por secado similar o poco superior al hormigón HO. Las curvas de retracción determinadas para estas tres muestras de hormigón reciclados se presentan prácticamente sobrepuestas a la curva de retracción determinada por el hormigón de referencia;
- Las deformaciones más importantes han ocurrido dentro de los primeros 56 días para todas las mezclas. La tendencia a estabilizar el proceso de retracción es observada a edades próximas a los 120 días.

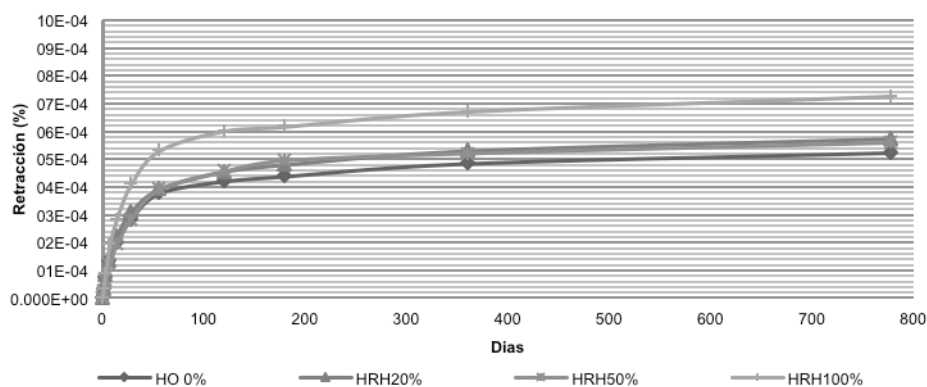


Figura 5.12. Retracción por secado de los hormigones HO y HRH (Método Interno de Laboratorio)

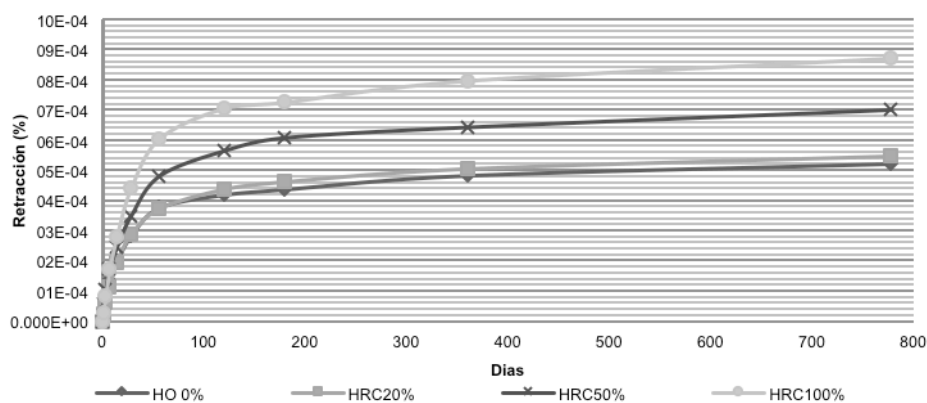


Figura 5.13. Retracción por secado de los hormigones HO y HRC (Método Interno de Laboratorio)

El comportamiento presentado por los hormigones reciclados en este ensayo confirma los análisis realizados con base en los resultados obtenidos por el Método UNE 83318:1994.

Se comprueba que el uso de hasta 20% de árido reciclado, tanto para el árido reciclado AH como para el árido reciclado AC, no influye en las propiedades de retracción por secado del material.

5.2.4 POROSIMETRÍA DE INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP)

El análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones presentadas anteriormente indican la importancia de la influencia de la porosidad de los áridos en las características del hormigón.

El estudio de la estructura de poros en estos hormigones es fundamental para comprender el papel que esta característica tiene en su comportamiento físico y mecánico. Este estudio posibilita determinar el tipo, cantidad y distribución de los poros existentes en un hormigón, factores que

influyen directamente el paso de sustancias líquidas o gaseosas que suelen penetrar en un hormigón.

Según la bibliografía (Schiessl, 1987; GEHO-CEB, 1993; Neville, 1997; Monteiro, 2006), los poros pueden ser clasificados de acuerdo con su origen y características en: poros de compactación, debidos al aire incorporado en el mezclado, poros capilares, causados por el espacio no llenado por los productos de hidratación, y poros de gel, debidos a la hidratación del cemento. De acuerdo con el tamaño, pueden ser clasificados en micro poros, poros capilares y macro poros.

De acuerdo con Garboczi (1995), el tamaño y conexión de los poros son fundamentales para el análisis de los mecanismos de transporte de sustancias dentro de un hormigón. En ese contexto, los poros capilares y los macro poros son los mas representativos y tienen mayor influencia en el transporte de sustancias hacia el interior de una estructura (Schiessl, 1987).

Por otro lado, la conexión de los poros es determinante para el avance de las sustancias hacia el interior de un hormigón, ya que solo los poros que están interconectados permiten que el transporte ocurra. Según la conexión, los poros pueden ser clasificados en interconectados, aislados o ciegos, como indica la figura 5.14.

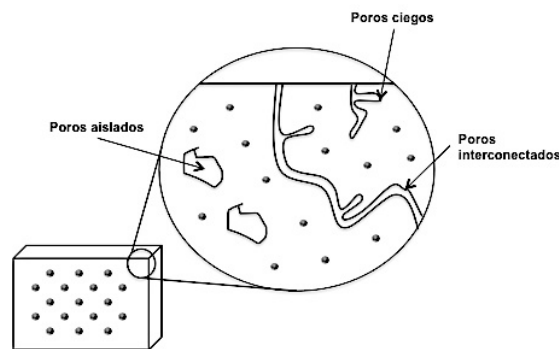


Figura 5.14. Tipos de poros según conexión (adaptado de Buil e Ollivier, 1992)

Para el estudio de la estructura de poros de los hormigones analizados en este trabajo, se ha realizado el ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP). Este estudio fue realizado con el apoyo del Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC). La referida institución ha sido responsable por la ejecución del ensayo en sus instalaciones. El ensayo se ha llevado a cabo con un AutoPore IV 9500 de Micromeritics según un procedimiento interno de INTROMAC basado en la norma ASTM D4404:1984.

Para la realización del ensayo, se ha utilizado una muestra de cada tipo de hormigón producido. Para la preparación de las muestras a utilizar en el ensayo, los trozos de hormigón fueron triturados para obtener un material con un tamaño idóneo que permitiera ser introducido en la celda de un penetrómetro de 5 cm³ de volumen. A continuación, cada una de las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C durante 24 horas, con objeto de eliminar la humedad preexistente.

Una vez preparada la muestra seca en el interior del penetrómetro, se ha realizado los siguientes procedimientos:

- Se ha realizado la desgasificación en vacío del penetrómetro hasta una presión límite de 50 mmHg con el objetivo de eliminar posibles impurezas existentes en los poros.
- Se ha llenado el penetrómetro con mercurio a 0,5 psia, valor equivalente a una presión de 0,00034 Mpa. Este procedimiento tiene el objetivo de impedir la intrusión previa del mercurio que rodea la muestra. Permite determinar de modo mas preciso el volumen aparente del fragmento de hormigón estudiado, y, consecuentemente, la densidad aparente y la porosidad de la muestra. Se ha utilizado mercurio tridestilado suministrado por Scharlab con una tensión superficial de 0,485 N m-1.

Como la temperatura ambiente influye a la hora de determinar las densidades aparente y real de la muestra, este parámetro ha sido considerado para la corrección de la densidad de mercurio. La temperatura ambiente durante la realización del ensayo se ha mantenido alrededor de $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para el análisis de los datos, se han considerado los siguientes aspectos:

- El ángulo de contacto entre el mercurio y el hormigón utilizado para la determinación del diámetro de poro por medio de la ecuación de Washburn fue de 117° . Este valor ha sido escogido por ser utilizado en la bibliografía para muestras de cemento, mortero y hormigones secados en estufa (Cook y Hover, 1993; Kumar y Bhattacharjee, 2003);
- El tiempo de equilibrio considerado fue de 20 s;
- El rango máximo de intrusión fue establecido en un valor de presión de hasta 33000 psia (219 MPa).

En la figura 5.15 se presentan los datos de porosidad total determinados en el ensayo para todos los tipos de hormigón estudiados.

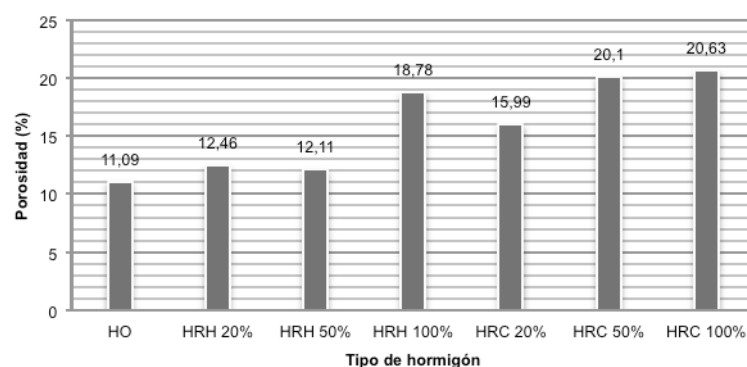


Figura 5.15. Porosidades totales por intrusión de mercurio (origen: INTROMAC)

Para las muestras de hormigón HRC, los valores obtenidos varían entre un 16-20%. El valor más pequeño es el de la muestra HRC 20%, con casi un 16%, el cual supera al hormigón de referencia en casi un 5%. Se observa que la tendencia de incremento de la porosidad en función del aumento del contenido de árido reciclado no es significativa entre los hormigones HRC 50% y HRC 100%. Ambos hormigones presentan valores similares alrededor del 20%.

Los elevados valores de porosidad observados para los hormigones HRC pueden estar influenciados por la proporción de elementos cerámicos existentes en el árido reciclado AC, que, pueden contribuir al aumento de la porosidad total del hormigón producido con este material.

En el caso de los hormigones HRH, los valores obtenidos varían entre un 12-19%. La tendencia de incremento de la porosidad en función del aumento del contenido de árido reciclado en el hormigón presenta un efecto más atenuado:

- Los hormigones reciclados HRH 20% y HRH 50% presentan un valor medio próximo al valor presentado por el hormigón HO;
- El incremento es evidenciado esencialmente solo en la muestra de hormigón hecha con 100% de árido reciclado AH. El valor de porosidad identificado para el hormigón HRH 100% llega casi a un 19%, indicando que existe un incremento importante de la porosidad del hormigón al pasar de un porcentaje en árido reciclado del 50% al 100%.

Las variaciones entre los hormigones estudiados son más evidentes al analizarse los gráficos presentados a continuación. A través del ensayo, ha sido posible analizar gráficamente los siguientes resultados:

- el volumen de mercurio intruido en los poros de estos materiales. A partir de los gráficos de las curvas de intrusión se pueden evaluar tanto los cambios en la porosidad total de las muestras como los cambios en la estructura porosa relacionado al diámetro de poros existentes en los hormigones. Con eso, ha sido posible obtener información acerca del comportamiento de la porosidad en función de la cantidad de árido reciclado puesta;
- las distribuciones del tamaño de los poros existentes en estos materiales. A partir de los gráficos de distribución de porosidad de las muestras obtenidas, ha sido posible dilucidar que tamaños de poro son los más representativos en una muestra y de este modo poder caracterizar con más detalle su estructura porosa. A través de las curvas de distribuciones de los poros, es posible valorar los tipos de poros que conforman fundamentalmente el hormigón e identificar los intervalos de tamaño de poros en los que se concentran mayoritariamente.

En la figura 5.16 se presentan las curvas de las porosimetrías obtenidas para los hormigones de referencia y los producidos con árido reciclado AC. A través de estas curvas, es posible identificar la influencia del porcentaje de árido AC incluido en la porosidad.

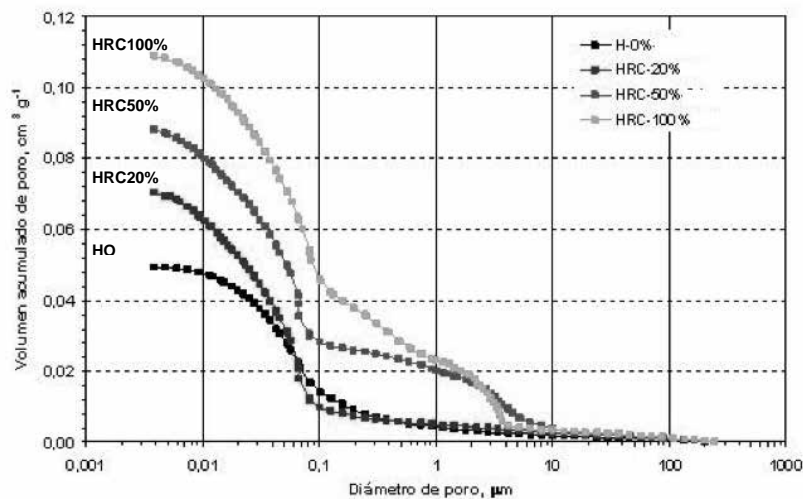


Figura 5.16. Curvas de intrusión de mercurio de hormigones HO y HRC (origen: INTROMAC)

El análisis comparativo entre la microestructura porosa del hormigón de referencia y la de los hechos con árido reciclado AC indica que:

- De un modo general, la cantidad de mercurio intruido en los poros se incrementa a medida que el hormigón presenta mayores proporciones de árido reciclado AC.
- Tanto las muestras HO como las muestras HRC 20% presentan curvas prácticamente superpuestas a partir del análisis de los poros con tamaños mayores a 0,1 μm , indicando una estructura porosa semejante para estos dos tipos de hormigón. Esto sugiere que el uso de una proporción de hasta 20% de árido reciclado AC incrementa la porosidad total del hormigón, pero no modifica significativamente la forma en la que sus poros están distribuidos. Se destaca que ambas curvas indican que se trata de hormigones con poco desarrollo de macro poros, ya que hubo una baja intrusión de mercurio en el rango comprendido entre 0,1-200 μm .
- Para los hormigones reciclados HRC 50% y HRC 100%, se evidencia un incremento progresivo en el volumen de intrusión de mercurio en los poros con diámetros comprendidos entre 0,1-10 μm . En estos casos, se observa el cambio en la estructura porosa del hormigón a partir del aumento del contenido de árido reciclado AC, con una tendencia a aumentar el volumen de macro poros accesibles al mercurio.

Tal y como se ha indicado anteriormente, la tendencia al incremento en el volumen de intrusión de mercurio en los hormigones HRC pudiera deberse a la contribución del material AC, adicional a la porosidad inherente procedente del mortero más el árido inicial que conforman el hormigón. Se debe resaltar, sin embargo, que, por lo general, la contribución que un árido puede aportar a la porosidad de un hormigón no es excesiva (Laskar y col., 1997).

En todas las curvas entre 0,01-0,1 μm se evidencia un abrupto incremento en la cantidad de mercurio intruido. Este comportamiento se debe al contenido de meso poros existentes en la pasta,

formados a partir de la hidratación del cemento. Según Moro y Böhni (2002), esta meso porosidad está asociada a los denominados poros capilares. Formados a partir de la hidratación de los productos que llenan el espacio interparticular, estos meso poros acaban produciendo una reducción de volumen con el incremento de la hidratación.

En la figura 5.17 se presentan las distribuciones de porosidad obtenidas para los hormigones de referencia y realizados con árido reciclado AC.

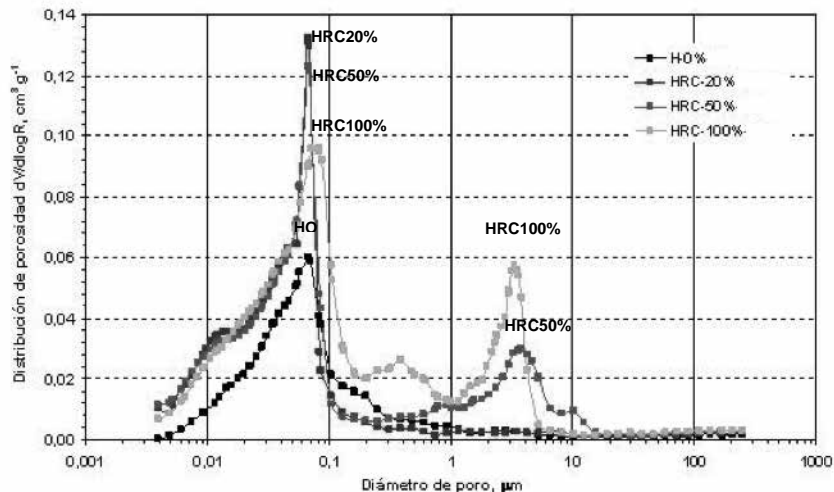


Figura 5.17. Distribuciones de porosidad de hormigones HO y HRC (origen: INTROMAC)

La distribución de poros de esos hormigones es un dato muy importante para el estudio de la durabilidad e impacto ambiental de los hormigones ya que el transporte de agua a través del hormigón es determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de sus poros y fisuras (ACHE, 2006).

En todas las muestras incluidas en la figura 5.17, puede observarse la existencia de una cantidad máxima de poros con diámetros alrededor de $0,07 \mu\text{m}$. Este pico, por general, se debe a la porosidad característica presente en el hormigón de proyecto, ya que todos los tipos de hormigón han presentado un comportamiento similar.

Es importante resaltar que este pico máximo es más evidente en las muestras de HRC con un contenido en árido reciclado del 20% y 50%.

Para los hormigones HRC 50% y HRC 100% también se observa el crecimiento gradual de un nuevo pico alrededor de $3-4 \mu\text{m}$, lo que indica la presencia de macro poros adicionales en el hormigón, a medida que se aumenta la presencia de áridos reciclados en su composición. La ausencia total de este comportamiento en los hormigones HO y HRC 20% confirma la influencia que el contenido de árido reciclado ejerce sobre la porosidad de un hormigón, concretamente en los niveles de macro porosidad.

En la figura 5.18 se presentan las curvas de las porosimetrías obtenidas para los hormigones de referencia y los producidos con árido reciclado AH.

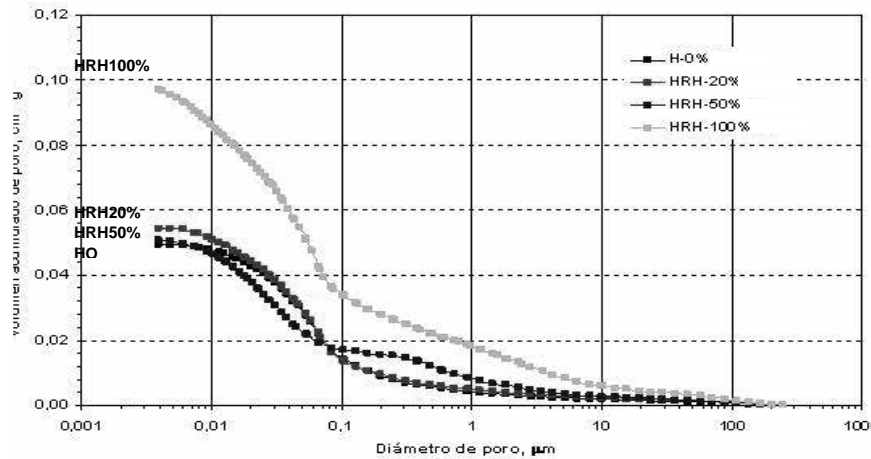


Figura 5.18. Curvas de intrusión de mercurio de hormigones HO y HRH (origen: INTROMAC)

En las curvas de intrusión de los hormigones HRH, a diferencia del comportamiento evidenciado por los HRC, se observa, inicialmente, una gran homogeneidad de los resultados con el hormigón de referencia. Las curvas presentadas por el hormigón de referencia HO y los hormigones HRH 20% y HRH 50% son bastante similares. Se observa que las curvas de los hormigones HO y HRH 20% están prácticamente superpuestas. A simple vista parece que la adicción de hasta 50% del árido reciclado AH no genera una influencia importante en el grado de porosidad.

Se observa, sin embargo, que el grado de porosidad puede aumentar significativamente si la sustitución de árido convencional por árido reciclado es total. De cualquier modo, es importante hacer hincapié que el aumento de la porosidad presentado por el HRH 100% es inferior al presentado por el HRC 100%.

En la figura 5.19 se presentan las distribuciones de porosidad obtenidas para los hormigones de referencia y realizados con árido reciclado AH.

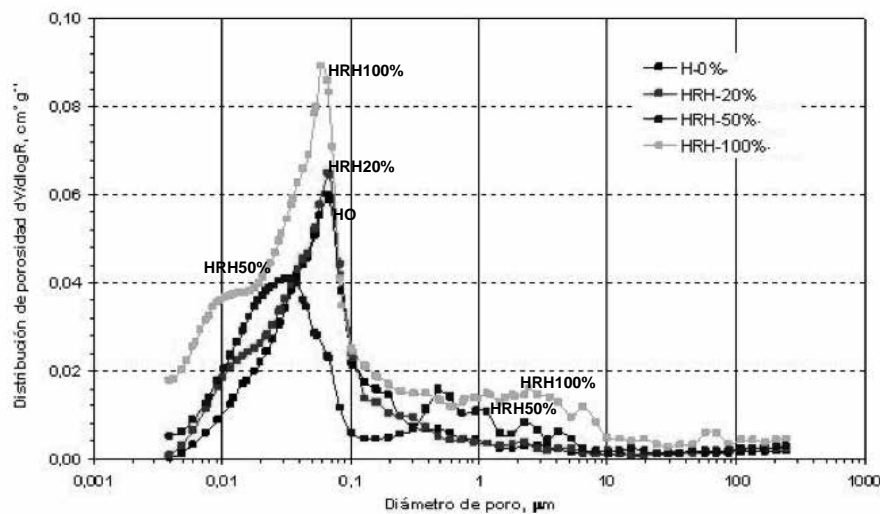


Figura 5.19. Distribuciones de porosidad de hormigones HO y HRH (origen: INTROMAC)

El análisis comparativo de la distribución de poros de los hormigones de referencia y hechos con árido reciclado AH indica que:

- Todos los hormigones presentan un carácter unimodal. Igual a los hormigones HRC, el pico común se presenta entre los diámetros de poro de 0,01 y 0,1 μm . Asociándose nuevamente este comportamiento a la existencia de los poros de tipo capilar característicos al hormigón de proyecto.
- Por otro lado, y a diferencia de los HRC, los hormigones HRH prácticamente no presentan picos a tamaño de poros por encima de los 0,1 μm . Este comportamiento confirma que la presencia del árido reciclado AH no produce una contribución adicional a la macro porosidad del hormigón, como ha ocurrido con los hormigones hechos con árido reciclados AC.

5.2.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Al hacer el análisis conjunto de los resultados obtenidos, se confirma la correlación existente entre las propiedades de **absorción, densidad y porosidad** en hormigones reciclados.

Se observa que la mayor capacidad de absorción es presentada por el hormigón HRC 100%, seguido del hormigón HRC 50%. Por consecuencia, son estos los hormigones que presentan mayor porosidad y menor densidad. Por otra parte, tanto los hormigones HRH como el hormigón HRC 20% han presentado valores de absorción y porosidad similares al presentado por el hormigón HO, aunque las densidades de los hormigones HRH 100% y HRC 20% se han presentado menores que la del hormigón HO (figuras 5.20 a 5.22).

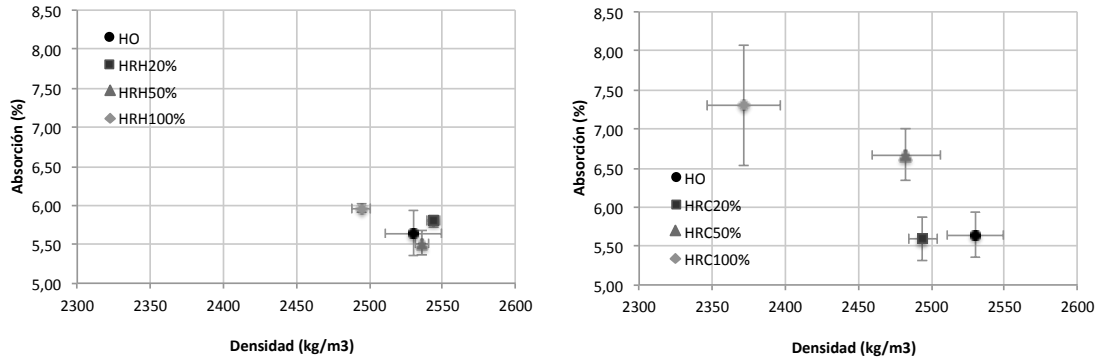


Figura 5.20. Correlación entre las propiedades de densidad y absorción de los hormigones

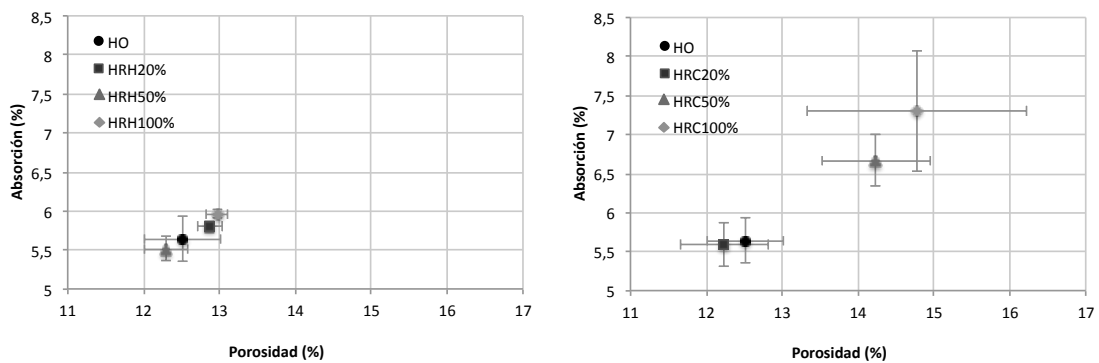


Figura 5.21. Correlación entre las propiedades de porosidad y absorción de los hormigones

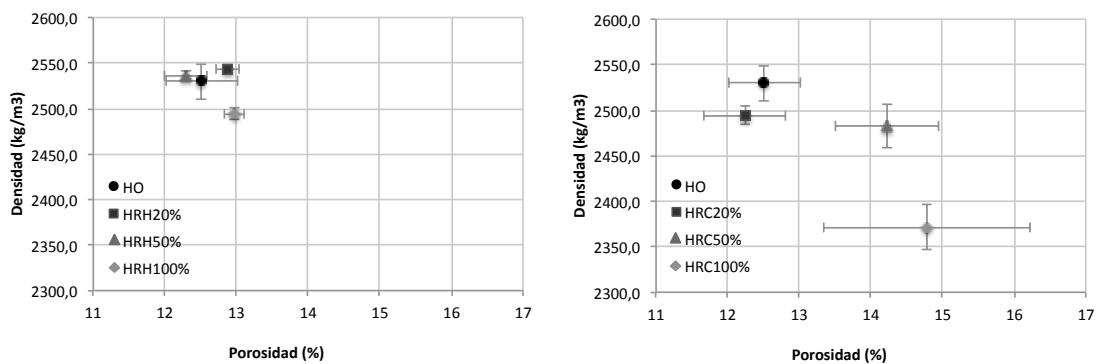


Figura 5.22. Correlación entre las propiedades de porosidad y densidad de los hormigones

Al comparar los resultados de porosidad obtenidos entre el ensayo UNE EN 12390-7:2001 y el ensayo de **porosimetría por intrusión de mercurio** (figura 5.23), se observa que los HRC presentan diferencias desde para las muestras con solo 20% de sustitución de árido grueso convencional, hasta las muestras con sustitución total. Para los hormigones HRH, el efecto solo es visible en las muestras con sustituciones del 100% del árido original por árido reciclado. El

hormigón HO, por su parte, presenta un valor de porosidad por intrusión de mercurio menor que el valor de porosidad total obtenidos a través del ensayo UNE EN 12390-7.

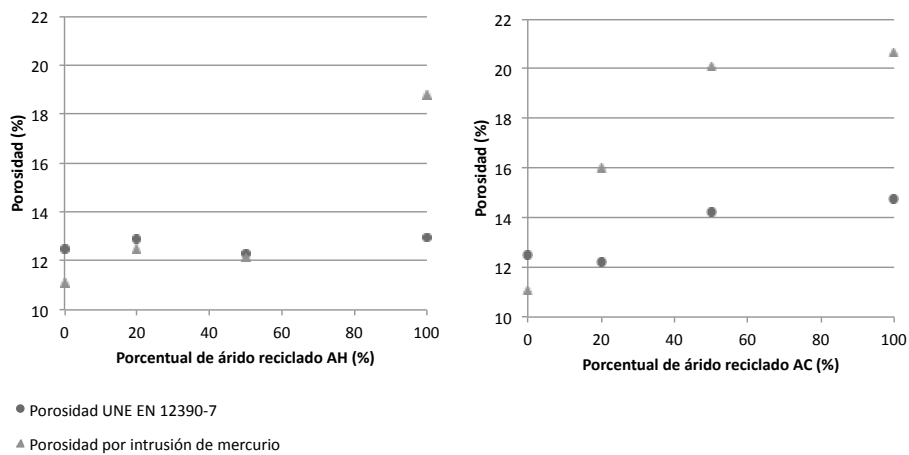


Figura 5.23. Comparación entre los valores de porosidad total de los hormigones obtenidos a partir los dos métodos realizados en el estudio

A la vista de los resultados obtenidos, se puede indicar que parte de la contribución total a la porosidad de un hormigón reciclado es influenciada por el contenido poroso inherente a los áridos reciclados, en especial a los de carácter mixto.

Según Gayarre (2008), la propiedad de densidad de los hormigones reciclados es determinada por el porcentaje de uso del árido reciclado en su fabricación, mientras que su absorción es determinada tanto por el porcentaje de sustitución como por la calidad del árido reciclado.

Respecto a los resultados de las propiedades mecánicas, es un hecho ya comprobado en la bibliografía la correlación inversa existente entre la porosidad y la resistencia a compresión de un hormigón. La resistencia de un hormigón se basa en su parte sólida (Metha y Monteiro, 1994), y cuanto más poros tenga un hormigón, menos resistente será esta estructura.

De los datos de **resistencia a compresión** obtenidos, lo primero a observar es que los hormigones reciclados presentan una pérdida de resistencia en relación al hormigón de referencia a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado, en especial en el uso de áridos más porosos como el árido reciclado AC.

Al analizarse los valores de resistencia a compresión y los de absorción y porosidad, sin embargo, se observa que los resultados encontrados para las mezclas HRC muestran una correlación, mientras que lo mismo no es observado para los hormigones HRH (figuras 5.24 y 5.25).

Aunque la presencia de áridos más porosos pueda incrementar la porosidad total de un hormigón, es importante considerar que la resistencia de un hormigón también es determinada por las resistencias de la matriz de cemento y de la zona de transición.

La relación agua/cemento y la porosidad son los factores más importantes a ser considerados en el análisis de la resistencia a compresión (Metha y Monteiro, 1994).

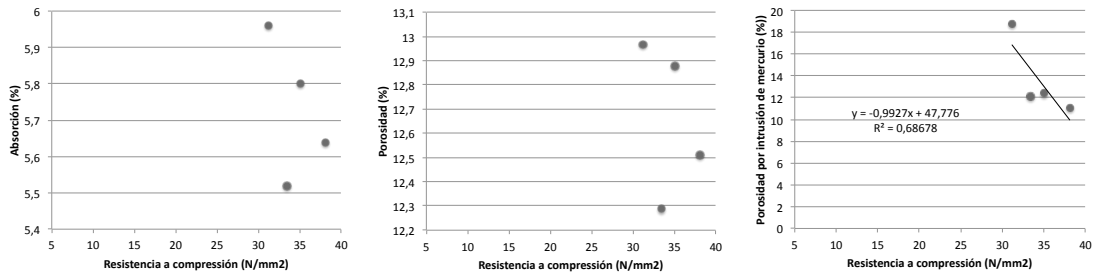


Figura 5.24. Correlación entre las propiedades de resistencia a compresión y absorción y porosidad de los hormigones HO y HRH

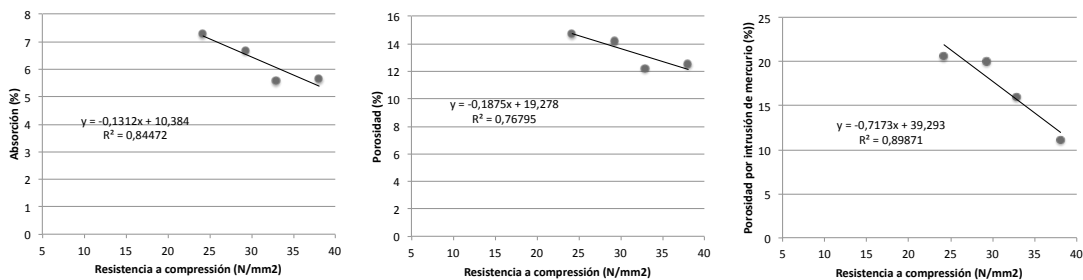


Figura 5.25. Correlación entre las propiedades de resistencia a compresión y absorción y porosidad de los hormigones HO y HRC

Respecto a la matriz de cemento, no es la porosidad total que afecta directamente las propiedades mecánicas de un mortero, sino su distribución de poros. Según Metha y Monteiro (1994), la distribución de los poros es la propiedad que controla efectivamente la resistencia y la permeabilidad, además de las variaciones de volumen en la pasta de cemento endurecida.

Al analizar la distribución de la porosidad de los hormigones objeto de este estudio, en general, se destaca la existencia de un pico común a todas las muestras, incluida la del hormigón de referencia HO, entre 0,06 y 0,07 μm . Este comportamiento es asignado a los macro poros y meso poros estrechos o a los poros capilares presentes en el hormigón, y que se generan a partir de las reacciones de hidratación.

La coherencia entre la estructura porosa de los hormigones HRC y los resultados de resistencia obtenidos está relacionada a las características particulares de las curvas de distribución de poros obtenidas para cada mezcla:

- La distribución de poros de los hormigones HO y HRC 20% es bastante similar. La principal diferencia se presenta en la cantidad de macro poros existentes entre 0,06 y 0,07 μm , que en el caso del hormigón HRC 20% es mayor que la cantidad presentada por el hormigón HO. La resistencia a compresión del hormigón HRC 20%, en consecuencia, es 13,5% menor que la presentada por el hormigón HO.
- Los hormigones HRC 50% y HRC 100% presentan picos entre 0,06 y 0,07 μm menores que los presentados por los hormigones HO y HRH 20%. En cambio, esos hormigones presentan

picos de existencia de poros de diámetros alrededor de 3 y 4 μm , no presentes en los hormigones HO y HRC 20%. Esto confirma la existencia de una macro porosidad creciente a medida que se aumenta la cantidad de árido AC incluido. Por eso, son estos los hormigones que han presentado las resistencias más bajas entre todas las mezclas.

Ya para los hormigones HRH, se observa que:

- Aunque las curvas de distribución de poros de las mezclas HO y HRH 20% están prácticamente sobrepuestas, la resistencia a compresión del hormigón HRH 20% es 7,8% menor que la presentada por el hormigón HO;
- Aunque el hormigón HRH 50% haya presentado una porosidad total bastante similar a la presentada por el hormigón HRH 20% (12,11 y 12,46%, respectivamente), se observa una reducción de la resistencia por parte de la primera mezcla de cerca de 9% en comparación con la segunda. Efectivamente, como en todas las mezclas, el hormigón HRH 50% ha presentado un valor importante de macro poros entre 0,06 y 0,07 μm . Sin embargo, este pico ha sido inferior al presentado por el HO y el HRH 20%. En contrapartida, esta mezcla ha presentado una cantidad de macro poros entre 0,4 y 4 μm mayor que lo observado en los hormigones HO y el HRH 20%. Este comportamiento, en particular, no significa un cambio importante en la distribución de poros de la estructura, pero justifica parcialmente los valores de porosidad y resistencia encontrados para esta mezcla;
- El hormigón HRH 100% ha presentado un valor de porosidad total bastante elevado (18,78%). El pico existente entre 0,06 y 0,07 μm es el más alto encontrado entre los hormigones HRH, similar al presentado por el hormigón HRC 100%. Adicionalmente, aunque la curva de distribución de poros no haya presentado ninguno otro pico, como ocurrido en los hormigones HRC 100%, la cantidad de poros presentada entre 0,1 y 10 μm ha sido mayor que la presentada por los demás hormigones HRH. A pesar de eso, la resistencia presentada por esta mezcla es prácticamente similar a la presentada por el hormigón HRH 50%.

Por otro lado, independiente de la porosidad y distribución de poros, se nota que el comportamiento frente a la resistencia de los hormigones hechos con árido AH es distinto de los hormigones hechos con AC.

Esta claro que la resistencia a compresión de hormigones reciclados debe llevar en cuenta la combinación de todos los factores que afectan a la porosidad de los diferentes componentes que forman la estructura del hormigón.

Respecto a los hormigones HRC, debido a la alta porosidad del árido AC, se puede considerar que el equilibrio entre la relación agua/cemento de la zona de transición y la porosidad del árido puede ser alcanzado en mezclas con bajo contenido de árido reciclado. En contrapartida, en cantidades importantes, las características de la matriz cerámica de los áridos reciclados cerámicos influyen la estructura de poros del hormigón de modo a contribuir directamente en la pérdida de resistencia. Adicionalmente, con base en consideraciones teóricas (Metha y Monteiro, 1994), también se puede afirmar que la forma, rugosidad y composición mineralógica de los áridos reciclados cerámicos que

componen el árido AC pueden contribuir para la disminución de la resistencia de la zona de transición y, consecuentemente, de la resistencia a compresión de las mezclas HRC.

El comportamiento de los hormigones HRH, por otra parte, es justificado por la presencia de elementos asfálticos en el árido reciclado AH. Según Hansen y col. (1992), la presencia de asfalto influye en la pérdida de la resistencia y del módulo de elasticidad del hormigón. La relevante presencia de asfalto en los hormigones HRH puede haber producido cambios en estas propiedades de esos hormigones.

Los resultados de **módulo de elasticidad** obtenidos confirman el comportamiento observado en los resultados de resistencia a compresión.

Se parte de la premisa que tanto la fracción volumétrica, la masa específica y el módulo de deformación de los componentes del hormigón como las características de la zona de transición son los parámetros que influyen el comportamiento elástico de la estructura. Las porosidades del árido, del mortero y de la zona de transición son, por lo tanto, factores determinantes en las características elásticas de un hormigón (Metha y Monteiro, 1994).

A diferencia de los factores que influyen la resistencia a compresión de hormigones reciclados, la porosidad de los áridos tiene una gran importancia en el módulo de elasticidad de la estructura, ya que es esta característica la que determina la rigidez del árido.

En general, los datos obtenidos indican una disminución del valor del módulo de elasticidad proporcional al porcentaje de árido reciclado que contienen, lo que es coherente admitir ya que los áridos reciclados AH y AC son más porosos que el árido convencional utilizado. Por otro lado, se citan los siguientes comportamientos:

- Aunque el hormigón HRH 50% haya presentado una porosidad por intrusión de mercurio bastante similar a la presentada por el hormigón HRH 20% (12,11 y 12,46%, respectivamente), se observa una reducción del módulo de elasticidad por parte de la primera mezcla de cerca de 15%, respectivamente, en comparación con la segunda.
- El hormigón HRC 100% ha presentado una porosidad por intrusión de mercurio bastante similar a la presentada por el hormigón HRC 50% (20,63 y 20,10%, respectivamente). En contrapartida, el módulo de elasticidad de la primera mezcla es cerca de 22% menor que el de la segunda.

Estudios sobre la variación del módulo de elasticidad de hormigones reciclados en función de algunas características de los áridos reciclados (Gayarre, 2008) corroboran este comportamiento al indicar que el porcentaje de uso de áridos reciclados es el factor que determina esta propiedad.

En el caso de los hormigones HRH, se destaca la influencia generada por la presencia de elementos asfálticos contenidos en el árido reciclado AH, mientras que en el caso de los hormigones HRC se destaca la influencia generada por la presencia de elementos cerámicos contenidos en el árido reciclado AC.

La correlación entre la propiedad del módulo de elasticidad y el contenido de árido reciclado de los hormigones estudiados es comprobada en la figura 5.26. La figura 5.27 presenta la correlación entre los resultados de módulo de elasticidad y resistencia.

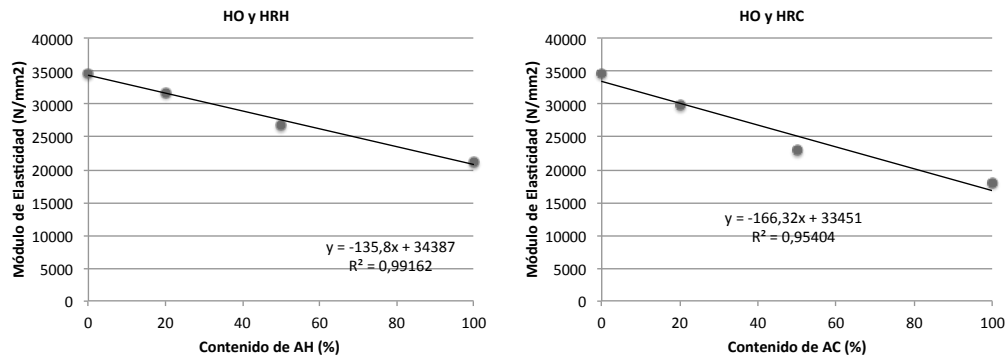


Figura 5.26. Correlación entre el módulo de elasticidad y la cantidad de árido reciclado de los hormigones

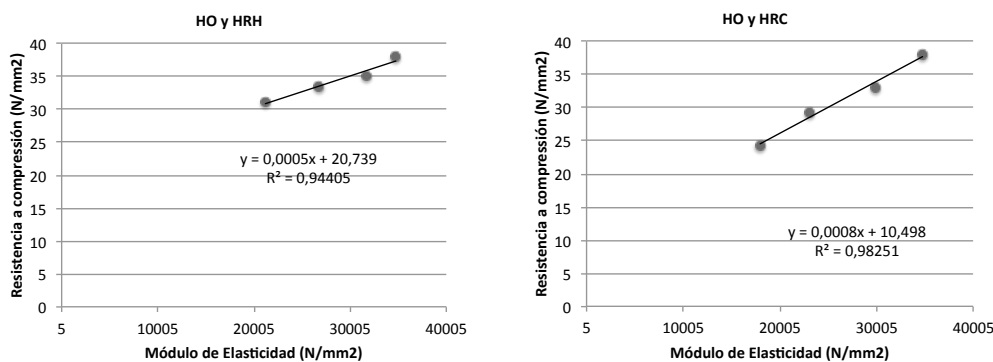


Figura 5.27. Correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de los hormigones

Para el análisis de los resultados de **retracción por secado**, se debe considerar que la principal causa de la retracción en hormigones es la salida del agua adsorbida de la pasta de cemento en función de la humedad relativa diferencial existente entre el hormigón y el ambiente. Por otro lado, este movimiento es influenciado por diversos factores simultáneos que están interrelacionados, y que consideran tanto las características de los materiales utilizados, su dosificación, el tiempo y la humedad al cual la estructura se ha sometido (Metha y Monteiro, 1994).

En el plan experimental propuesto, ha sido posible la realización de dos tipos distintos de ensayos de retracción: uno realizado de acuerdo con la norma UNE 83318:1994 y otro realizado con base en el método interno del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción.

Se observa una diferencia de comportamiento entre los resultados obtenidos en ambos ensayos. Los resultados presentados en el ensayo realizado a partir del método interno del Laboratorio de Estructuras siguen una tendencia relativamente proporcional a los resultados presentados para la

porosidad por intrusión de mercurio (figura 5.28). La mayor porosidad existente en las mezclas recicladas proporciona un aumento en el movimiento de la humedad y en la retracción, en especial en el caso de los hormigones HRH.

Los resultados del ensayo UNE 83318:1994, sin embargo, no indican esta correlación.

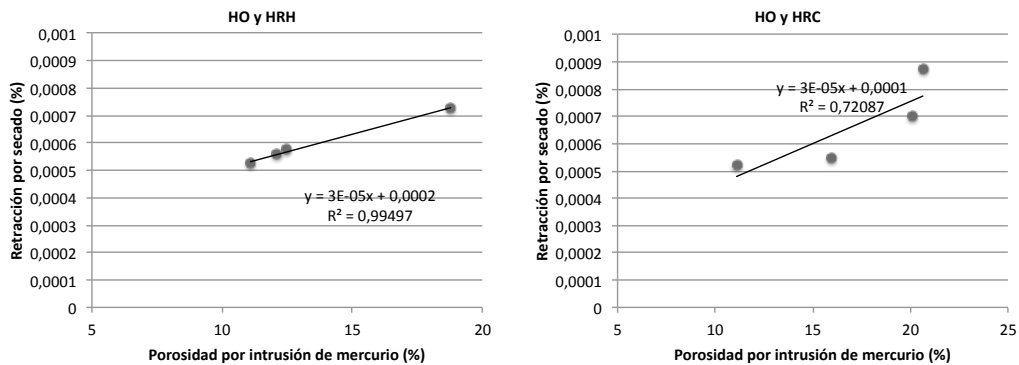


Figura 5.28. Correlación entre las medidas del 778º día del ensayo de retracción por secado del Método Interno de Laboratorio y los valores de porosidad por intrusión por mercurio de los hormigones estudiados

Una de las causas que podrían originar esta diferencia de comportamiento entre los resultados obtenidos en los ensayos es que el método propuesto por la norma UNE 83318:1994 realiza la saturación de las probetas ensayadas a través de su inmersión en agua durante los primeros 28 días de vida de hormigón, mientras el método interno solo las mantiene en cámara húmeda.

La plena saturación de las probetas ha asegurado que no existiera la reducción del volumen de agua de los hormigones ensayados durante el curado de 28 días, como consecuencia de la combinación química del agua con el cemento generada en los primeros días de vida del material. Esta mayor disponibilidad de agua libre en los primeros días del ensayo, puede haber influenciado en la disminución del porcentaje de granos de cemento no hidratado de las mezclas sometidas al ensayo UNE 83318:1994.

En ese contexto, es importante resaltar que la eliminación del agua adsorbida sobre las partículas de silicato de calcio hidratado es la responsable por las mayores deformaciones de la estructura. La pérdida del agua en los poros capilares, característica del proceso de secado, produce deformaciones menos relevantes.

Estas consideraciones se confirman con base en el comportamiento de los hormigones durante el proceso de secado por secado realizado en el ensayo UNE 83318:1994.

La retracción por secado de los hormigones HRH 20%, HRC 20% y HRC 50%, en especial, es inferior a la presentada por el hormigón HO. El HRH 20% debería tener un poco más de retracción, pero este comportamiento no se detecta. En el caso de las mezclas HRC 20% y HRC 50%, se puede afirmar que la pérdida de agua por las fuerzas capilares es más relevante que por las partículas de silicato de calcio hidratado.

Las figuras 5.29 y 5.30 presentan la correlación entre la retracción por secado y la pérdida de agua de los hormigones producidos. En las curvas obtenidas, se observa que:

- los hormigones HRH presentan una correlación entre la retracción y la pérdida de peso similar al hormigón de referencia. Se puede afirmar que la presencia de macro poros en estas mezclas no es relevante lo suficiente para generar una pérdida de agua mayor que la presentada por el hormigón HO para un mismo valor de retracción;
- los hormigones HRC, por su parte, para un mismo valor de retracción, presentan la tendencia a perder más agua que el hormigón HO. La elevada pérdida de agua es relacionada a la cantidad de poros capilares existentes en estas mezclas.

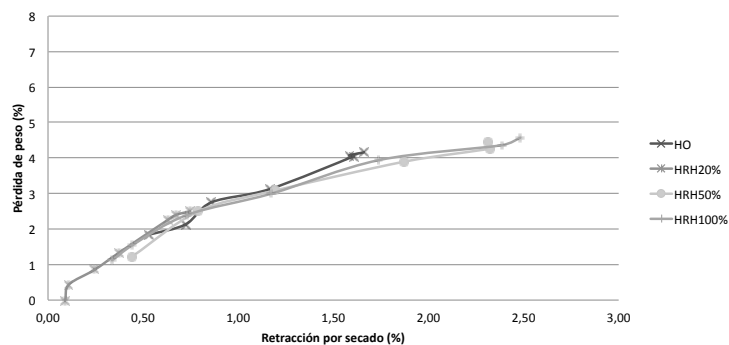


Figura 5.29. Correlación entre la retracción por secado y la pérdida de peso de los hormigones HO y HRH - Método UNE 83318:1994

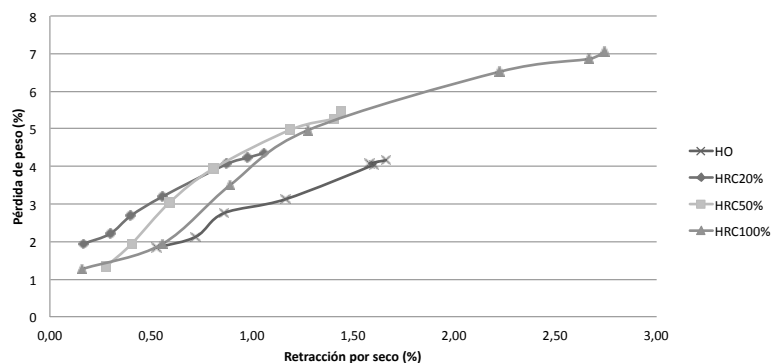


Figura 5.30. Correlación entre la retracción por secado y la pérdida de peso de los hormigones HO y HRC - Método UNE 83318:1994

Adicionalmente, es importante resaltar que el ensayo realizado con base en el método interno del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción ha sido realizado bajo condiciones de temperatura y humedad controladas en cámara de secado (50 ± 4 % de humedad relativa y $23 \pm 1,1$ °C de temperatura), mientras las probetas sometidas al ensayo UNE 83318:1994 fueron mantenidas bajo condiciones ambientales reales (valores de humedad entre 11,5 y 79 %RH y valores de temperatura en el rango de 12,7 y 27,6°C).

Las condiciones ambientales tienen gran influencia en el proceso de retracción. Elevadas temperaturas y bajas humedades pueden contribuir para generar fisuras superficiales, debido a un excesivo contenido en agua que se puede formar en la superficie del hormigón.

De un modo general, considerando los resultados de ambos ensayos, se puede apreciar que con un reemplazo del 20% de árido reciclado, sea árido AH o AC, se puede tener un comportamiento de retracción similar que un hormigón convencional. Por otro lado, es posible inferir que para los hormigones con árido reciclado, la estabilización de la pérdida de agua es más tardía y con valores más altos que para los hormigones convencionales.

En resumen, las correlaciones establecidas entre las propiedades físicas y mecánicas analizadas se muestran coherentes con los estudios realizados por Gayarre (2008). El autor ha realizado un estudio sobre las variaciones de densidad, absorción, resistencia a compresión y módulo de elasticidad de hormigones reciclados, entre otros factores, en función de algunas características de los áridos reciclados utilizados en su producción: la calidad, el porcentaje de utilización, el porcentaje de desclasificados, la granulometría y otros.

En ese estudio, el porcentaje de uso del árido reciclado fue considerado un factor determinante en las propiedades de densidad, absorción y módulo de elasticidad. Ya la calidad del árido reciclado influye tanto la absorción del hormigón como su resistencia a compresión.

5.3 DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

5.3.1 ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD

La propiedad de absorción por capilaridad del hormigón se refiere a su capacidad de succión de líquidos externos a su interior. Ocurre debido a las diferencias de presión que existen entre los líquidos externos y los líquidos en el interior de los vasos capilares del hormigón. Cuando las fuerzas intermoleculares adhesivas entre un líquido y un sólido, en contacto a través de la superficie vertical del sólido, son más fuertes que sus fuerzas intermoleculares cohesivas, el menisco del líquido pasa a presentar una forma cóncava. Este efecto provoca, con el pasar del tiempo, el transporte vertical y progresivo del líquido dentro de la estructura de poros del sólido.

Esta propiedad consiste en un buen indicador de la durabilidad de las estructuras de hormigón. Los poros capilares existentes en los hormigones se consideran la principal vía de acceso de agentes agresivos desde el exterior, ya que corresponden a los espacios vacíos existentes en la estructura que generalmente están interconectados y abiertos hacia su ambiente externo.

El procedimiento adoptado para la realización de este ensayo sigue las especificaciones descritas en el proyecto de norma prUNE-83982:2007. El ensayo objetiva medir la capacidad del hormigón de absorber líquidos por ascensión a través de los vasos capilares. El método consiste en registrar el

cambio de peso (masa) de una probeta de hormigón que se encuentra en contacto con agua en uno de sus extremos, hasta que el peso se estabilice.

El tipo de probeta utilizado, la edad del hormigón y el tipo de cura al cual el ha sido sometido tienen grande influencia en el ensayo. La edad de ensayo ha sido de 28 días, como los demás ensayos realizados en este trabajo.

Para la realización del ensayo, se han utilizado tres probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura para cada tipo de hormigón analizado, con las caras completamente paralelas y espesor homogéneo. Las muestras han sido obtenidas de la parte central de un cilindro de hormigón de 100 mm x 200 mm. Los extremos de la probeta no han sido utilizados en el ensayo debido a la influencia que la capa de pasta que queda en estas partes puede causar en los resultados.

Antes del inicio del ensayo, se ha realizado la preparación de las muestras, de acuerdo con los siguientes procedimientos:

- Las muestras han sido secadas en estufa a $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 48 horas;
- A continuación las muestras han sido enfriadas a temperatura ambiente a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- Una vez secas y enfriadas las probetas, se ha sellado la cara lateral de las probetas con pintura impermeabilizante para evitar la absorción en esa superficie;
- Una vez selladas las probetas, se ha registrado la masa seca (Msi). Se han introducido las probetas en el recipiente sobre la base de apoyo, con una altura de agua respecto de la base de absorción de $5\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$. La altura del agua ha sido controlada y mantenida durante todo el transcurso del ensayo;
- La temperatura ha sido ambiente y el recipiente ha sido tapado para procurar alcanzar una humedad de equilibrio del aire mayor que el 95%.

El peso de la probeta tras inmersión (Mht) se ha registrado a diferentes tiempos. Los registros iniciales ha sido realizados en 5, 10, 15, 30 minutos, 1, 2, 3, 24, 48 y 72 horas. Pasadas 72 horas, los registros han sido realizados hasta la obtención de resultados que han indicado la constancia de la masa (figura 5.31).



Figura 5.31. Registros fotográficos del ensayo de absorción capilar

De los datos obtenidos en el ensayo se ha calculado el incremento de masa de las probetas respecto al peso inicial previo a la inmersión ($M_{ht}-M_{si}$). Los resultados del ensayo se presentan en la forma de gráficos (figuras 5.32 y 5.33), donde se registra:

- el incremento de masa por unidad de área de la muestra de ensayo (C_{it}), en gramos por centímetro cuadrado, en función del tiempo de lectura (t), en minutos.
- el incremento de masa por unidad de área de la muestra de ensayo (C_{it}), en gramos por centímetro cuadrado, en función de la raíz cuadrada del tiempo de lectura (\sqrt{t}), en minutos a la un medio.

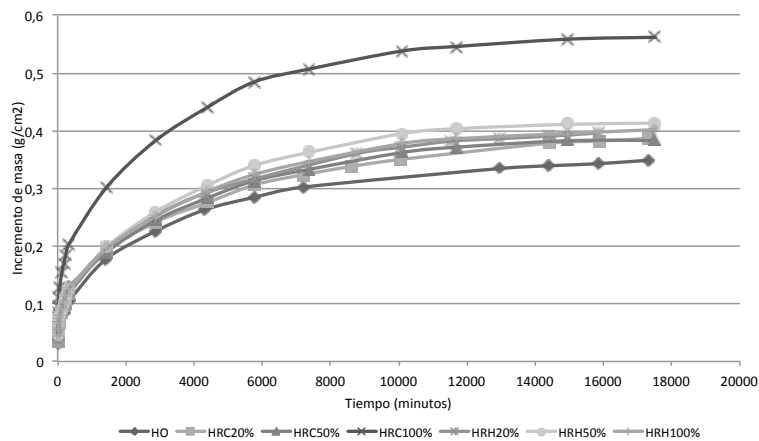


Figura 5.32. Absorción capilar de los hormigones estudiados - incremento de masa por minutos

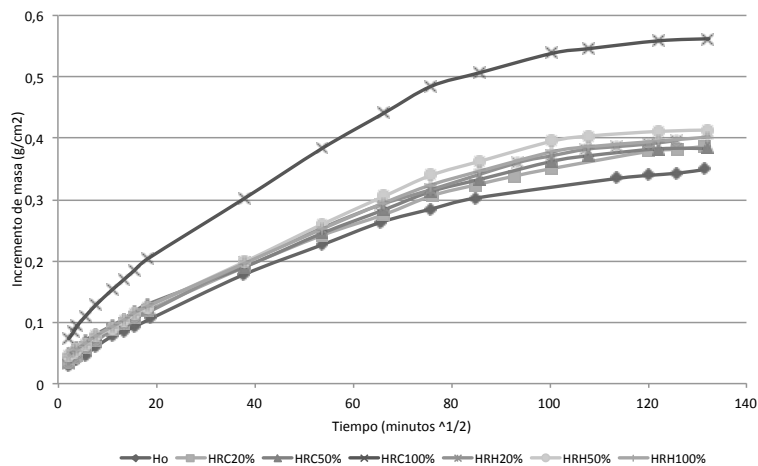


Figura 5.33. Absorción capilar de los hormigones estudiados - incremento de masa en función de la raíz cuadrada del tiempo de lectura (\sqrt{t}), en minutos a la un medio

En las curvas obtenidas, se observa, inicialmente, una gran homogeneidad de los resultados de los hormigones reciclados con el hormigón de referencia. La excepción la constituye el hormigón reciclado HRC 100%.

Mientras todas las demás curvas siguen un comportamiento similar, las curvas de incremento de masa por tiempo y raíz del tiempo del hormigón HRC 100% indican que hubo un gran incremento de masa de las probetas hechas con 100% de árido reciclado AC. A simple vista parece que la adicción de este material reciclado en grandes cantidades influencia la capacidad de absorción capilar del hormigón.

Con estos datos, se ha determinado el coeficiente de succión capilar (absortividad) de las probetas, a través de la metodología de cálculo indicada en las especificaciones de la normativa Suiza (SIA 162/1:1989) y la norma Portuguesa (LNEC E393:1993).

El coeficiente de absorción por capilaridad fue obtenido a partir de la pendiente de la curva de incremento de masa por área versus la raíz de tiempo. Fue calculado por la diferencia entre la masa de la probeta de hormigón en contacto con el agua y la masa de la probeta seca, dividida por el área de la superficie de la probeta que fue sometida al contacto con el agua y la raíz cuadrada del tiempo que la probeta ha llevado para alcanzar la constancia de masa:

$$K_{ac} = \frac{(M_{ht} - M_{si})}{D_a C_{it} \sqrt{10 \frac{t_{ht}}{E_{it}^2}}} \quad (5.1)$$

K_{ac} = Coeficiente de absorción capilar ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$)

D_a = Densidad del agua (kg/m^3)

M_{ht} = Masa de la probeta en el tiempo t (kg)

M_{si} = Masa de la probeta inicial (kg)

C_{it} = Volumen de la probeta (cm^3)

t_{ht} = Tiempo que la probeta ha llevado para alcanzar la constancia de masa (minutos)

E_{it} = Espesor de la probeta (cm)

La tabla 5.4 y la figura 5.34 presentan los resultados obtenidos. En ellas, se nota que la capacidad de absorción de los hormigones con 20% de áridos reciclados, tanto de hormigón como cerámico, es prácticamente la misma que la presentada por el hormigón de referencia.

Tabla 5.4. Coeficiente de absorción capilar de los hormigones producidos

Hormigón	Coeficiente de absorción capilar K ($\text{Kg}/\text{m}^2 \text{min}^{0,5}$)		
	HO	HRH	HRC
0%	0,002307907	-	-
20%	-	0,002403754	0,002438109
50%	-	0,003691627	0,003437004
100%	-	0,003550163	0,005034035

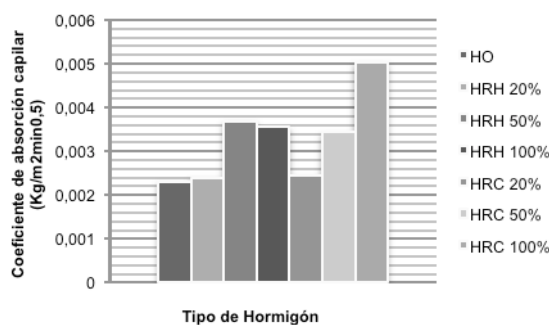


Figura 5.34. Coeficiente de absorción capilar de los hormigones producidos

Sin embargo, se observa que existe un crecimiento gradual del coeficiente de absorción del hormigón, a medida que se incorporan más áridos reciclados. Como ha sido identificado en el análisis de los gráficos de incremento de masa, el aumento es especialmente observado en los hormigones reciclados hechos con 100% de árido reciclado AC.

5.3.2 CARBONATACIÓN

Químicamente, la carbonatación se define como el proceso donde el anhídrido carbónico CO_2 contenido en el aire penetra en las aberturas capilares del hormigón y se combina con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio. Reduce, en consecuencia, la alcalinidad del hormigón. Cuando el valor del pH alcanza valores inferiores a 9,5, la alcalinidad ya no es suficiente para mantener pasivada la capa de óxido protectora de las armaduras de acero. Permitiendo que la acción de la humedad y del oxígeno, generen la corrosión en ellas.

Es importante resaltar que la presencia de CO_2 en el hormigón puede promover un incremento de la retracción pero no necesariamente representa un daño al material. Los hormigones carbonatados pueden incluso, ser más resistentes e impermeables a la acción de agentes agresivos en comparación a un hormigón no carbonatado (Helene, 1993).

Los factores que determinan el proceso de deterioro del hormigón por carbonatación son:

- El contenido de humedad del material: Si los poros están secos, no hay reacción del CO_2 con el hidróxido de calcio. Por otro lado, si los poros están saturados, la penetración del CO_2 es muy lenta, debido a la baja velocidad de difusión del CO_2 en el agua. La bibliografía indica que la humedad óptima para generar las mejores condiciones de carbonatación en el hormigón está entre 50 y 80%, conforme indica la figura 5.35;
- La porosidad del hormigón: Cuanto más poroso el hormigón, mayor será la velocidad de carbonatación, aunque los poros capilares estén totalmente saturados (Rincón y col., 1997).

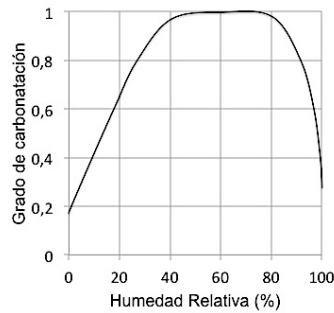


Figura 5.35. Grado de carbonatación de los hormigones en función de la humedad relativa del aire (adaptado de SanJuan, 1992)

Otro factor a tener en cuenta es la reserva alcalina del hormigón que puede provocar una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación. En el caso de hormigones reciclados, en especial, la ACHE (2006) indica que el contenido de elementos alcalinos carbonatados puede ser mayor en hormigones reciclados, debido a la presencia del mortero adherido existente en los áridos reciclados de hormigón.

Según la ACHE (2006), en general no existe un consenso entre la bibliografía actual sobre cuál es el comportamiento de los hormigones reciclados frente a la carbonatación.

De modo general, los resultados de la bibliografía indican que las profundidades de carbonatación de hormigones reciclados se mantienen similares a las de los hormigones convencionales siempre y cuando se utilice áridos gruesos reciclados de hormigón, de calidad y en pequeña cantidad. Hormigones reciclados con grandes cantidades de árido reciclado suelen presentar frentes de carbonatación más profundos.

Algunos estudios han identificado poca diferencia en el comportamiento entre hormigones reciclados y convencionales (Kashino y Tanahashi, 1988; Limbachiya y col., 1998; Khalaf, 2006). Otros, sin embargo, han obtenido incrementos entre 20% y 65% de la profundidad del frente de carbonatación en hormigones reciclados en comparación al hormigón de referencia. Mientras Kasai y col. (1988) han identificado incrementos alrededor del 20%, el trabajo del BCSJ (Building Contractors Society of Japan) presenta resultados que indican incrementos de 65% (Hansen y col., 1992). Teranishi y col. (1998), han obtenido incrementos de hasta 50%. Por otro lado, este mismo estudio indica que los hormigones reciclados hasta 30% de sustitución han presentado valores de profundidad de carbonatación similares al hormigón de control.

El procedimiento de ensayo adoptado ha consistido en una adaptación de procedimientos de ensayos realizados en otras investigaciones, con base en la experiencia adquirida y las condiciones del laboratorio disponibles.

El ensayo se realiza empleando una o dos series de 8 mini probetas prismáticas de 50 x 50 x 100 mm para los hormigones HO, HRH 20% y HRC 20%.

Para la confección de las probetas utilizadas en este ensayo, se han utilizado 1 probeta prismáticas de 400 mm de ancho y 100 mm de altura y 100 mm de largura para cada tipo de hormigón analizado. Estas probetas se curaron en cámara húmeda durante 28 días. En el 28° día, las probetas ha sido cortadas en los tamaños de 50 x 50 x 100 mm. Para cada probeta, se ha obtenido 8 mini probetas de 50 x 50 x 100 mm, y para cada mini probeta se ha producido una entalladura por corte. El objetivo de la entalladura es facilitar la apertura de la secciones de la mini probeta donde se ha efectuado las medidas de la profundidad del frente de carbonatación.

A continuación, las mini probetas han sido pesadas y sometidas al proceso de secado al aire hasta presentar un peso próximo al peso de la probeta con un contenido de agua aproximado de 65% de la absorción. Durante el proceso de secado al aire, las probetas permanecieron en el interior del laboratorio. Los valores de peso que deberían ser alcanzados han sido calculados a partir del conocimiento de los valores de absorción y humedad de cada tipo de hormigón, obtenidos en el ensayo de densidad y absorción (tabla 5.2).

Las mini probetas con contenido de agua igual o aproximado a 65% de la saturación han sido mantenidas acondicionadas en el laboratorio, protegidas de la pérdida de humedad, hasta la edad de 64 días. En esta edad, las mini probetas han sido sometidas a un proceso de impermeabilización de cinco de las seis caras que poseen, para conseguir una carbonatación unidireccional. Para la impermeabilización, las cinco caras se trataban inicialmente con una pintura impermeabilizante asfáltica, después se recubrieron con dos hojas de papel de aluminio y finalmente, se envolvieron con una capa de cinta adhesiva plástica.

La figura 5.36 presenta un esquema de todo el proceso de preparación de las muestras.

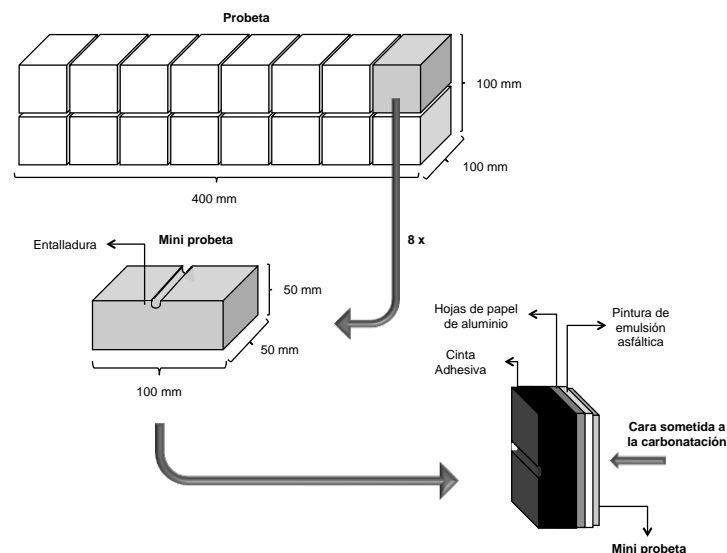


Figura 5.36. Esquema de la preparación de las muestras utilizadas en el ensayo de carbonatación

Las mini probetas impermeabilizadas han sido sometidas al proceso acelerado de carbonatación, a través de su mantenimiento en una bolsa plástica llena de gas nitrógeno con una concentración de 4,0% CO₂ a un presión de 150 bar en la bombona de origen.

La falta de una cámara climática para disponer las probetas ha inviabilizado el control de las condiciones climáticas. La temperatura y la humedad relativa de cada bolsa fueron registradas. De acuerdo con los registros, las bolsas han presentado variaciones de 17 a 27° de temperatura y 37 a 100% de humedad relativa, conforme indican las figuras 5.37 y 5.38.

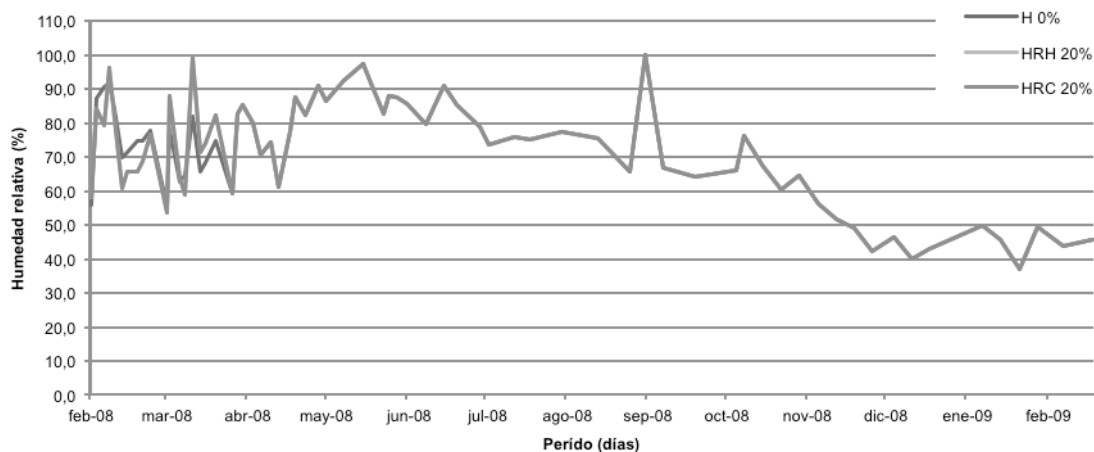


Figura 5.37. Variación de la humedad relativa en el interior de las bolsas plásticas con gas CO₂

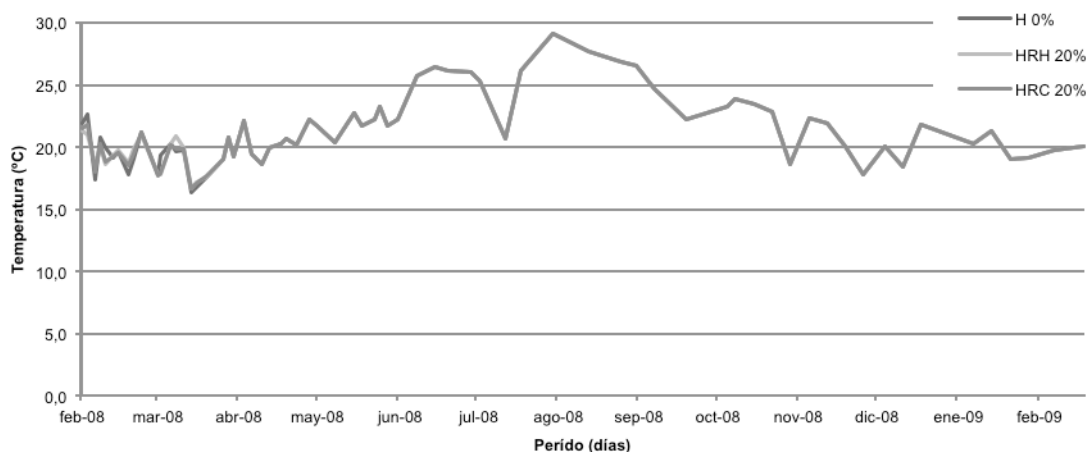


Figura 5.38. Variación de la temperatura en el interior de las bolsas plásticas con gas CO₂

La humedad relativa y la temperatura de ensayo, aunque variables a lo largo de todo en período de ensayo, se han mantenido prácticamente equivalentes para todas las muestras. Esta situación no ha permitido que, en algunos momentos, se pudiera mantener las condiciones climáticas óptimas para el avance de la carbonatación, pero ha permitido que el análisis comparativo entre las muestras pudiera ser realizado.

La figura 5.39 presenta algunos registros fotográficos del procedimiento total de medida del perfil de carbonatación de las probetas.

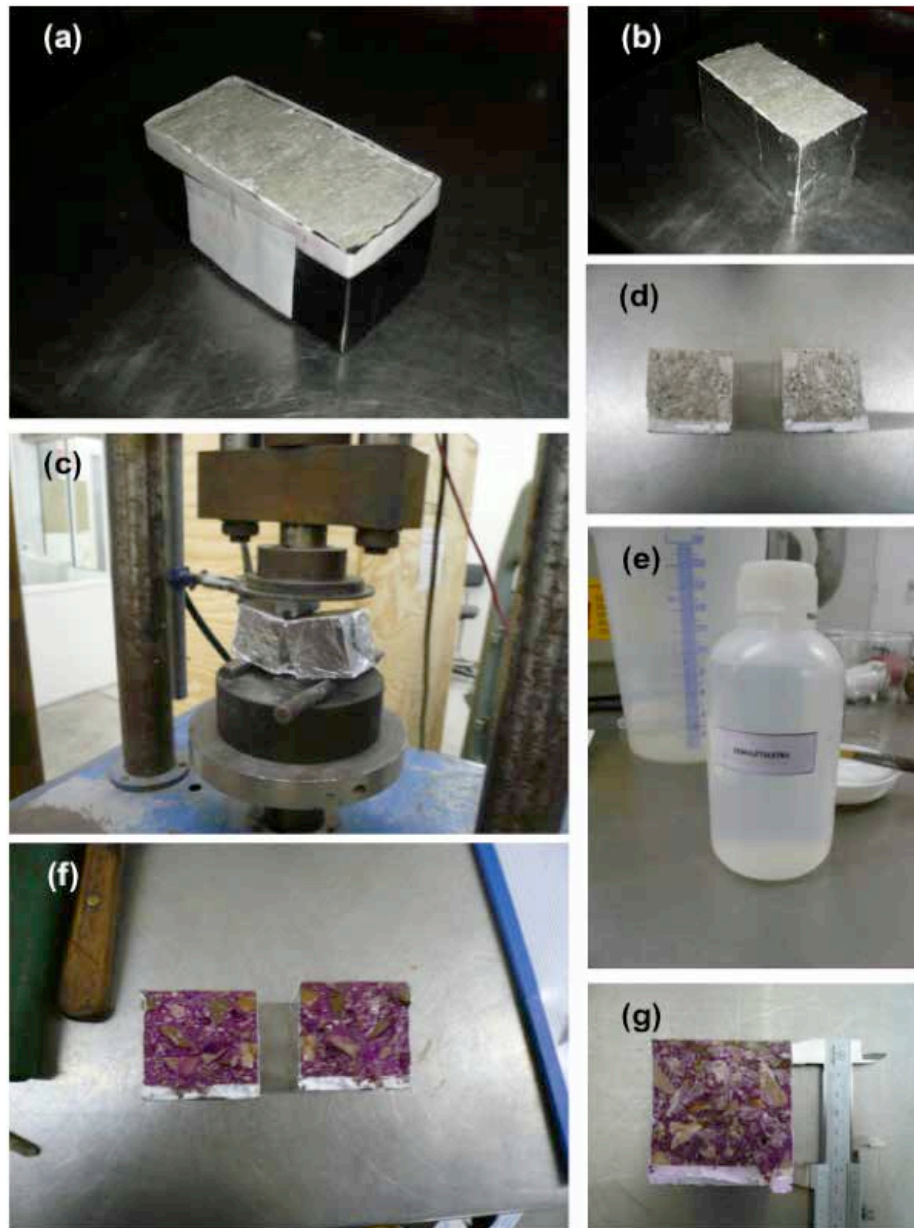


Figura 5.39. Registros fotográficos del proceso de medida de la profundidad de carbonatación en las mini probetas

El proceso total comprendió la realización de 8 medidas de la profundidad de la carbonatación a lo largo de un año (cada medida fue realizada en una mini probeta). Las medidas fueron realizadas en las siguientes edades del proceso: 14, 28, 45, 90, 180, 270, 300 y 360 días.

La superficie de lectura se ha producido sometiendo la mini probeta a esfuerzos de flexo-tracción de manera tal que la entalladura dirija la sección de rotura paralela a la cara menor de la probeta.

Inmediatamente después, las dos superficies recién producidas se han sometido a una solución al 1% de fenolftaleína en etanol al 70%. La aplicación de los indicadores y las medidas de profundidad del frente de carbonatación se han efectuado siguiendo las recomendaciones de la RILEM CPC-18 (1988).

Los resultados se presentan en detalle en la tabla 5.5, donde se destaca los valores obtenidos en la medida realizada en el 360° día.

Tabla 5.5. Medidas del frente de carbonatación de las probetas analizadas

Tipo de hormigón	Muestra	Condición	Días	Profundidad media (mm)	Profundidad máxima (mm)
HO	1	Regular A	14	0,5	0,5
	2	Regular A	28	0,6	0,6
	3	Regular A	45	0,6	0,6
	4	Regular A	90	0,7	0,7
	5	Regular A	180	1,0	1,0
	6	Regular A	270	0,5	0,5
	7	Irregular B	300	1,2	1,5
	8	Irregular B	360	4,9	7,5
HRH 20%	1	Regular A	14	0,0	0,5
	2	Irregular B	28	0,0	1,0
	3	Irregular B	45	0,0	0,6
	4	Irregular B	90	3,2	3,6
	5	Irregular B	180	3,3	4,6
	6	Irregular B	270	3,7	7,5
	7	Irregular B	300	3,4	6,4
	8	Irregular B	360	4,6	10,0
HRC 20%	1	Regular A	14	0,0	0,0
	2	Irregular B	28	0,5	0,6
	3	Irregular B	45	0,5	0,7
	4	Irregular B	90	0,6	0,9
	5	Irregular B	180	0,9	2,0
	6	Irregular B	270	0,6	1,9
	7	Irregular B	300	2,7	6,0
	8	Irregular B	360	5,5	10,0

Las figuras 5.40 a 5.42 presentan la variación de la profundidad media y máxima del frente de carbonatación a lo largo del tiempo de cada uno de los hormigones sometidos al proceso.

Se observa que el hormigón HO solo empieza a presentar valores de profundidad media de carbonatación relevantes en el 300° día de ensayo (figura 5.40), mientras que los hormigones HRH 20% y HRC 20% han presentado frentes de carbonatación relevantes en las medidas de 90° día y 180° día, respectivamente (figuras 5.41 y 5.42).

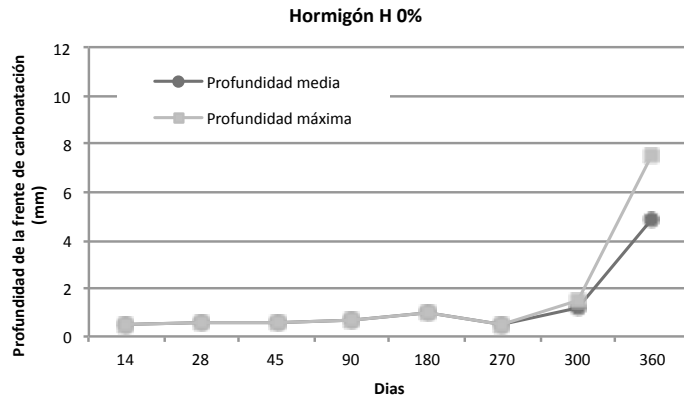


Figura 5.40. Variación de las profundidades media y máxima del frente de carbonatación a lo largo del tiempo (cm/día) del hormigón HO

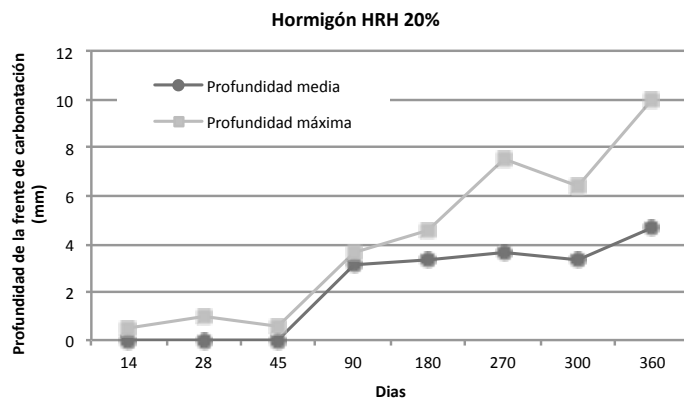


Figura 5.41. Variación de las profundidades media y máxima del frente de carbonatación a lo largo del tiempo (cm/día) del hormigón HRH 20%

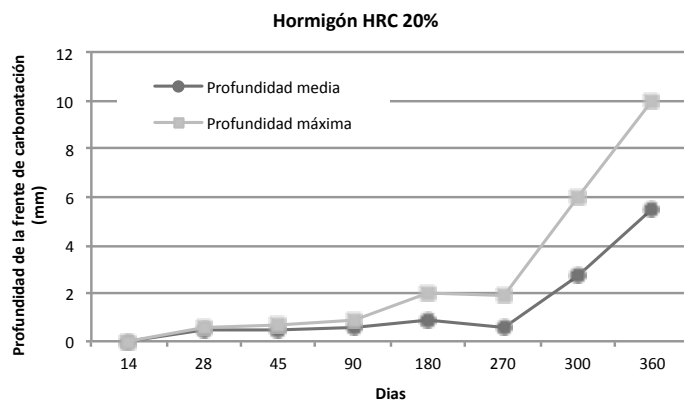


Figura 5.42. Variación de las profundidades media y máxima del frente de carbonatación a lo largo del tiempo (cm/día) del hormigón HRC 20%

Las curvas de profundidad de carbonatación por días de los hormigones HO y HRC 20% tienen comportamiento similar, aunque las profundidades de carbonatación registradas para el hormigón HRC 20% sean mayores. Se nota que el hormigón HRH 20% tiene una velocidad inicial de carbonatación mayor que los demás hormigones. Sin embargo, la profundidad media de carbonatación registrada para este hormigón en el 360° día de ensayo es inferior a la registrada para el hormigón HRC 20%.

Estos resultados presentan un comportamiento no coherente con resultados de ensayos acelerados de carbonatación en hormigones encontrados en la bibliografía. González y Andrade (1980), por ejemplo, a través de estudios acelerados con ambiente a 4%, concluyeron que la profundidad de carbonatación mantiene su relación proporcional con la raíz cuadrada del tiempo, aún a estas altas concentraciones de CO₂.

Por otro lado, otros estudios indican la necesidad de tomar precauciones en situaciones donde los resultados de pruebas aceleradas extrapolen los resultados esperados en ambientes atmosféricos normales (Alonso y Andrade, 1987).

La velocidad del frente de carbonatación de las muestras analizadas ha sido calculada con los valores obtenidos en la medida obtenida en el 360° día. Para este cálculo, se ha considerado exclusivamente esta medida, ya que este ha sido el tiempo necesario para el registro de profundidades de carbonatación relevantes en las tres muestras.

La figura 5.43 presenta el registro fotográfico de las probetas sometidas a medición del frente de carbonatación en el 360° día del ensayo.

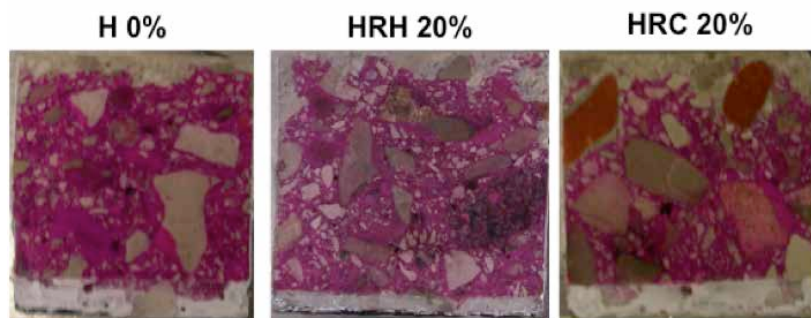


Figura 5.43. Perfil de las probetas sometidas a medición de la profundidad del frente de carbonatación en la edad de 360 días

En el contexto del uso de áridos reciclados en hormigón, es importante considerar la carbonatación ya existente previamente en los áridos reciclados. Algunas muestras de hormigón reciclado, después de sometidos a la solución de fenolftaleína, han evidenciado algunos puntos carbonatados en su interior que no están relacionados al frente de carbonatación inducida en el ensayo. Un ejemplo de este comportamiento es observado en la foto de la muestra del HRC 20% indicada en la figura 5.43. En la referida muestra se observa una mancha ubicada en la parte inferior derecha de un color menos rosado que el resto del hormigón no carbonatado. Esta mancha coincide exactamente con un

árido reciclado que compone el hormigón e indica que este árido reciclado presenta una carbonatación previa al ensayo.

Como el frente de carbonatación ha sido irregular para la mayor parte las muestras, la profundidad media de carbonatación se ha obtenido a través de la medida del área carbonatada, en función del ancho de la cara de la muestra sometida a carbonatación. El área carbonatada fue obtenida con la ayuda de un programa informático de análisis de imágenes fotográficas.

El tiempo considerado en el cálculo ha sido equivalente al tiempo real de carbonatación de la muestra. El tiempo real se ha calculado relacionando la cantidad de días de ensayo con el grado de carbonatación diario obtenido en función de la humedad relativa diaria, conforme indica la ecuación 5.2. Los grados de carbonatación diarios han sido obtenidos a través del grafico indicado en la figura 5.35.

$$T_{real} = (T_{d1} \times 1) + (T_{d2} \times 0,8) + (T_{d3} \times 0,3) \tag{5.2}$$

T_{d1} = Total de días en que la humedad relativa se ha mantenido mayor o igual a 40 y menor que 80%.

T_{d2} = Total de días en que la humedad relativa se ha mantenido mayor o igual a 80 y menor que 100%.

T_{d3} = Total de días en que la humedad relativa se ha mantenido menor que 50 o igual a 100%.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 5.44. Indican que la presencia de árido reciclado, tanto AH como AC, representan un pequeño incremento en la velocidad del frente de carbonatación del hormigón.

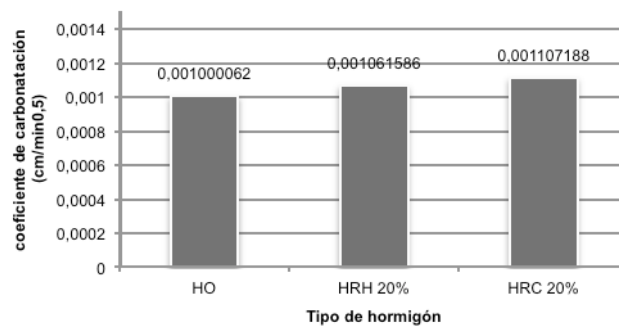


Figura 5.44. Coeficiente de carbonatación en la edad de 360 días (cm/min^{0,5})

Según Rincón y col. (1997), la velocidad del frente de carbonatación está relacionada con la humedad del hormigón, su porosidad y el contenido de componentes alcalinos carbonatados.

Como las condiciones de temperatura y humedad de ensayo para las tres muestras han sido equivalentes, se cree que el factor principal que ha influenciado el comportamiento de los resultados obtenidos es la porosidad.

Barra (1996) afirma que el proceso de carbonatación en hormigones reciclados dependen tanto de la permeabilidad del mortero nuevo como de la del árido reciclado. En situaciones en que el árido

reciclado presenta una estructura porosa equivalente o con menos poros que el mortero nuevo, la penetración del dióxido de carbono se producirá preferiblemente a través del mortero nuevo, y, por lo tanto, la carbonatación del hormigón reciclado tendrá un comportamiento similar al de un hormigón convencional equivalente.

Por otro lado, en situaciones que el árido reciclado es más permeable que el mortero nuevo, el árido actúa como foco de propagación del frente de carbonatación. En estos casos, la profundidad de carbonatación en hormigones reciclados suele ser mayor que la observada en el hormigón convencional equivalente. El frente de carbonatación suele tener un carácter irregular, presentando picos que coordinan con los áridos porosos. Esta situación ha sido observada principalmente en las muestras con árido reciclado AC.

En ese contexto, se observa claramente en los registros fotográficos realizados a lo largo del ensayo (figura 5.43), que la mayor porosidad del árido reciclado, principalmente del árido AC, ha permitido que el frente de carbonatación fuera más acentuado en determinados puntos de la muestra.

5.3.3 PENETRACIÓN DE CLORUROS

Existen diversos tipos de ensayos disponibles en la bibliografía para la medición de la difusión de iones cloruros en el hormigón. Con el objetivo de confirmar / comparar los resultados obtenidos, se ha adoptado dos procedimientos para determinar el coeficiente de difusión de los iones cloruro a través del hormigón: prUNE 83987:2007 y AASTHO T 259:2002.

El ensayo prUNE 83987:2007 parte de la premisa que el avance de cloruros en el interior del hormigón, sea reciclado o no, se da por difusión. Este procedimiento permite la obtención tanto del coeficiente estacionario (D_s) como el coeficiente no estacionario (D_{ns}) (Castellote y col., 2001):

- Coeficiente de Difusión Estacionario (D_s): También denominado en la bibliografía como coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}), este parámetro sólo considera la porosidad del medio.
- Coeficiente de Difusión No Estacionario (D_{ns}): También denominado en la bibliografía como coeficiente de difusión aparente (D_{app}), este parámetro también lleva en cuenta la fijación de cloruros con las fases del cemento.

La fijación de cloruros, en especial, puede presentarse de modo físico, cuando son absorbidos sobre las paredes sólidas de los poros, o de modo químico, a través de su reacción con ciertos compuestos del cemento (Crumbie y col., 1989; Luping, 1996; Nguyen, 2006):

- La fijación física de cloruros depende de la cantidad de área superficial de los poros y de la naturaleza de los hidratos formados. La presencia de CSH, CAH y CAFH con una elevada superficie específica, por ejemplo, contribuyen al proceso.
- La fijación química ocurre cuando los cloruros se unen a los aluminatos y ferro aluminatos de calcio con el objetivo de formar mono cloro-aluminatos de calcio hidratados (sal de Friedel) o mono cloro-ferratos de calcio hidratados. Varios autores (Nilsson, y col., 1996; Castellote, y

col., 1999; Glass, y col., 2000) indican que la presencia de C_3A y C_4AF puede influenciar el proceso de fijación química.

El ensayo de penetración de cloruros (ASTM C1156:2002) permite identificar el contenido de cloruros en un hormigón, en determinada profundidad y tiempo, e identificar el perfil de la penetración de los cloruros. A través de este ensayo, ha sido posible realizar dos tipos de análisis comparativo adicionales respecto al ingreso de cloruros en hormigones reciclados: su contenido en distintas profundidades y su perfil de la penetración.

Los resultados de los dos métodos se presentan a continuación.

5.3.3.1 Penetración de Cloruros – PrUNE 83987:2007 (Método Multiregimen)

Este ensayo consiste en aplicar una diferencia de potencial entre dos compartimientos, separados por una muestra de hormigón. Mientras un compartimiento contiene una solución de cloruro sódico a 1 molar (catolito), el otro presenta una solución de agua destilada (anolito). La migración de los cloruros a través de la muestra es inducida por la aplicación de un electrodo negativo en el compartimiento con la solución de cloruros y la aplicación de un electrodo positivo en el compartimiento con la solución de agua destilada. El potencial eléctrico externo aplicado obliga a que los iones cloruro migren a través de la muestra hacia el compartimiento de agua destilada.

La cantidad de cloruros que llega al compartimiento de la solución de agua destilada (anolito) es mensurado por medio de la conductividad de esa solución.

Para el ensayo, se han utilizado tres probetas cilíndricas de dimensiones de cerca de 75 mm de diámetro y entre 12 y 18 mm de altura para cada tipo de hormigón analizado.

Las muestras han sido obtenidas del tercio medio del eje longitudinal de una probeta de hormigón de 100 mm x 200 mm. El objetivo es evitar la interferencia de la superficie externa, debido a la alta concentración de pasta en la capa superficial (figura 5.45).

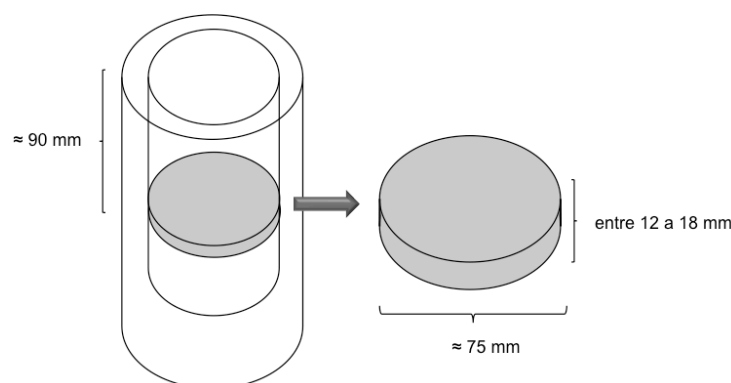


Figura 5.45. Esquema de la muestra utilizada en el ensayo de absorción capilar

La preparación de las muestras consistió en lavarlas con agua para sacar el polvo, y colocarlas en un desecador en vacío, donde han sido sometidas a un periodo inicial de tres horas sin agua y un período de 1 hora sumergidas en agua. A continuación, quitándose el vacío del desecador, las muestras han sido mantenidas en agua por un periodo de 18 ± 2 horas más.

La edad de ensayo ha sido de 28 días, como los demás ensayos realizados en este trabajo.

La migración de iones cloruro ha sido realizada con la aplicación de un campo eléctrico de 12 volts, conforme indica el proyecto de la norma, con el fin de obtener resultados en plazos razonables de tiempo (figura 5.46).

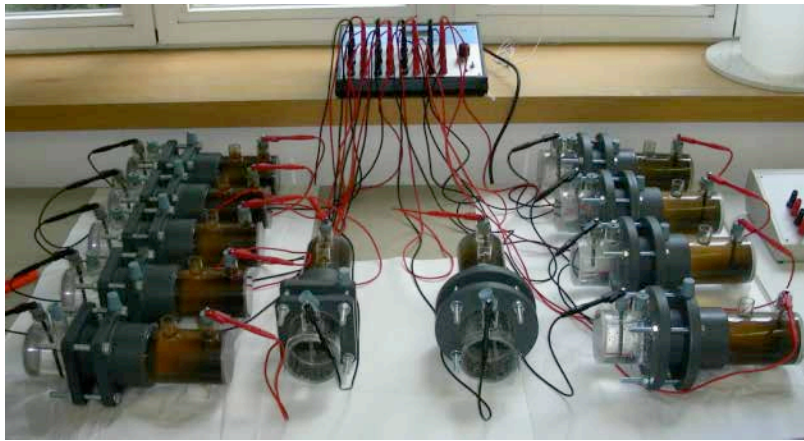


Figura 5.46. Instalación del ensayo: medida de la diferencia potencial efectiva

Se cree que esta aceleración del transporte puede modificar las complejas interacciones que tienen lugar entre los iones cloruro y la matriz de cemento. Los coeficientes obtenidos mediante estos ensayos de migración pasan a no tener representatividad con relación a las condiciones de difusión natural. Aún así, se ha optado por seguir la normativa, ya que los principales análisis deseados son de carácter comparativo.

Analizando los resultados obtenidos (tabla 5.6), de un modo general, no se observa ninguna tendencia a reducción o incremento de los coeficientes de difusión no estacionario vinculada al contenido de áridos reciclados de las mezclas, sea para las mezclas HRH o HRC.

Debido a la gran dispersión de los resultados, se asume que los valores obtenidos no son válidos.

Las dimensiones de la probeta, la edad del hormigón y el tipo de cura al cual el ha sido sometido tienen grande influencia en este ensayo. Como la edad y las condiciones de cura de las probetas analizadas han sido iguales en todos los casos, a la vista de los resultados obtenidos, se admite que los bajos valores de espesor de las muestras utilizadas en el ensayo han influenciado en los valores obtenidos.

Cabe destacar que los ensayos se han realizado con base en el proyecto de norma, y, por eso, se ha asumido la posibilidad de uso de valores de espesor inferiores a 20 mm. Sin embargo, al analizarse los requisitos de la norma definitiva, publicada en momento posterior a la realización de esos

ensayos, se confirma la importancia de uso de un espesor mínimo de 20 mm para las probetas en análisis.

Tabla 5.6. Difusión de cloruros de los hormigones producidos

Hormigón		Espesor medio de las probetas (cm)	$\Delta\Phi$ (V)	$\Delta\Phi_t$ (V)	Jcl (mol/cm ² .s)	v (V / Kelvin)	Ds (cm ² /s)	Dns (cm ² /s)
HO	HO 1	1,29	7,48	1,33	8,18E-09	51,59	5,43E-08	3,96E-07
	HO 2	1,3	8,17	1,28	8,17E-09	49,76	5,01E-08	4,42E-07
	HO 3	1,25	7,16	1,23	8,46E-09	47,98	5,70E-08	4,00E-07
	Media	1,28	7,61	1,28	8,27E-09	49,78	5,38E-08	4,12E-07
HRH 20%	HRH 1	1,34	7,03	1,12	8,29E-09	43,56	6,11E-08	4,86E-07
	HRH 2	1,34	7,12	0,93	7,76E-09	36,27	5,65E-08	5,84E-07
	HRH 3	1,3	7,45	1,01	8,47E-09	39,24	5,73E-08	5,54E-07
	Media	1,33	7,20	1,02	8,18E-09	39,69	5,83E-08	5,41E-07
HRH 50%	HRH 1	1,84	8,18	1,48	4,51E-09	58,26	3,88E-08	5,27E-07
	HRH 2	1,82	8,63	1,69	5,06E-09	66,32	4,09E-08	5,57E-07
	HRH 3	1,82	8,46	1,73	4,49E-09	67,89	3,69E-08	4,57E-07
	Media	1,83	8,42	1,63	4,68E-09	64,16	3,89E-08	5,14E-07
HRH 100%	HRH 1	1,84	8,22	1,71	3,96E-09	67,33	3,40E-08	3,72E-07
	HRH 2	1,82	7,51	1,42	4,14E-09	55,83	3,84E-08	5,07E-07
	HRH 3	1,85	9,65	1,67	5,16E-09	65,75	3,79E-08	5,19E-07
	Media	1,84	8,46	1,60	4,42E-09	62,97	3,67E-08	4,66E-07
HRC 20%	HRC 1	1,27	7,21	0,96	6,35E-09	37,75	4,31E-08	5,83E-07
	HRC 2	1,23	6,63	1,00	8,63E-09	38,95	6,16E-08	5,24E-07
	HRC 3	1,33	6,54	0,97	6,05E-09	37,83	4,75E-08	6,12E-07
	Media	1,28	6,79	0,98	7,01E-09	38,18	5,07E-08	5,73E-07
HRC 50%	HRC 1	1,29	6,03	0,73	1,07E-08	28,83	8,74E-08	7,67E-07
	HRC 2	1,21	7,26	1,27	1,24E-08	50,15	7,90E-08	5,44E-07
	HRC 3	1,22	5,64	0,81	1,08E-08	31,97	8,94E-08	6,09E-07
	Media	1,24	6,31	0,94	1,13E-08	36,98	8,53E-08	6,40E-07
HRC 100%	HRC 1	1,83	6,80	1,06	7,01E-09	41,88	7,22E-08	8,32E-07
	HRC 2	1,84	6,51	1,19	6,76E-09	47,01	7,28E-08	7,82E-07
	HRC 3	1,81	7,04	1,40	8,83E-09	55,06	8,69E-08	5,21E-07
	Media	1,83	6,78	1,22	7,53E-09	47,98	7,73E-08	7,12E-07

La figura 5.47 presenta las curvas de evolución de cloruros de todas las muestras analizadas. A través de ellas, se observa la gran variabilidad de comportamiento observada entre las probetas ensayadas.

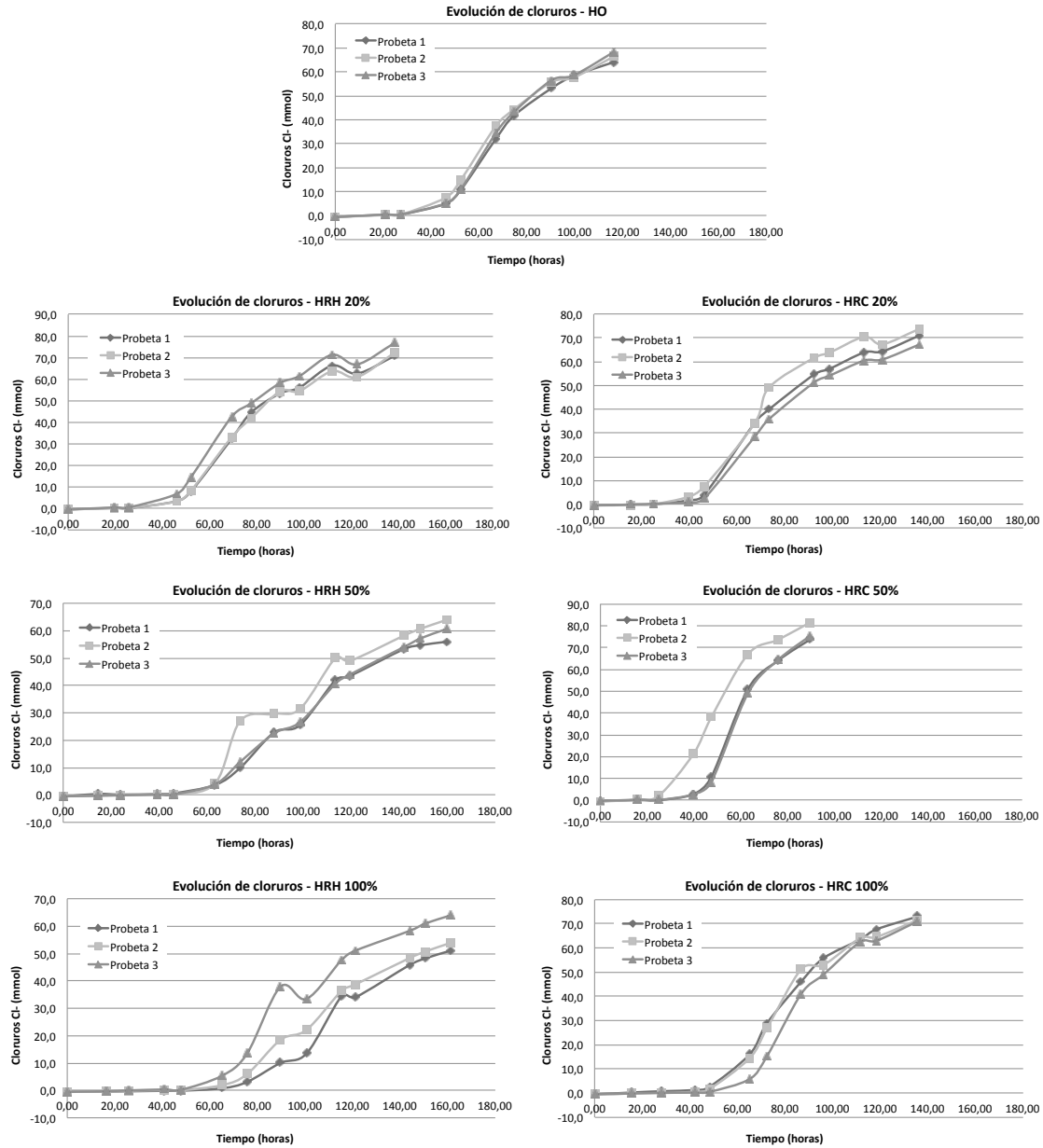


Figura 5.47. Curvas de evolución de la difusión de los cloruros en los hormigones producidos

5.3.3.2 Penetración de Cloruros – Método AASTHO T259:2002

Para la realización de este ensayo se han utilizado cuatro probetas cilíndricas de dimensiones de 150 mm de diámetro y 75 mm de altura para cada tipo de hormigón analizado, siendo que una es utilizada como referencia y no ha sido sometida a la exposición de cloruros.

Debido a la limitada disponibilidad de material, este estudio se ha restringido al análisis de los hormigones con 0, 20 y 100% de árido reciclado, tanto para los hormigones HRH como para los hormigones HRC.

La preparación de las probetas ha comprendido en las siguientes etapas:

- Inicialmente, a los 14 días de edad, las probetas de hormigón de 150 x 200 mm reservadas para la realización de este ensayo han sido retiradas de la cámara de curado;
- A partir de estas probetas, y con el auxilio de una maquina de corte, se han retirado las probetas cilíndricas de dimensiones de cerca de 15 mm de diámetro y 75 mm de altura utilizadas en el ensayo;
- Ya cortadas e identificadas, las muestras han sido llevadas a una cámara de secado donde han permanecido por más 14 días en condiciones climáticas controladas;
- Al cabo de este periodo de secado, se ha instalado una barrera cilíndrica hecha de plástico rígido de 19 mm de altura, diámetro externo de 150 mm y 3 mm de grosor en el topo de cada probeta, pegada con silicona ácida translúcida e impermeable;
- Los conjuntos de probeta y barrera han sido llevados de nuevo a la cámara de secado, donde han permanecido otros 14 días.

Después de todo ese proceso preparatorio descrito, se ha iniciado la exposición unidireccional de las probetas a cloruros, con excepción de las probetas de referencia. Se ha añadido una solución de 3% de cloruro de sodio en la parte superior de cada probeta protegido por la barrera, de volumen suficiente para alcanzar la altura de 13 mm a partir de la probeta, conforme indica la figura 5.48(a). Para evitar la evaporación de la solución, se han utilizado películas de PVC de laboratorio para tapar la parte superior de las barreras.

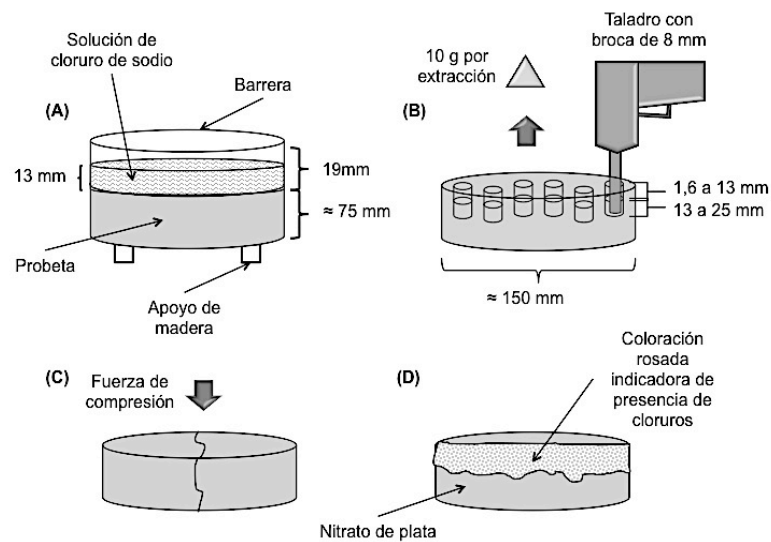


Figura 5.48. Dibujo esquemático del ensayo de penetración de cloruros – Método ASTHO T259:2002

El conjunto de probeta, barrera y solución ha permanecido en la cámara de secado por más de 90 días. Al largo de este periodo, el nivel de la solución ha sido controlado y mantenido constante, se añadiendo más solución siempre que se considerara necesario.

Después de los 90 días de exposición, se han retirado la solución y la barrera de cada probeta. Las caras de las probetas sometidas a la solución han sido secadas y limpiadas con el objetivo de sacar la sal cristalizada acumulada en este periodo. Las probetas han sido acondicionadas en bolsas plásticas con auto cierre en un congelador hasta el día de la extracción de las muestras para análisis del contenido de cloruros. Este procedimiento ha sido adoptado con el objetivo de parar la percolación de la solución de cloruros de sodio existente en las probetas.

Finalmente, con el auxilio de un taladro, se han extraído 2 muestras de 10 gramos de hormigón por probeta en dos profundidades distintas (0 a 13 mm y 13 a 25 mm) para la realización del análisis del contenido de cloruros, conforme indica la figura 5.48(b). El valor medio obtenido entre los valores identificados para estas dos medidas corresponde al valor de contenido de cloruros de cada hormigón a la profundidad de 13 mm para la edad del ensayo.

Los valores medios obtenidos se presentan en la tabla 5.7 y en la figura 5.49.

Los resultados indican que los contenidos de cloruros presentados por los hormigones HRC tienden a ser mayores que los presentados por el hormigón HO. Tanto para las medidas obtenidas en la profundidad de 0 a 13 mm como para las obtenidas entre 13 y 25 mm, la cantidad de cloruros de los hormigones HRC tiene la tendencia a aumentar a medida que se incrementa el contenido de árido reciclado.

Por otro lado, todas las muestras de los hormigones reciclados HRH han presentado valores de contenido de cloruros similares al hormigón HO. La cantidad de árido reciclado AH utilizado en la producción del hormigón parece no generar influencia en el contenido de cloruros. Los valores tienden a presentarse estables independiente del contenido de árido reciclado AH utilizado en la producción del hormigón, sea para las medidas obtenidas en la profundidad de 0 a 13 mm, sea para las obtenidas entre 13 y 25 mm.

Tabla 5.7. Contenido de cloruros (% peso de hormigón) obtenido en todas las muestras ensayadas

Tipo de Hormigón	Tipo de muestra	Medida		Valor medio a 13 mm
		0-13 mm	13-25 mm	
HO	Referencia (sin solución de cloruros)	<0,01	<0,01	<0,01
	Sometida a la solución de cloruros	0,20	0,18	0,19
HRH 20%	Referencia (sin solución de cloruros)	0,01	0,04	0,03
	Sometida a la solución de cloruros	0,22	0,18	0,20
HRH 100%	Referencia (sin solución de cloruros)	<0,01	<0,01	<0,01
	Sometida a la solución de cloruros	0,20	0,19	0,19
HRC 20%	Referencia (sin solución de cloruros)	0,02	0,01	0,02
	Sometida a la solución de cloruros	0,24	0,19	0,21
HRC 100%	Referencia (sin solución de cloruros)	0,03	0,02	0,03
	Sometida a la solución de cloruros	0,26	0,24	0,25

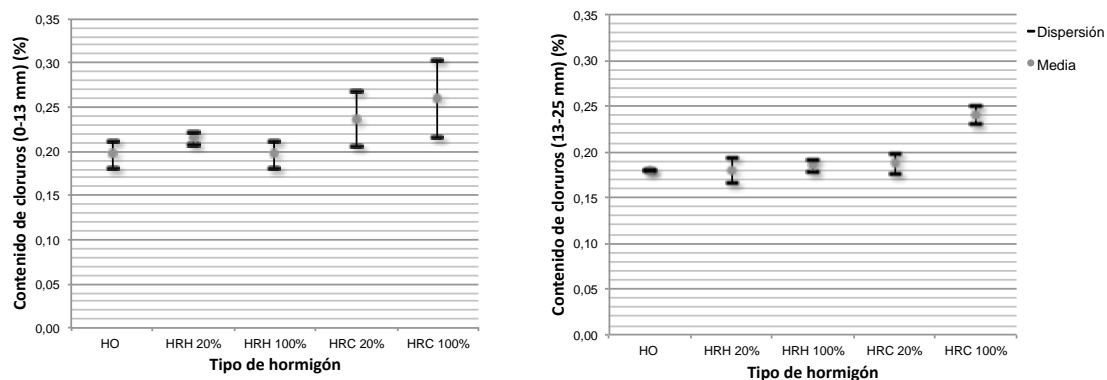


Figura 5.49. Valores medios y rango de dispersión del contenido de cloruros obtenido en las profundidades de 0-13 y 13-25 mm en las muestras sometidas a la solución de cloruros (%)

Con el objetivo de analizar el perfil de la penetración de los cloruros, al final de la extracción, las probetas han sido rotas por compresión. La cara de la rotura de cada probeta ha sido sometida a una solución de nitrato de plata para identificar hasta que profundidad se ha penetrado la solución de cloruro (figura 5.48(c) y figura 5.48(d)).

Los resultados de los perfiles marcados con el nitrato de plata se presentan en la tabla 5.8 y en la figura 5.50.

Tabla 5.8. Profundidades medias y máximas de penetración de cloruros identificadas por aplicación de nitrato de plata

Muestra	Zona de Lectura	Profundidades medidas					Profundidad media	Profundidad máxima	
		D1	D2	D3	D4	D5			
HO	1	14,91	49,8	41,65	42,8	52,35	41,7	45,66	52,33
	2	15,12	46,55	52,2	57,5	51,8	53,1	52,23	57,48
	3	15,08	54,2	56,65	54,2	55,3	56,1	55,29	56,55
	4 (ref)	14,825	0	0	0	0	0	0	0
HRC 20%	1	15	61,85	56,75	58,5	61	54,4	58,5	61,85
	2	14,9	48,8	50,5	49,4	50,5	48,5	49,54	50,5
	3	14,92	52,5	61,75	58,55	61,25	54,8	57,77	61,75
	4 (ref)	14,955	0	0	0	0	0	0	0
HRC 100%	1	14,94	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1
	2	14,93	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1
	3	15,03	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4
	4 (ref)	14,81	0	0	0	0	0	0	0
HRH 20%	1	14,92	61,65	61,65	54,15	57,1	53,3	57,57	61,65
	2	14,87	45,3	58	58	56,3	54,6	54,44	58
	3	15,11	46,8	51,8	55	58,7	58,5	54,16	58,7
	4 (ref)	14,935	0	0	0	0	0	0	0
HRH 100%	1	14,99	47,1	48,4	45,66	55,7	56,3	50,632	56,3
	2	15,08	45,8	56,7	52,2	50,8	51,6	51,42	56,7
	3	15,05	33,1	49,1	55,3	56,65	51,4	49,11	56,65
	4 (ref)	14,9	0	0	0	0	0	0	0

Aunque este método no es recomendado para proporcionar una medida cuantitativa de la profundidad de penetración de cloruros de las probetas ensayadas, el ensayo nos ha permitido realizar un análisis comparativo de la resistencia de las probetas a la penetración de ion de cloruro, en función de las variaciones en la cantidad de árido reciclado empleada en cada tipo de hormigón analizado.

Tal como se espera, ninguna probeta de referencia ha presentado señales de presencia de cloruros. Por otra parte, las profundidades de penetración registradas para las probetas sometidas a la exposición de cloruros indican coherencia con los valores de contenido de cloruros indicados en la tabla 5.7.

Al analizar los gráficos presentados en la figura 5.50, se percibe que los hormigones HRH20%, HRH100%, HRC20% han presentado valores de profundidad de penetración media y máxima similares a las presentadas por el hormigón HO, mientras que los hormigones HRC100% han presentado profundidades superiores a las presentadas por el hormigón de referencia.

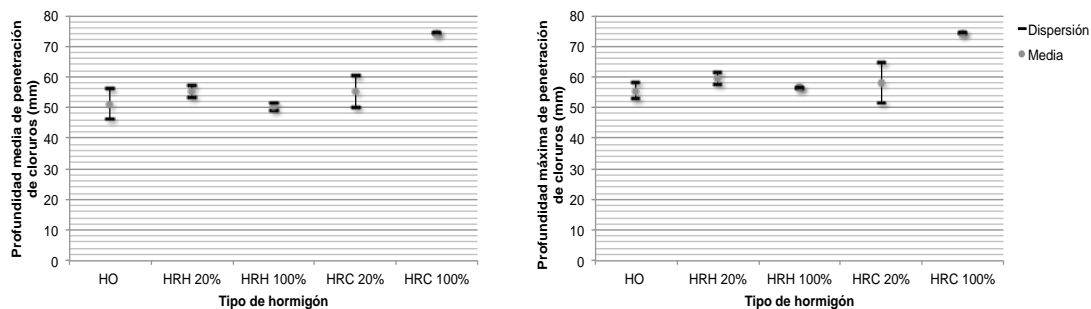


Figura 5.50. Media y rango de variación de las profundidades medias y máximas de penetración de cloruros obtenidas por tipo de hormigón analizado (%)

Por fin, se ha obtenido el coeficiente de difusión de cloruros empleando dos metodologías de previsión de vida útil que se basan en la ecuación de la segunda ley de difusión de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (5.3)$$

Debe hacerse hincapié en que la segunda ley de difusión de Fick ha sido desarrollada para un sistema semi-infinito y unidimensional. En su concepto, esta ley considera que el hormigón es homogéneo y isótropo. Además no prevé la existencia de reacciones entre el hormigón y los cloruros. Se considera únicamente el mecanismo de transporte por difusión. Y, por fin, considera que el coeficiente de difusión y la concentración superficial de cloruros son constantes a lo largo del tiempo y completamente independientes.

Los métodos escogidos han sido la metodología indicada por Helene (1997) y la metodología indicada en el anejo 9 de la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE, 2008).

El modelo indicado por Helene (1997) se basa en la siguiente solución de la ecuación diferencial de la segunda ley de Fick:

$$C_{(x,t)} = C_i + (C_s - C_i)(1 - erf(z)) \quad (5.4)$$

$$z = \frac{x}{2\sqrt{D_{efCl}t}} \quad (5.5)$$

$C_{(x,t)}$ = Concentración de cloruros en la profundidad x y en el tiempo t

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón

$erf(z)$ = Función del error de Gauss

x = Profundidad en la cual se realiza la medición de cloruros

D_{efCl} = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros en el hormigón

t = Tiempo de exposición del hormigón a cloruros

En consecuencia, el modelo indicado por Helene (1997) plantea la aplicación directa de las siguientes formulas y tabla:

$$x = 2(z)\sqrt{D_{efCl}t} \quad (5.6)$$

$$erf(z) = 1 - \frac{C_{x,t} - C_i}{C_s - C_i} \quad (5.7)$$

$$erf(z) = \frac{C_s - 0,30}{C_s - 0,20} \quad (5.8)$$

x = Recubrimiento del hormigón (cm)

D_{efCl} = Coeficiente efectivo de difusión ($cm^2/año$)

t = tiempo de iniciación (años)

z = valor de la función del error de Gauss (Tabla 5.9)

$C_{x,t}$ = Concentración dos cloruros en la profundidad x, en el tiempo t (% en peso del cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón (% en peso del cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (% en peso del cemento)

$erf(z)$ = Función del error de Gauss

Tabla 5.9. Valores de z por la aplicación de la función del error de Gauss

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0,00	0	0,4	0,4284	1,2	0,9103
0,01	0,0113	0,45	0,4755	1,3	0,9340
0,05	0,0564	0,5	0,5205	1,4	0,9523
0,10	0,1125	0,6	0,6039	1,5	0,9661
0,15	0,1680	0,7	0,6778	1,6	0,9763
0,2	0,2227	0,8	0,7421	1,7	0,9838
0,25	0,2763	0,9	0,7969	1,8	0,9891
0,3	0,3286	1	0,8427	1,9	0,9928
0,35	0,3794	1,1	0,8802	2	0,9953

Por otra parte, el modelo propuesto por la EHE (2008) propone la siguiente formula, derivada de la resolución de la ecuación diferencial de la segunda ley de Fick:

$$\frac{C_{cr} - C_i}{C_s - C_i} = 1 - \frac{x}{\sqrt{12D_{efCl}t}} \quad (5.9)$$

C_{cr} = Concentración crítica dos cloruros (% en peso de cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (% en peso de cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón

x = Profundidad (mm)

D_{efCl} = Coeficiente efectivo de difusión (cm^2/s)

t = Tiempo (años)

Como resultado, el modelo indicado por la EHE (2008) permite que el cálculo del coeficiente de difusión de cloruros se realice a través de las siguientes formulas:

$$t = \left(\frac{x}{K_{Cl}} \right)^2 \quad (5.10)$$

K_{Cl} = Coeficiente de penetración de cloruros

t = Tiempo (años)

x = Recubrimiento del hormigón (mm)

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D_{t_{Cl}}} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{cr} - C_i}{C_s - C_i}} \right) \quad (5.11)$$

K_{Cl} = Coeficiente de penetración de cloruros ($mm/año^{0,5}$)

α = Conversor de unidad igual a 56157

$D_{t_{Cl}}$ = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros para la edad t_{Cl} (cm^2/s)

C_{cr} = Concentración crítica dos cloruros (% en peso de cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (% en peso de cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón (% en peso de cemento)

A efecto de cálculo, en ambos los casos, la concentración de cloruros en análisis ha correspondido al valor del contenido de cloruros obtenido a la profundidad de 13 mm, determinado mediante el cálculo del valor medio obtenido entre las muestras de 0-13 mm y 13-25 mm (tabla 5.7).

Como consecuencia, la profundidad adoptada (x) ha sido de 13 mm, mientras el tiempo de análisis considerado (t) ha sido de 104 días, ya que este ha sido el periodo durante el ensayo en que las muestras han sido sometidas a algún tipo de hidratación, sea por curado o por la exposición a la solución de cloruros.

Por otra parte, según clasificación de la EHE (2008), las condiciones de ensayo indican que las muestras han sido sometidas a la clase de seguridad IV (instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino). En ese contexto, se ha considerado una concentración superficial de cloruros equivalente a 0,5% en peso de hormigón, conforme recomienda esta misma norma. La concentración inicial de cloruros adoptada en todos los casos ha sido de 0,05% en peso de cemento del hormigón.

Las variables de cálculo utilizadas para cada método se presentan en la tabla 5.10. Todos los valores de contenido de cloruros utilizados en los cálculos han sido expresados en porcentaje de la cuantía de cemento del hormigón, según su densidad.

Tabla 5.10. Variables adoptadas y calculadas para el calculo del coeficiente de difusión de cloruros según los resultados del ensayo ASTHO T259:2002

Variable	Unidad	Tipo de hormigón				
		HO	HRH 20%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 100%
x	cm	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
t	años	0,2847	0,2847	0,2847	0,2847	0,2847
Densidad	Kg/m ³	2530	2544	2494	2494	2372
C _{x,t}	% cemento	1,73	1,83	1,73	1,92	2,16
C _s	% cemento	4,60	4,63	4,54	4,54	4,31
C _i	% cemento	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Los resultados de coeficiente de difusión de cloruros obtenidos mediante el método de Helene (1997), D_{HELENE}, y el método de la EHE (2008), D_{EHE}, se presentan en la figura 5.51.

Los resultados indican valores y comportamiento similares en ambos métodos de cálculo. Mientras los hormigones HRH presentan valores de coeficiente similares al hormigón de referencia HO, los hormigones HRC presentan valores superiores. Se observa que el coeficiente de difusión de cloruros tiende a incrementarse a medida que el hormigón presenta una mayor cantidad de árido reciclado AC.

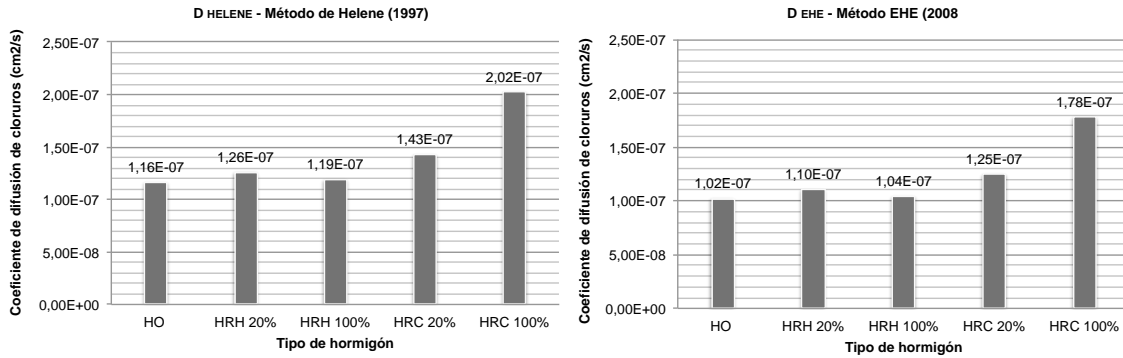


Figura 5.51. Coeficientes de difusión de cloruros de los hormigones obtenidos a partir de los resultados del ensayo AASTHO T259:2002 (D_{HELENE} y D_{EHE})

El método indicado por Helene (1997) se presenta más conservador pues genera valores de coeficiente de difusión superiores a los presentados por el método EHE (2008). Sin embargo, la correlación entre los resultados obtenidos para dos métodos adoptados es comprobada en la figura 5.52.

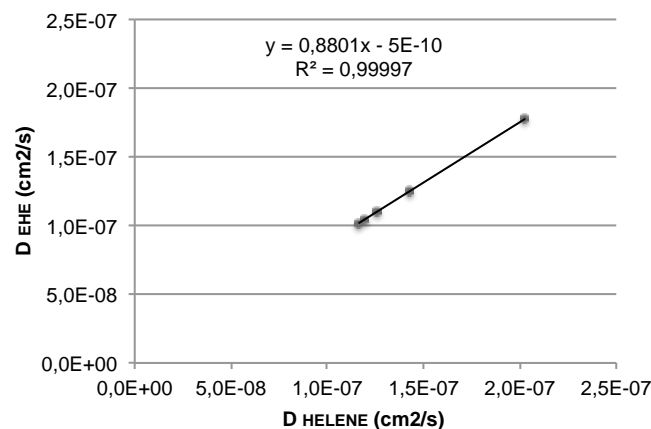


Figura 5.52. Correlación entre los valores de coeficiente de difusión D_{HELENE} y D_{EHE}

5.3.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dentro del contexto de la durabilidad e impacto ambiental de un hormigón, después del deterioro mecánico, la presencia de agua es uno de los principales factores que influyen la degradación de los hormigones. Con la entrada del agua en el hormigón desde la superficie mojada, ésta circula por dentro del elemento a través de los poros, transportando a su vez las sustancias agresivas disueltas existentes en el medio.

En términos generales, los resultados discutidos en el punto 5.2 confirman el comportamiento de los hormigones reciclados, ya indicado en la bibliografía existente. De acuerdo con el estado de conocimiento de áridos reciclados para hormigón estructural, presentado por el Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado” (ACHE, 2006), varios autores (Barra, 1996; Collins, 1998; González, 2002) presentan resultados que indican un aumento del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados cuando son comparados con los hormigones convencionales. Los resultados presentan incrementos de la absorción con valores entre 15% y 70% y son variables en función de la porosidad del árido reciclado y del porcentaje de sustitución. Además, otros estudios (Wainwright y col., 1994), indican que el incremento de la porosidad es mucho más relevante si se utilizan fracciones recicladas finas en las sustituciones.

Sin embargo, es importante destacar que la absorción y la porosidad de un hormigón no tienen relación con la facilidad por la cual un fluido pueda penetrar en su estructura (Neville, 1997).

La porosidad de un hormigón, sea elevada o no, solo afectará las propiedades de durabilidad e impacto ambiental de este elemento si los poros existentes estén conectados de tal modo que permitan la permeabilidad de los agentes agresivos. La definición de porosidad vinculada a la durabilidad del hormigón es la relación en tanto por ciento entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la muestra de hormigón.

Por eso, en este caso solo se debe considerar la porosidad accesible al agua, y no la porosidad total, ya que es ella la que tiene influencia en el ingreso de sustancias agresivas en el hormigón.

De acuerdo con la EHE (2008), la impermeabilidad de una estructura porosa de hormigón puede ser comprobada experimentalmente mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE EN 12390-8:2001. Este ensayo, sin embargo, analiza el transporte de líquidos en el hormigón bajo una presión impulsadora que raramente es evidenciada en la realidad (Neville, 1997).

En ese contexto, los análisis realizados para verificar la permeabilidad de agentes agresivos al hormigón se han enfocado en la evaluación directa de las propiedades de absorción por capilaridad, del frente de carbonatación y de la difusión de cloruros.

El plan experimental realizado en este trabajo ha permitido el análisis en conjunto de esas propiedades. Este análisis ha permitido:

- tener un conocimiento general y complementario de los principales mecanismos de transporte de agentes agresivos existentes en el interior de un hormigón reciclado;
- identificar la posible influencia que los áridos reciclados, tanto de hormigón como de carácter mixto, ejercen en un hormigón cuando son utilizados en su fabricación.

Al analizar los resultados de **absorción capilar**, se parte de la premisa que la fuerza impulsora del movimiento del agua en el interior del hormigón puede ser motivado por el gradiente de presión generado por la diferencia de presiones hidrostáticas, por el efecto de tensiones capilares u otras situaciones similares.

El ensayo realizado en este estudio consistió en poner una muestra de hormigón seco en contacto con agua, produciendo un gradiente de presión entre el exterior y el interior y una absorción capilar que condujo el líquido desde las partes más húmedas hacia las más secas. En este caso, las características del líquido (viscosidad, densidad y tensión superficial) y las características del hormigón (permeabilidad, estructura de poros y energía superficial) son los parámetros de influencia en el proceso. En especial, la permeabilidad del material.

En términos generales, tanto los hormigones HRH como los HRC presentan un incremento de la succión capilar en comparación al hormigón HO.

Según Neville (1997), aunque el árido no necesariamente tenga influencia directa en la absorción capilar de un hormigón, un árido con baja permeabilidad puede contribuir para la reducción del área efectiva del flujo del agua.

Por consiguiente, la posible alta permeabilidad de los áridos cerámicos puede haber contribuido para incrementar de la permeabilidad de los hormigones HRC y, en consecuencia, aumentar el área efectiva del flujo de agua en comparación a las mezclas HO y HRH.

A pesar de que esta última afirmación debiera ser corroborada con un análisis detallado de la permeabilidad del árido cerámico propiamente dicho, la misma se basa en el comportamiento del hormigón HRC 20% observado en el ensayo de carbonatación. El análisis del perfil de las probetas sometidas al frente de carbonatación indican puntos carbonatados más acentuados en las mezclas HRC 20% en áreas donde hay la presencia de áridos reciclados cerámicos (figura 5.43).

Se podría afirmar que la mayor capacidad de absorción capilar de los hormigones HRC se debe a la estructura de poros presentadas por esas mezclas, que, a mayor contenido de árido reciclado AC, presentan una mayor cantidad de poros capilares pequeños (entre 3 y 4 μm).

La permeabilidad bajo presión es directamente proporcional al diámetro de los poros capilares. Cuanto mayor el diámetro, mayor será la permeabilidad. Por otro lado, estructuras más compactas, con poros capilares más estrechos contribuyen para una mayor absorción capilar, ya que las fuerzas de succión capilar se incrementan con la reducción del diámetro de los poros (Casado, 1997).

Además, producir una estructura más compacta, aunque represente tener poros que favorezcan el aumento de las fuerzas capilares, siempre proporcionará que el hormigón presente menos porosidad capilar y interconexión entre los poros que una estructura menos compacta (Casado, 1997).

La correlación entre las propiedades de absorción capilar y resistencia tanto de los hormigones HRH como de los hormigones HRC es comprobada en la figura 5.53.

Como la permeabilidad de un hormigón es esencialmente controlada por la pasta de cemento hidratada, la relación existente entre la permeabilidad y la estructura de poros de un hormigón es cualitativa y directamente vinculada a su resistencia.

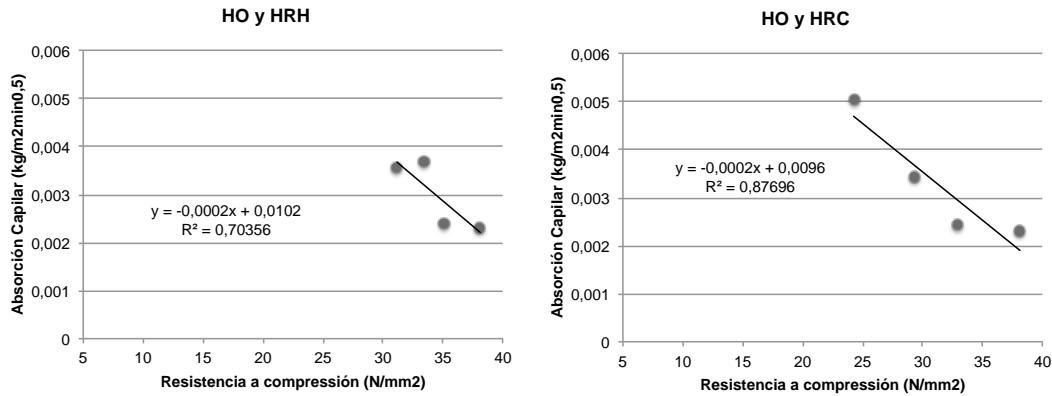


Figura 5.53. Correlación entre las propiedades de absorción capilar y resistencia a compresión de los hormigones estudiados

Respecto a los resultados del ensayo de **carbonatación**, se asume que el curado de las muestras, el contenido de humedad y la temperatura del ambiente han sido equivalentes para los tres tipos de mezclas analizadas. A modo comparativo, por lo tanto, estos aspectos no han sido considerados.

Durante el periodo de realización del ensayo no se ha observado la disminución progresiva de la velocidad de carbonatación. Las condiciones del ambiente pueden haber influenciado en el proceso, ya que la humedad óptima del ambiente (entre 50 y 80%) ha sido mantenida en la mayor parte del tiempo solo durante los primeros 60 días de ensayo y entre el 150° y el 300° día.

Conforme es indicado en la figura 5.41, el proceso de carbonatación ocurrió mas rápidamente en las muestras de hormigón HRH 20% (el frente de carbonatación apareció de modo relevante a partir del 90° día del ensayo). Los hormigones HO y HRC 20% solo presentan valores de profundidad media de carbonatación relevantes a partir del 300° y del 180° día de ensayo, respectivamente (figuras 5.40 y 5.42).

Los valores de profundidad media de carbonatación evidenciado para las mezclas HO y HRH 20% en el 360° día de ensayo son similares, mientras los valores de profundidad máxima son mayores para la mezcla HRH 20%.

Como la estructura de poros evidenciada en la mezcla HO es prácticamente similar a la presentada por la mezcla HRH 20%, se supone que la obtención de un valor similar de profundidad media de carbonatación al final del ensayo sea coherente.

Por otro lado, como el frente de carbonatación de la mezcla HRH 20% ocurrió de forma irregular, se cree que la mayor porosidad existente en la zona de transición de los áridos reciclados de hormigón puede haber contribuido para que el CO₂ haya avanzado localmente a partir de esta zona. Se supone que por el mismo motivo, el proceso de carbonatación de la mezcla HRH 20% ocurrió mas rápidamente que en las demás mezclas.

En contrapartida, es importante destacar que la presencia del mortero adherido también puede haber incrementado el contenido de elementos alcalinos carbonatados en los hormigones reciclados

HRH. Por consiguiente, este incremento en la reserva alcalina del hormigón puede haber provocado una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación en momento posterior.

La mayor velocidad y los altos valores de profundidad de carbonatación identificados en la mezcla HRC 20% en comparación a las demás mezclas se debe a:

- La estructura de poros de la mezcla HRC 20%, que presenta una mayor cantidad de poros capilares y una mayor conectividad de poros que las demás mezclas;
- La presencia de árido cerámicos. El frente de carbonatación evidenciado en todas las muestras analizadas ocurrió de forma irregular, principalmente en los puntos donde se ha identificado la presencia de elementos cerámicos.

Debido a las restricciones presentadas por el ensayo de carbonatación, que se limita al análisis de los hormigones HO, HRH 20% y HRC 20%, no ha sido posible realizar correlaciones por tipo de hormigón reciclado.

Para la realización de correlaciones entre propiedades, se ha considerado los resultados obtenidos en conjunto. Como resultado, se observa que el proceso de carbonatación de estas mezclas está vinculado a su porosidad por intrusión de mercurio, resistencia y módulo de elasticidad (figura 5.54).

Estas correlaciones ya eran esperadas. Según Neville (1997), la capacidad de difusión de la pasta de cemento hidratada es el principal factor de influencia en la carbonatación de un hormigón. Como el proceso de difusión está vinculado al sistema de poros de la pasta de cemento, se concluye que el tipo de cemento empleado, la relación agua/cemento y el grado de hidratación influyen el proceso de carbonatación. En consecuencia, la resistencia del hormigón puede ser relacionada al proceso de carbonatación, ya que esos factores también tienen fuerte influencia sobre esta propiedad.

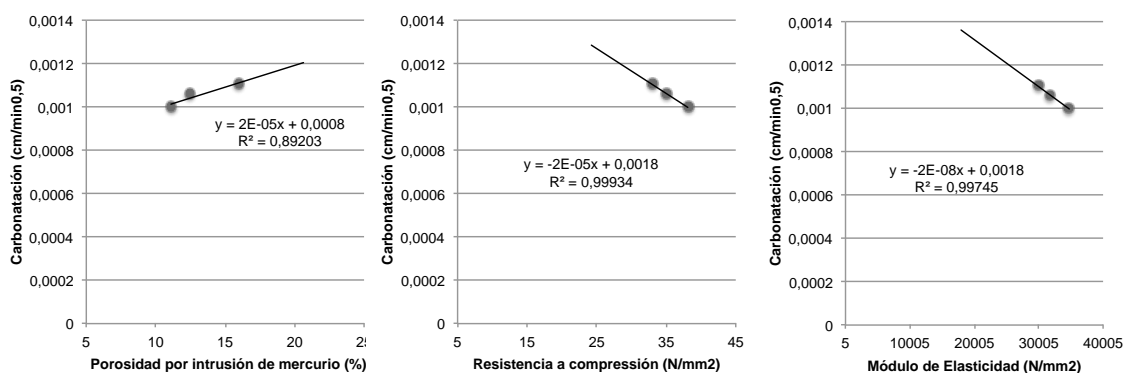


Figura 5.54. Correlación entre el coeficiente de carbonatación y la porosidad (MIP), resistencia a compresión y módulo de elasticidad de los hormigones estudiados

También se observa que los valores de coeficiente de carbonatación están correlacionados a los valores de coeficiente de absorción capilar y de difusión de cloruros según método de ensayo AASTHO T 259:2002 (figuras 5.55 y 5.56, respectivamente).

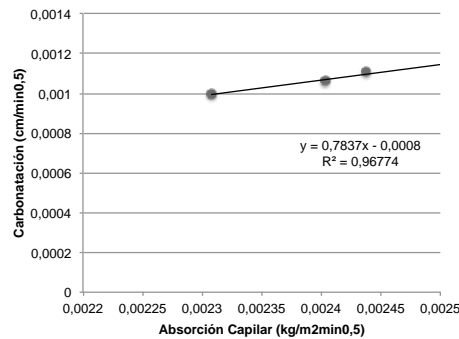


Figura 5.55. Correlación entre el coeficiente de carbonatación y de absorción capilar de los hormigones estudiados

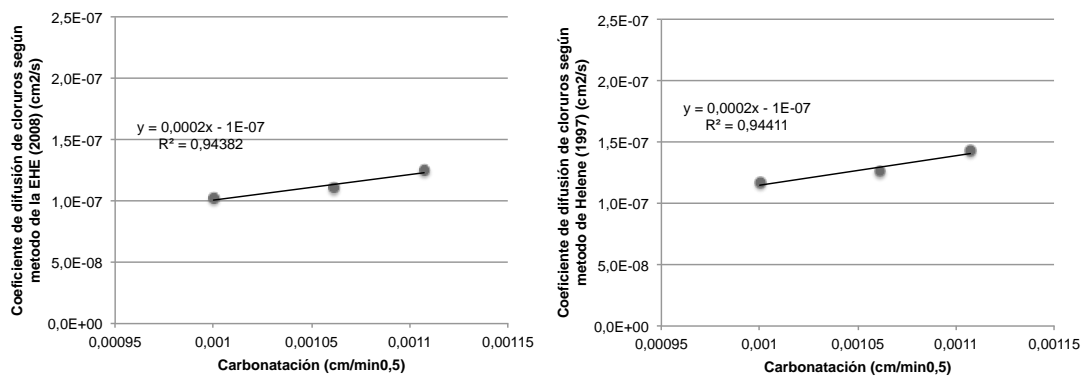


Figura 5.56. Correlación entre el coeficiente de carbonatación y de difusión de cloruros (AASTHO T259:2002) de los hormigones estudiados

De tal manera que otra afirmación teórica también es confirmada entre los resultados presentados. La capacidad de difusión del hormigón es directamente proporcional a su permeabilidad intrínseca. Y, en teoría, el coeficiente de permeabilidad intrínseca de un hormigón, sea de un líquido o de un gas, siempre es el mismo (Neville, 1997).

Es importante resaltar que los puntos irregulares del frente de carbonatación identificados en las mezclas HRH 20% y HRC 20% han sido considerados en el cálculo del coeficiente de carbonatación. Por tal motivo, los valores obtenidos están claramente correlacionados con las demás propiedades citadas anteriormente.

En lo que se refiere al análisis de la **difusión de cloruros** en los hormigones estudiados, el plan experimental propuesto comprendió en la realización de dos tipos de ensayo, uno según el proyecto de norma prUNE 83987:2007 y otro según la norma AASTHO T 259:2002.

Los principales aspectos que afectan el ingreso de los iones cloruros en el hormigón son su sistema de poros (distribución, tamaño y conectividad) y la composición de su pasta de cemento (por fijación de los cloruros).

De acuerdo con Cascudo (1997), en general, el transporte de cloruros en el interior de un hormigón ocurren por absorción capilar y difusión iónica:

- **Absorción capilar:** La absorción de soluciones ricas en iones cloruro ocurre en la camada superficial del hormigón. Depende principalmente de la porosidad de la superficie y de las características del líquido, como viscosidad y tensión superficial. La absorción capilar depende de la interconexión de los poros y, sobretodo, de su diámetro, ya que las fuerzas de succión capilar son mayores si los diámetros de los poros capilares son menores;
- **Difusión iónica:** Ocurre en el interior del hormigón, cuando existen diferencias en las concentraciones de cloruros, sea entre el medio externo y el interior del hormigón, sea dentro del propio hormigón. Estas diferencias promueven el movimiento de iones en busca del equilibrio. En el caso que exista una interconexión entre los poros capilares y el electrolito, la difusión iónica tendrá un papel más significativo respecto a la durabilidad, que la permeabilidad.

Se observa que la permeabilidad del hormigón es determinante tanto para la absorción como la difusión. Como la permeabilidad está relacionada con la interconexión de los poros, este aspecto tiene fundamental importancia en el transporte iónico de estas sustancias (Cascudo, 1997).

Los resultados obtenidos según el proyecto de norma prUNE 83987:2007 han sido descartados debido a la gran dispersión de los resultados. Teniendo en cuenta que las dimensiones de la probeta tienen grande influencia en este ensayo, se cree que el uso de muestras con espesor inferior a 20 mm puede haber contribuido a la falta de representatividad de esas probetas sobre la microestructura de poros de los hormigones reciclados, y, en consecuencia, a la variabilidad de los resultados obtenidos.

Se debe resaltar que el uso de espesores inferiores a 20 mm es permitido por el proyecto de norma utilizado en la época de realización del ensayo. No obstante, la norma definitiva, publicada en momento posterior a la realización de esos ensayos, confirma la importancia del uso de un espesor mínimo de 20 mm para las probetas en análisis.

Por otra parte, el ensayo realizado de acuerdo la norma AASTHO T259:2002 ha generado resultados de coeficiente de difusión de cloruros considerados válidos.

Según los resultados presentados para las mezclas HRH, no se identifica una tendencia a reducción o incremento de este coeficiente en función del mayor o menor contenido de árido reciclado AH.

Como el coeficiente de difusión esta relacionado a la estructura y conectividad de poros, se asume que la mayor porosidad de los áridos reciclados AH en comparación al árido natural no necesariamente ha representado una mayor permeabilidad de los hormigones HRH.

Por un lado, se asume que la presencia de elementos asfálticos en el árido AH no ha hecho daño al hormigón HRH respecto a esta propiedad y incluso puede haber contribuido para mejorarla.

Por el otro, al considerar la posible fijación de cloruros con las fases del cemento, se puede afirmar que la presencia de aluminato cálcico en el cemento que compone el mortero adherido de los áridos AH puede haber influenciado en este comportamiento. La posible formación de mono cloroaluminatos de calcio hidratados puede haber contribuido para la disminución del contenido de cloruro libre en el hormigón.

Por último, los cloruros también pueden haber sido retenidos por fijación física, debido a la presencia de silicato de calcio hidratado (CSH) en el mortero adherido.

Estas afirmaciones se corroboran por el resultado presentado por la mezcla HRH 20%, que a pesar de presentar un sistema de poros similar al hormigón HO, presenta un contenido de cloruros similar al presentado tanto por el hormigón HO como por el hormigón HRH 100%.

Respecto a las mezclas HRC, se observa que los coeficientes aumentan a medida que se aumenta el contenido de árido reciclado AC. Las mezclas HRC han presentado una tendencia a presentar un mayor contenido y una mayor profundidad de penetración de cloruros a medida que se aumenta el contenido de árido reciclado en el hormigón.

Se puede observar la influencia directa de la estructura de poros de las mezclas HRC en esos resultados. La mayor porosidad de esas mezclas ejerce una influencia significativa en su permeabilidad y en sus coeficientes de difusión. Las mezclas HRC 100%, en especial, presentan los mayores coeficientes de difusión entre todas las mezclas. Su distribución de poros indica la presencia de una gran cantidad de poros entre 3-4 μm , que claramente puede significar una mayor permeabilidad de esos hormigones.

Por otro lado, se resalta que los coeficientes de difusión identificados de la mezcla HRC 20% también son superiores al presentado por el hormigón HO, aún que la diferencia entre la distribución de poros de las mezclas HO y HRC 20% sea más sutil.

El incremento de la difusión, en el caso de las mezclas HRC 20% puede ser justificado físicamente por la presencia de una mayor cantidad de poros entre 0,05 y 0,1 μm en esta mezcla con respecto a las mezclas HO (figura 5.17).

Además, el resultado presentado por la mezcla HRC 20% indica que reacciones de orden química también han contribuido para la liberación de iones cloruros y el consecuente aumento del coeficiente de difusión de las mezclas HRC en el general. Estas reacciones pueden deberse tanto a la existencia de iones sulfatos en el hormigón provenientes del árido AC (formación de aluminato cálcico hidratado) como a la carbonatación ya existente en puntos del árido AC (descomposición del cloro aluminato cálcico hidratado).

Sin embargo, se cree que las reacciones de orden física son las más relevantes en el proceso de difusión de cloruros en las mezclas HRC.

La figura 5.57 indica la correlación entre los resultados de coeficiente de difusión de las mezclas HO y HRC (obtenidos a partir del método de la EHE (2008) según la norma AASHTO T 259:2002), y

sus respectivos resultados de porosidad total por intrusión por mercurio y de coeficiente de absorción capilar.

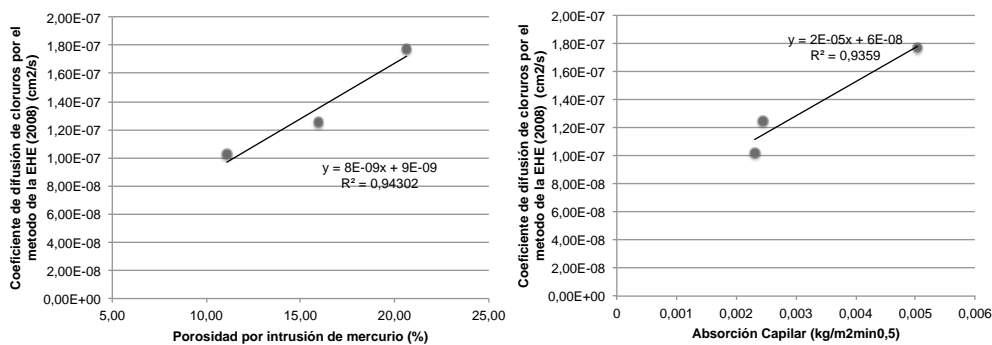


Figura 5.57. Correlación entre el coeficiente de difusión de cloruros (AASTHO T 259 :2002) y la porosidad por intrusión por mercurio y el coeficiente de absorción capilar de los hormigones HO y HRC

Las correlaciones establecidas entre esos valores confirman una vez más la importancia de la microestructura de los poros en el ingreso de ión cloruros de estas mezclas.

5.4 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POR LIXIVIACIÓN

5.4.1 ANÁLISIS DEL MATERIAL GRANULAR

En esta etapa, se ha analizado el impacto ambiental por lixiviación de los áridos reciclados AH y AC. Se considera en primer lugar los áridos en montón y sometidos a la lluvia y a la intemperie. En estas condiciones consideramos a los áridos como materiales no consolidados. Los áridos reciclados tienen poros y en consecuencia puede haber una cierta difusión durante la acción del agua, sin embargo, el mecanismo predominante será la percolación.

El ensayo llamado de columna en su versión EN TS 14405, es el recomendado por el Comité Europeo TC 351. Este ensayo, sin embargo, carece aún de valores límite para la situación española y sus suelos. El Proyecto GEAR, desarrollado por la UPC en las facetas de lixiviación, (Barra y col., 2011) aplica el ensayo de conformidad UNE EN 12457-4:2003 como solución transitoria hasta que la administración española adopte valores límites para el ensayo de columna.

El procedimiento adoptado, tanto de preparación de las muestras como de lixiviación y caracterización del material, ha seguido las especificaciones descritas en la norma UNE EN 12457-4:2003.

Para la preparación de las muestras, se ha utilizado una muestra representativa de 2 kg de cada material. Se ha realizado la reducción del tamaño de partícula de los áridos para la obtención de

muestras representativas finales con 95% de los granos de tamaño inferior a 10 mm, conforme indica la norma.

A continuación, se ha determinado el índice de masa seca de cada material (D_R): con una parte separada de cada muestra, se ha determinado su masa húmeda (M_W) y su masa seca (M_D) a $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ y se ha calculado el índice requerido a través de la fórmula $D_R = 100 \times (M_D / M_W)$. Con el restante de cada muestra, se ha separado una muestra representativa final húmeda con $0,09 \pm 0,005$ kg de masa seca, denominada de muestra de prueba.

Cada muestra de prueba ha sido colocada en una botella plástica donde se ha adicionado el líquido lixivante en una relación líquido/ sólido de 10 l/kg $\pm 2\%$. La garantía de la buena relación líquido y sólido ha sido establecida a través de las siguientes ecuaciones:

$$L = \left(10 - \frac{M_C}{100}\right) \times M_D \quad (5.12)$$

$$M_C = 100 \times \left(\frac{M_W - M_D}{M_D}\right) \quad (5.13)$$

L = Líquido lixivante (l)

M_C = Índice de humedad (%)

M_D = Masa seca de la muestra de prueba (kg)

Cada botella, debidamente preparada y tapada, ha sido instalada en el aparato de agitación (figura 5.58).



Figura 5.58. Equipo de agitación utilizado para realización de los ensayos según UNE EN 12457-4:2003

También se ha preparado una botella como muestra de referencia conteniendo 0,95 l de líquido lixivante

Todas las botellas, incluyendo la de referencia, han sido sometidas al proceso de agitación por $24 \pm 0,5$ horas. Durante el proceso se ha evitado el excesivo asentamiento de sólidos en las botellas con material y su excesiva abrasión generada por la reducción del tamaño de las partículas.

A continuación, se ha realizado la extracción del líquido lixiviado de cada botella. Para el proceso de extracción, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Permitir el asentamiento de las partículas por 15 ± 5 minutos;
- Filtrar la solución por una membrana de filtro (este procedimiento ha sido realizado para todas las muestras con excepción de la muestra de referencia);
- Medir el volumen de la solución filtrada (V_E);
- Separar dos sub muestras de cada lixiviado: una para realizar el análisis químico por espectrómetro de emisión por plasma acoplada inductivamente (ICP) y otra para el análisis por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC);
- Mensurar y registrar la conductividad, temperatura y pH de cada sub muestra de lixiviado extraída.

Se ha utilizado el espectrómetro de emisión por plasma acoplada inductivamente (ICP) para determinar algunos elementos principales, secundarios y cationes (Ba, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn) y algunos elementos que, bajo ciertas condiciones, generan oxiones (As, Cr, Mo, Sb y Se). La presencia de los aniones Cl^- , $SO_4^{=+}$ y F^- fue identificada por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

El análisis ha proporcionado los valores de concentración de cada elemento en el lixiviado en mg/l. Los resultados finales se expresan en mg/kg de masa seca, de modo a considerar la cantidad del elemento lixiviado en relación al total de masa de la muestra utilizada.

Los valores obtenidos han sido comparados a los valores límite para los residuos admisibles en vertederos indicados por la Decisión del Consejo 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

Los resultados para el árido AC han indicado una cantidad importante de sulfatos lixiviados, superior al límite indicado por la norma UNE EN 12457-4:2003. Además, han sido lixiviados Ba, Cr, Cu, Mo, Pb y Zn, en cantidades no relevantes. Para las muestras de árido AH no se ha identificado ningún elemento lixiviado en cantidad superior a los límites exigidos por la normativa. Solo se ha identificado la lixiviación de Ba y Zn en cantidades no relevantes.

Debido a estos resultados, adicionalmente, para fines comparativos, se ha analizado muestras del árido AC sometidas a proceso de lavado, denominadas en este estudio de ACL. Este nuevo ensayo se ha sido realizado con una muestra del material en las mismas condiciones presentadas por la muestra anterior. La única diferencia ha sido la de añadir el proceso de lavado y secado del material preparado, en momento anterior a la realización del proceso de lixiviación. El objetivo ha sido analizar si un proceso de lavado en planta tiene condiciones de reducir posibles problemas relacionados con lixiviación de estos elementos.

La Tabla 5.11 presenta la media de los resultados obtenidos para todas las muestras analizadas.

Tabla 5.11. Elementos lixiviados en mg/kg – Ensayo UNE EN 12457-4:2003

Elemento		Límite normativo (mg/kg)	Cantidad lixiviada (mg/kg)					
Nombre	Símbolo		AH		AC		ACL	
			Blanco	Árido	Blanco	Árido	Blanco	Árido
Cloruro	Cl-	800,00	<5,000	<5,000	<5,000	365,32	<5,000	<5,000
Fluoruro	F-	10,00	<5,000	<5,000	<5,000	<5,000	<5,000	<5,000
Sulfato	SO ²⁻	1000,00	<5,000	<5,000	<5,000	6888,73	<5,000	<5,000
Arsénico	As	0,50	<0,02	0,0025	<0,02	<0,02	<0,02	0,001
Bario	Ba	20,00	0,0625	0,778	<0,2	0,306	0,1075	0,057
Cadmio	Cd	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo	Cr	0,50	<0,1	<0,1	<0,1	0,2475	<0,1	0,028
Cobre	Cu	2,00	<0,1	0,0305	<0,1	0,1605	<0,1	<0,1
Mercurio	Hg	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Molibdeno	Mo	0,50	<0,02	0,0025	<0,02	0,0515	<0,02	0,004
Níquel	Ni	0,40	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Plomo	Pb	0,50	<0,01	0,0055	<0,01	0,0235	0,001	0,0035
Antimonio	Sb	0,06	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Selenio	Se	0,10	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Zinc	Zn	4,00	0,0735	0,809	<0,1	0,773	0,131	0,048

Las celdas en blanco indican cuales elementos no se han detectado en el ensayo. Las celdas en gris oscuro y en gris claro indican los elementos lixiviados que se han presentando por debajo de los límites establecidos por la norma, en más o menos relevancia, respectivamente. En negro, se destaca la cantidad de sulfatos de la muestra AC, que ha sido el único valor que ha presentado superior a los límites exigidos por la normativa.

Los valores de pH del lixiviado de todas las muestras han variado entre 8,0 y 11,0, mientras que la conductividad ha presentado valores en el rango de 450 y 965 µS/cm.

Los resultados de la muestra ACL indican un descenso de todos los valores de lixiviados identificados en el ensayo realizado con la muestra sin lavar. Además, todos los lixiviados identificados han presentados valores inferiores a la norma, incluyendo el lixiviado de sulfatos.

En las figuras 5.59 y 5.60, se puede verificar claramente tanto la no existencia de contaminantes en el árido AH como la influencia relevante que el proceso de lavado ha generado en la disminución de elementos lixiviados en el árido AC.

Con el proceso de lavado, los valores lixiviados de Ba, Cr y Zn de la muestra AC se han reducido al mínimo, mientras que la presencia de lixiviados de Cl⁻, SO²⁻, Cu, Mo y Pb no es detectada.

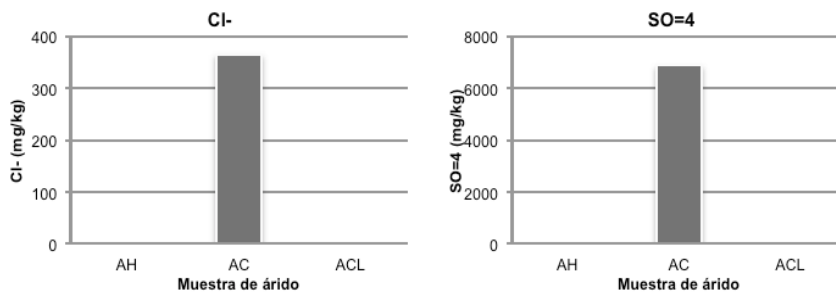


Figura 5.59. Valores de emisiones de Cl⁻ y SO⁼⁴ de las muestras de árido reciclado

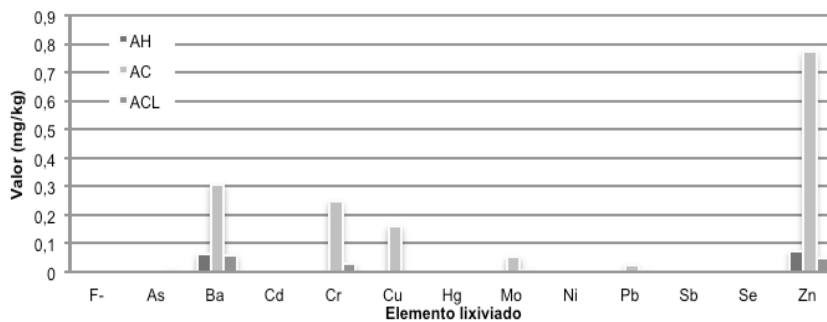


Figura 5.60. Valores de emisiones de los demás elementos analizados de las muestras de árido reciclado

5.4.2 ANÁLISIS DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS: ENSAYO MONOLÍTICO

En esta etapa, se ha escogido el ensayo de difusión NEN 7345:1995 para analizar la capacidad lixiviante de los hormigones. Este ensayo es comúnmente utilizado en los Países Bajos para evaluar la lixiviación de materiales de construcción consolidados. Permite estudiar la lixiviación del hormigón en condiciones reales de uso. La elección de esta metodología se basa en la larga experiencia existente con ella.

En el plan de análisis de impacto ambiental propuesto en este trabajo, se parte de la premisa que la realización de este ensayo de caracterización solo es necesaria cuando el material reciclado utilizado en su producción no cumple con las exigencias indicadas por la normativa en el ensayo de cumplimiento EN 12457-4:2003.

En el procedimiento de ensayo, se ha utilizado probetas cilíndricas de 35 mm de altura y 100 mm de diámetro. El volumen (l), el área de la superficie (m²) y la masa (kg) de cada probeta han sido registrado.

Cada probeta ha sido alocada en un compartimiento individual lleno de agua acidificada a un pH de 4. Antes del inicio del ensayo, cada compartimiento ha sido higienizado con ácido nítrico (1 mol/l) y, a continuación, enjuagado varias veces con agua acidificada.

La cantidad de agua adicionada a cada compartimiento correspondió a un volumen de cinco veces el volumen de cada probeta. Las dimensiones del compartimiento han permitido que el nivel del agua estuviera en más de 5 cm por encima de cada probeta.

Las probetas han sido apoyadas en una reja plástica para permitir que el contacto con el agua ocurra por todos los lados y el compartimiento ha sido sellado con una película plástica para evitar la evaporación del líquido (figura 5.61).

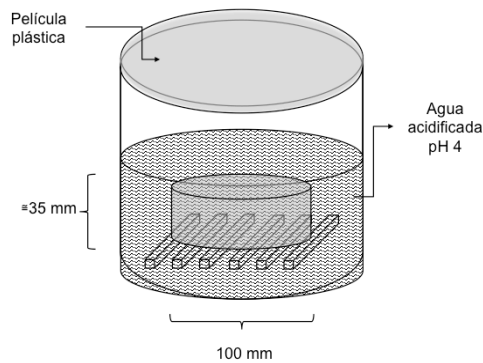


Figura 5.61. Esquema de instalación del ensayo NEN 7345

Se ha mantenido las probetas en estas condiciones durante 64 días. En este tiempo se ha realizado 8 extracciones / renovaciones del lixiviado en los periodos determinados de 0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16; 36 y 64 días.

Para cada proceso de extracción, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Separar dos sub muestras de cada lixiviado: una para realizar el análisis químico por espectrómetro de emisión por plasma acoplada inductivamente (ICP) y otra para el análisis por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC);
- Mensurar y registrar el pH y la conductividad de cada sub muestra de lixiviado extraída;
- Acidificar la sub muestra destinada al análisis por ICP con ácido nítrico (pH = 2);
- Renovar el agua acidificada del compartimiento y registrar el tiempo exacto de la renovación.

Cada extracción ha sido analizada individualmente. El cálculo de la cantidad de cada componente lixiviado ha sido realizado separadamente para cada periodo, según la siguiente ecuación.

$$E_i^* = \frac{(c_i - c_o) \times V}{1000 \times A} \tag{5.14}$$

E_i^* = Emisión lixiviada de un determinado componente en el periodo i (mg/m^2)

c_i = Concentración de cada componente en el periodo i ($\mu\text{g}/\text{l}$)

c_o = Concentración de cada componente medido en el control ($\mu\text{g}/\text{l}$)

V = Volumen del líquido extraído (l)

A = Área de la superficie de la probeta (m^2)

La determinación de los valores de emisiones acumuladas de cada componente para el periodo total de realización del ensayo se ha realizado según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_i^* = \sum_{i=1}^n (E_i^*) \quad (5.15)$$

ε_i^* = Emisión lixiviada acumulada de un determinado componente en el periodo total n (mg/m²)

E_i^* = Emisión lixiviada de un determinado componente en el periodo i (mg/m²)

n = Cantidad de periodos analizados, igual a 8

Según los resultados, tanto los hormigones HO como los hormigones HRC 20% han lixiviado Ba, Cu, Pb, V, Zn y SO⁻⁴. Los hormigones HRC 50%, por otro lado, además de presentar lixiviados de Ba, Cu, Pb, V, Zn y SO⁻⁴, han lixiviado Cl. Ya los hormigones HRC 100% han lixiviado Ba, V, Zn, Cl y SO⁻⁴ pero no han lixiviado Cu y Pb.

La tabla 5.12 presenta los valores medidos de emisiones acumuladas al final de los 64 días de ensayo de los componentes lixiviados por las mezclas en análisis y los límites de emisión establecidos para la norma NEN 7345:1995 por el Build Materials Decree (1995).

Tabla 5.12. Valores de emisiones acumuladas por componente lixiviado

Elemento		Cantidad lixiviada (mg/m ²)				Límite normativo (mg/m ²)	
Nombre	Símbolo	HO	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%	U ₁	U ₂
Bario	Ba	5,20	4,45	8,11	7,49	600,00	4500,00
Cobre	Cu	1,72	1,02	1,93	*	50,00	350,00
Plomo	Pb	0,11	0,11	0,11	*	100,00	800,00
Vanadio	V	3,20	3,14	3,98	4,51	250,00	1500,00
Zinc	Zn	1,22	1,06	1,07	0,75	200,00	1500,00
Cloruro	Cl	0,00	0,00	192,85	244,07	20000,00	150000,00
Sulfato	SO ⁻⁴	1.896,59	2.389,70	2.813,13	3.786,57	25000,00	200000,00

* No se ha identificado este elemento en el lixiviado. La cantidad lixiviada, si existente, se presenta abajo del límite de detección del equipo de análisis.

Todos los valores de emisión acumulada obtenidos se han presentado dentro de los límites indicados por la normativa, indicando que los hormigones en análisis pueden ser utilizados sin cualquiera restricción de carácter ambiental.

La figura 5.62 presenta los registros de control del pH y de la conductividad del lixiviado, bien como los valores de emisiones medidos por elemento identificado para cada extracción realizada.

Los valores de pH del lixiviado se han mantenido entre 10,6 y 11,6 para todas las muestras y indican un ambiente alcalino durante todo el ensayo (figuras 5.62a). La conductividad, inicialmente registrada en el rango de 115 a 135 μS/cm, se ha incrementado progresivamente a valores entre

390 y 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Aunque que crece ligeramente con el tiempo, los resultados de conductividad indican una escasa presencia iónica (figuras 5.62b).

De un modo general, se ha observado que cuanto mayor es el porcentaje de árido grueso reciclado, mayor es la lixiviación de Ba, V, Cl⁻ y SO⁼⁴:

- Mientras las emisiones de Ba de los hormigones HO y HRC se presentan a partir de la 7^a extracción, los hormigones HRC 50% y HRC 100% presentan lixiviados de Ba a partir de la 6^a y 5^a extracción, respectivamente. Los valores de lixiviado acumulados varían entre 5,2 y 4,5 mg/m^2 para los hormigones HO y HRC 20%, y entre 8,1 y 7,5 mg/m^2 para los hormigones HRC 50% y HRC 100%, respectivamente (figuras 5.62c);
- Las emisiones de V se presentan a partir de la 5^a o 6^a extracción para todos los tipos de hormigón. Los valores de lixiviado acumulados son de cerca de 3 mg/m^2 para los hormigones HO y HRC 20%, y entre 4,0 y 4,5 mg/m^2 para los hormigones HRC 50% y HRC 100%, respectivamente (figuras 5.62f);
- Solo se identifican las emisiones de Cl⁻ para los hormigones HRC 50% y HRC 100%. Este elemento es identificado ya desde la 1^a extracción para ambas las mezclas. Los valores de lixiviado acumulados son de 54,7 mg/m^2 para el hormigón HRC 50% y de 36,6 mg/m^2 para el hormigón HRC 100% (figuras 5.62h);
- Las emisiones de SO⁼⁴ se identifican a partir de la 1^a extracción para todas las mezclas. Los valores de lixiviado acumulados de las mezclas varían entre 1800 y 3800 mg/m^2 . Los valores son más bajos para las mezclas sin árido reciclado, y tienden a aumentar gradualmente a medida que las mezclas presentan mayor contenido de árido reciclado (figuras 5.62i).

En cambio, las emisiones de Cu, Pb y Zn tienden a no existir o disminuir en las muestras hechas con 100% de árido grueso reciclado AC:

- Las emisiones de Cu de los hormigones HO, HRC 20% y HRC 50% solo se identifican entre la 1^a y la 2^a extracción. Los valores de lixiviado acumulados varían entre 1,0 y 2,0 mg/m^2 . El hormigón HRC 100% no lixivía este elemento (figuras 5.62d).
- Un comportamiento similar es identificado para las emisiones de Pb. Los hormigones HO, HRC 20% y HRC 50% solo lixivian Pb en la 1^a y en la 2^a extracción. Los valores de lixiviado acumulados de los tres tipos de hormigón equivalen a 0,1 mg/m^2 . El hormigón HRC 100% no lixivía este elemento (figuras 5.62e).
- Las emisiones de Zn de los hormigones HO, HRC 20% y HRC 50% se identifican a partir de la 1^a extracción, mientras que para los hormigones HRC 100%, el lixiviado solo presenta Zn a partir de la 3^a extracción. Los valores de lixiviado acumulados de los hormigones HO, HRC 20% y HRC 50% varían entre 1,0 y 1,2 mg/m^2 , mientras que para los hormigones HRC 100% los valores son de 0,75 mg/m^2 (figuras 5.62g).

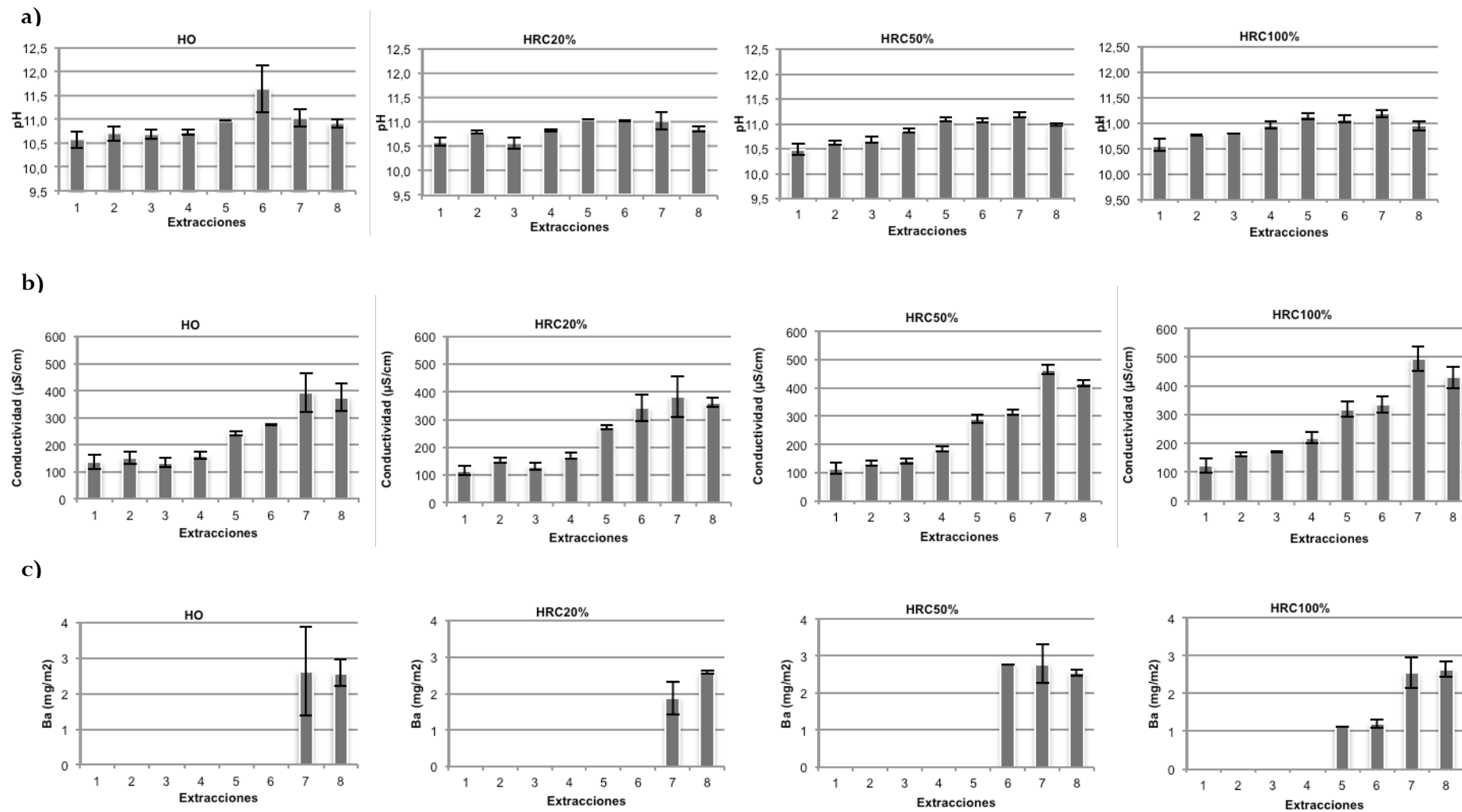


Figura 5.62. Resultados de lixiviación – NEN 7345:1995

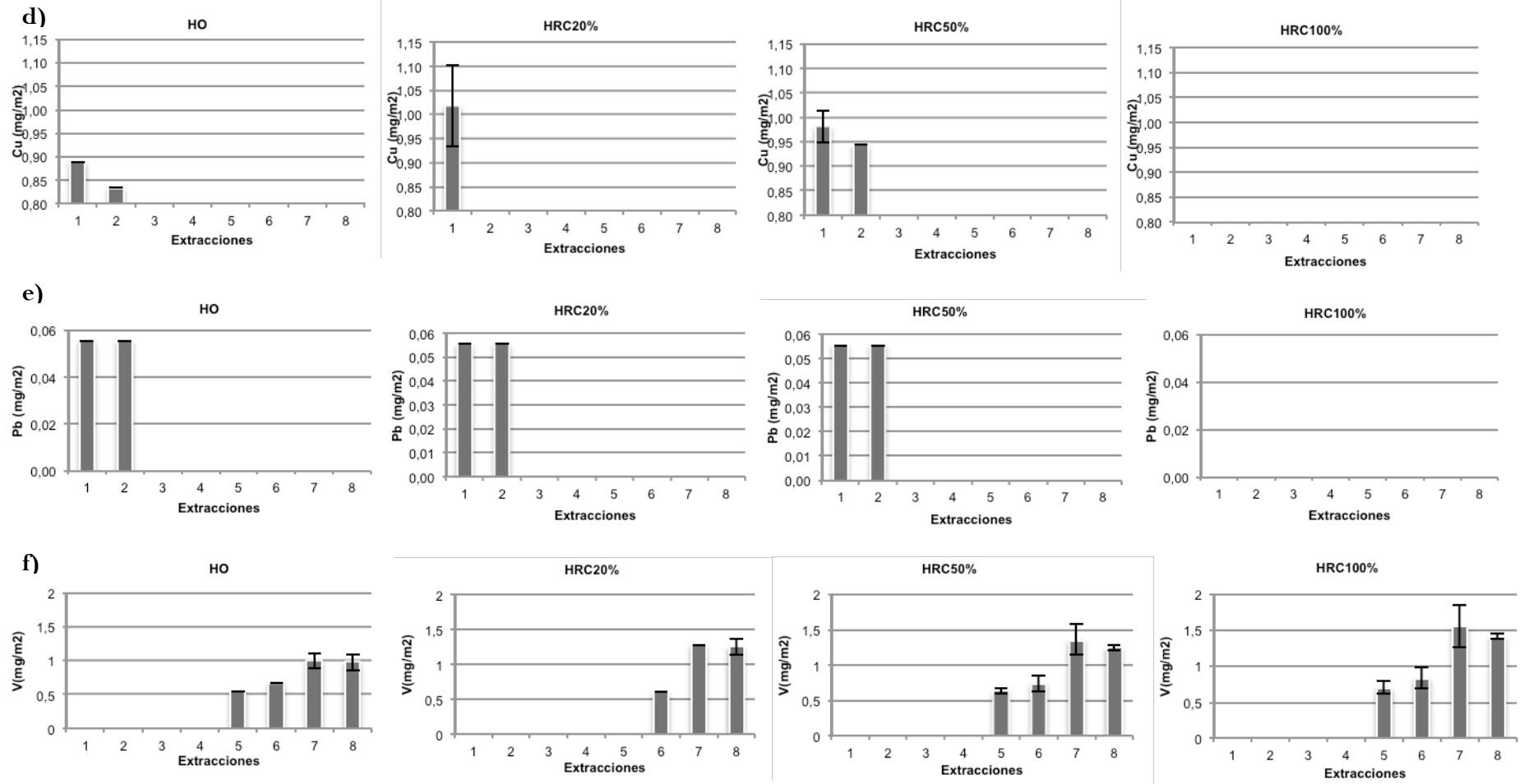
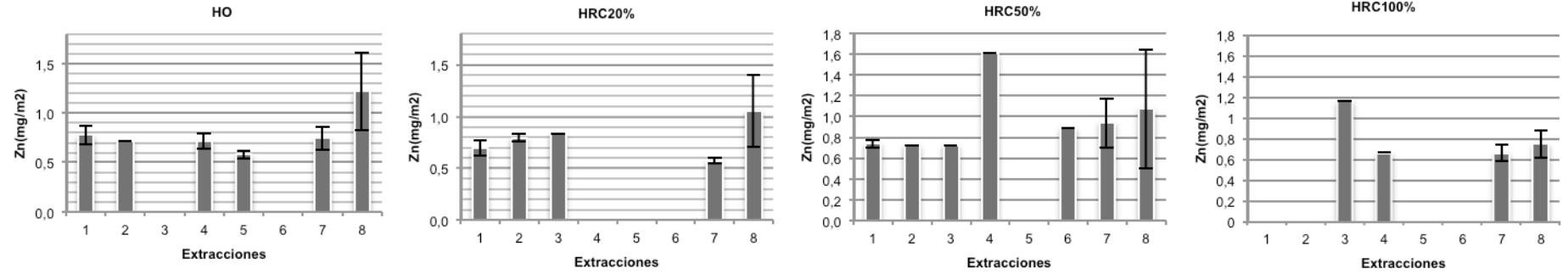
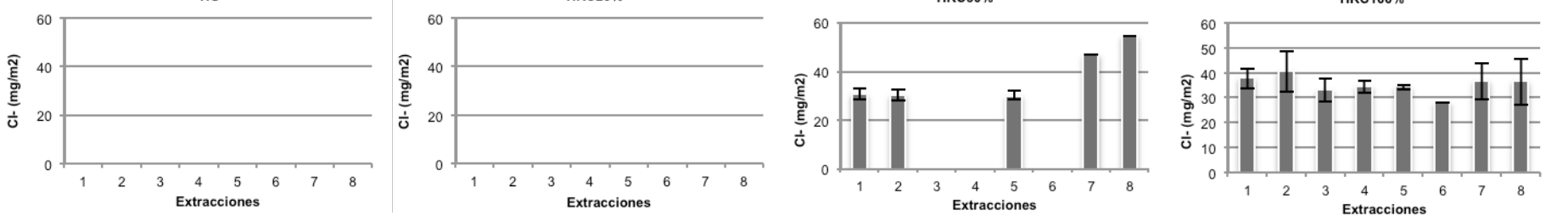


Figura 5.62. Resultados de lixiviación – NEN 7345:1995 (continuación)

g)



h)



i)

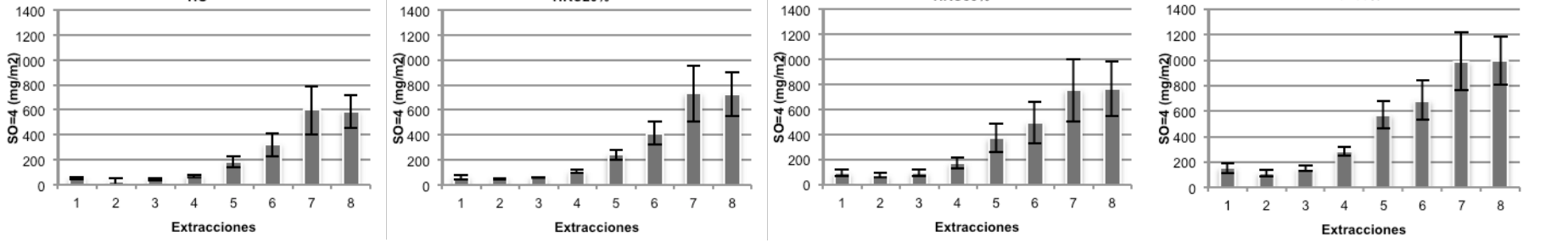


Figura 5.62. Resultados de lixiviación – NEN 7345:1995 (continuación)

5.4.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El ensayo EN 12457-4:2003 se basa en condiciones de equilibrio químico antes de la determinación de los componentes repartidos entre las fases sólida y líquida. Parte de la premisa que las condiciones de equilibrio o cerca del equilibrio se alcanzan entre estas dos fases durante el periodo de realización del ensayo. Las propiedades del lixiviado se miden a través de métodos de análisis del agua adaptados a los criterios de análisis de lixiviados (ENV 12506, ENV 13370 y otros).

La correcta interpretación de los datos de este tipo de prueba debe considerar la comprensión de los procesos fundamentales de lixiviación, que dependen de la especiación de los elementos de la solución y la fase sólida. Los procesos de lixiviación promueven la división de especies químicas entre el sólido y la fase acuosa, y que a menudo pueden ser descritos por procesos como el intercambio iónico / complejos de absorción, precipitación / disolución y su incorporación en una fase mineral (Dijkstra y col., 2004 citado por Engelsen y col., 2010).

Por lo tanto, el análisis de resultados de ensayos en estas condiciones debe considerar principalmente el pH de la suspensión y la relación líquido a sólido. Se percibe que las suspensiones de los áridos reciclados AC y ACL son menos alcalinas que las de los áridos AH (alrededor de 8,0 para las muestras AC y ACL y alrededor de 11,0 para las muestras AH). La relación L/S es de 10 l/kg.

Según Engelsen y col. (2010) a medida que el pH desciende por debajo del pH neutro, todas las fases hidratadas del hormigón se desestabilizan y los metales absorbidos o incorporados en estas fases se movilizan. Cuando el pH se incrementa por encima del pH neutro, la lixiviación de elementos como Cr y Mo es mayor en muestras no carbonatadas. La lixiviación de SO_4^{2-} , por su parte, se reducen en ambientes altamente alcalinos (pH mayor que 10).

En ese contexto, la fuerte naturaleza alcalina de los elementos de hormigón que componen tanto los áridos AH como los AC y los diferentes grados de carbonatación que estos áridos puedan presentar deben ser considerados en el análisis de la lixiviación de esos materiales.

Considerando los resultados obtenidos, se observa que el componente SO_4^{2-} de la muestra AC ha sido el único componente lixiviado en cantidades importantes y superiores a la normativa. El proceso de lavado y posterior análisis de este material (muestra ACL) indica que la relevante presencia de sulfatos en el lixiviado de los áridos AC se debe al lavado superficial de impurezas, como el mortero y yeso. El proceso de lavado también ha influenciado en la reducción de los valores lixiviados de Ba, Cr, Zn, Cl⁻, Cu, Mo y Pb.

Por otra parte, el ensayo NEN 7345:1995, que ha sido aplicado para el análisis de los hormigones HO y HRC, se basa en condiciones de equilibrio tanto físico como sólido (equilibrio líquido-sólido y transferencia de masa). Según Van der Slot y col. (2006), este ensayo tiene gran relevancia para aplicación en los materiales con carácter monolítico (materiales duraderos). Entre sus ventajas están las de permitir:

- Identificar el control de solubilidad frente a la posible lixiviación dinámica;

- Aislar los efectos de lixiviación por lavado;
- Cuantificar los parámetros de lixiviación intrínseca;
- Proporcionar una base para la modelización del transporte/reacción;
- Proyectar el comportamiento a largo plazo.

Se admite que el principal mecanismo de control de la lixiviación de los hormigones HO y HRC es la difusión.

Todos los resultados de emisiones acumulativas obtenidos para estos dos tipos de hormigón se presentan por debajo de los límites máximos exigidos por el Build Materials Decree.

Se asume que el medio de estabilización / solidificación creado por el cemento Portland ha contribuido para que el alto contenido de sulfatos existente en los áridos AC no produjera emisiones de sulfatos en los hormigones HRC superiores a los límites exigidos por la norma.

Se considera que los hormigones HRC presentan sulfatos provenientes de:

- impurezas del árido AC, como mortero y yeso;
- sulfatos procedentes de las arcillas originales de los elementos cerámicos que componen el árido AC y que provocan eflorescencia (en menor cantidad);
- sulfatos hidratados formados en la pasta de cemento hidratada, como etringita.

El ambiente altamente alcalino de la estructura de un hormigón contribuye para esta estabilización / solidificación del medio ya que promueve la inmovilización de los mecanismos químicos producidos por el cemento hidratado: precipitación de hidratos insolubles, adsorción iónica interna de la superficie de hidrato de C-H-S en la pasta de cemento hidratado, incorporación iónica de algunos compuestos del cemento hidratado a la red cristalina, en especial la sustitución iónica de calcio y sulfatos en el hidrato de etringita, retención física en la estructura de poros (Valls y Vázquez, 2002).

En la figura 5.63 se presentan los gráficos en escala logarítmica de los valores calculados de emisiones acumulativas para cada componente lixiviado en función del tiempo.

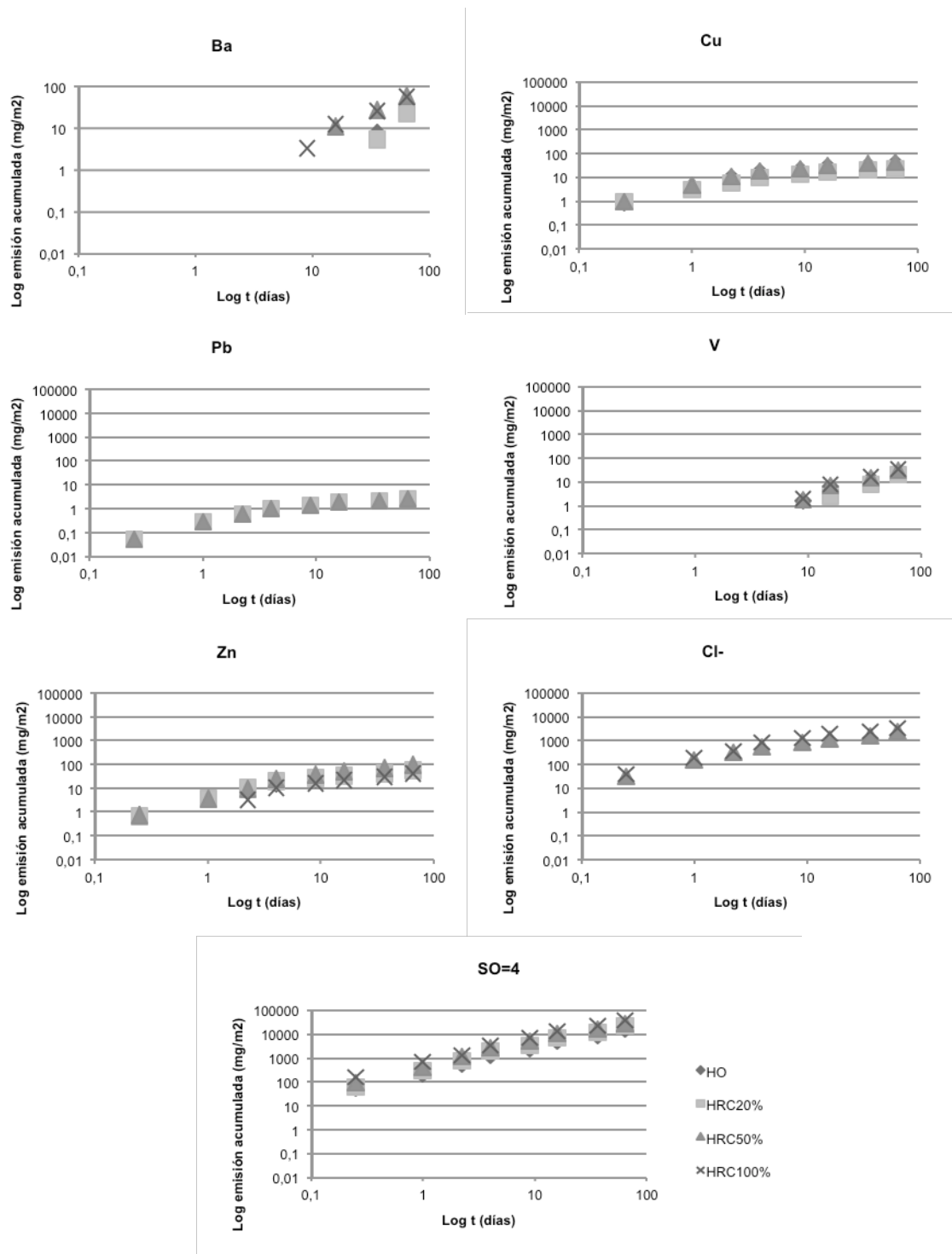


Figura 5.63. Valores calculados de emisiones acumulativas en función del tiempo de cada componente lixiviado en los hormigones estudiados

5.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El hormigón, reciclado o no, es una estructura heterogénea y compleja. Por lo que en su análisis, es fundamental tener en consideración las tres fases existentes en su estructura (matriz, áridos y zona de transición).

De un modo general, los hormigones reciclados con hasta 20% de árido reciclado en su composición, sea de árido grueso reciclado AH sea de árido grueso reciclado AC, han presentado características similares al hormigón de referencia producido con 100% de árido grueso natural.

Esto corrobora las exigencias de la normativa española actual, que permite el uso de hasta 20% de áridos reciclados para la producción de hormigones. Es importante destacar, sin embargo, que los áridos reciclados utilizados en el estudio no cumplen los requisitos exigidos por la norma ya que presentan elementos asfálticos (árido AH) y cerámicos (árido AC) en su composición.

A la vista de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas obtenidos, la viabilidad de uso estructural de los hormigones con bajo contenido de áridos reciclados es inicialmente confirmada:

- Los **hormigones HRH 20% y HRH 50%** han presentados valores de densidad, absorción, porosidad en agua y por intrusión de mercurio y retracción por secado similares al hormigón de referencia. Los valores de resistencia y de módulo de elasticidad, por otro lado, han sido inferiores al presentado por el hormigón HO, aunque, en todos los casos, la resistencia a compresión se ha presentado superior al 25 mega pascales, que la EHE (2008) especifica para tal;
- Al mismo tiempo, los **hormigones HRH 100%** también han presentados valores de densidad, absorción y porosidad en agua similares al hormigón de referencia HO. Los valores de resistencia y del módulo de elasticidad de estas mezclas se han presentado superiores al valor de 25 mega pascales que la EHE (2008) especifica, aunque inferiores al presentado por el hormigón HO y los demás hormigones HRH. Por otra parte, las propiedades de retracción por secado y porosidad por intrusión de mercurio han indicado que el uso de una cantidad de 100% de árido reciclado AH puede haber representado una reducción en la calidad física y mecánica del material:
 - La retracción por secado de los hormigones HRH 100% ha sido superior a la retracción ocurrida en los hormigones de referencia HO para los dos métodos de laboratorio realizados;
 - La porosidad por intrusión de mercurio de los hormigones HRH 100% también se ha presentado superior a las porosidades presentadas por el hormigón de referencia HO y por los demás hormigones HRH. La curva de distribución de poros de los hormigones HRH 100% indican que el uso de una cantidad relevante de árido reciclado AH produce una cantidad mayor de macro poros y meso poros estrechos de diámetros entre 0,06 y 0,07 μm en comparación a los hormigones HRH con menor contenido de árido reciclado;
- Los **hormigones HRC 20%** han presentados valores de densidad, absorción, porosidad en agua y retracción por secado similares al hormigón de referencia. Los valores de porosidad por intrusión de mercurio, por otro lado, han sido superiores al presentado por el hormigón HO.

La resistencia y el módulo de elasticidad de estas mezclas también se han presentado inferiores a la presentada por el hormigón HO;

- Los **hormigones HRC 50%** y **HRC 100%** han presentados valores de densidad, absorción, porosidad en agua y por intrusión de mercurio y retracción por secado que indican la inferioridad de estos materiales frente al hormigón HO. La resistencia y el módulo de elasticidad de estos hormigones también se han presentado inferiores a la presentada por el hormigón HO, aunque los valores de resistencia a compresión han sido superiores o equivalentes al valor de 25 mega pascales que la EHE (2008) especifica para tal.

Ya el análisis conjunto de los parámetros de absorción capilar, carbonatación y difusión de cloruros de estos hormigones ha permitido tener un conocimiento general y complementario de los principales mecanismos de transporte de agentes agresivos existentes en el interior de un hormigón. Los resultados obtenidos indican que:

- Los **hormigones HRH 20%** han presentados coeficientes de absorción capilar, carbonatación y difusión de cloruros similares al hormigón HO;
- Los **hormigones HRH 50%** han presentados, en general, valores de absorción capilar superiores al hormigón de referencia;
- Al mismo tiempo, los **hormigones HRH 100%** han presentado:
 - Valores de coeficiente de absorción capilar similares al hormigón HRH 50%, y, en consecuencia, superiores al presentado por hormigón HO;
 - Valores de coeficiente de difusión de cloruros similares a los presentados por el hormigón HO;
- Por su parte, los **hormigones HRC 20%** han presentados coeficientes de absorción capilar y carbonatación similares a las mezclas HO y HRH 20%, mientras los valores de coeficiente de difusión de cloruros calculados se han presentado poco superiores a los de las mezclas HO y HRC;
- Los **hormigones HRH 50%** han presentados, en general, valores de absorción capilar superiores al hormigón HO;
- Los **hormigones HRC 100%** han presentado coeficientes de absorción capilar y de difusión de cloruros superiores a los demás hormigones estudiados en el trabajo. Los resultados confirman la inferioridad de estos materiales frente al hormigón HO, identificada inicialmente en el análisis de los resultados obtenidos en los experimentos físicos y mecánicos.

El análisis comparativo realizado entre los hormigones HO, HRH y HRC han identificado que las principales diferencias entre ellos se generan por:

- Los cambios en la **estructura de poros** del hormigón. Las principales diferencias existentes en la estructura de poros de los hormigones HRH y HRC en comparación al hormigón HO se deben a que:
 - Las mezclas HRC presentan un incremento progresivo en el volumen de intrusión de mercurio en los poros con diámetros comprendidos entre 0,1-10 μm . A medida que se aumenta el contenido de árido AC, puede observarse el aumento de la cantidad de poros

con diámetros alrededor de 0,07 μm y entre 3-4 μm . Como resultado, los hormigones reciclados HRC han presentado los mayores valores de porosidad total accesible al mercurio encontrados (entre 16 y 21%);

- Las mezclas HRH presentan un incremento progresivo general en el volumen de intrusión de mercurio en los poros solo para las mezclas con 100% de árido AH. Como en las mezclas HRC, a medida que se aumenta el contenido de árido AH, puede observarse el aumento de la cantidad de poros con diámetros alrededor de 0,07 μm y entre 1-10 μm . Esos incrementos son menores que los presentados por las mezclas HRC y solo se presentan relevantes para las mezclas con 100% de árido reciclado AH. Como resultado, los hormigones reciclados HRH 20% y HRH 50% no han presentado valores distintos al presentado por el hormigón HO.
- La **presencia del mortero adherido** de los áridos reciclados de hormigón, que componen tanto el árido AH como el AC. Además de generar una segunda zona de transición para análisis (zona antigua entre el árido original y el mortero adherido), pueden incrementar el contenido de aluminato cálcico en el material;
- La **presencia de elementos asfálticos** en el árido AH, cuyas plasticidad y baja permeabilidad pueden contribuir para modificar algunas propiedades del hormigón;
- La **presencia de elementos cerámicos** en el árido AC, cuyos formato, rugosidad y composición mineralógica pueden modificar algunas propiedades del hormigón y incrementar el contenido de sulfatos de las mezclas.

Las diferencias existentes en las **estructuras de poros** de los hormigones en análisis han influenciado:

- La resistencia a compresión: la distribución de poros es la propiedad que controla efectivamente la resistencia y la permeabilidad, además de las variaciones de volumen en la pasta de cemento endurecida;
- La retracción por secado: la principal causa de la retracción en hormigones es la salida del agua adsorbida de la pasta de cemento en función de la humedad relativa diferencial existente entre el hormigón y el ambiente. Hormigones más porosos presentan mayor retracción por secado;
- La absorción capilar: esta propiedad está vinculada a la resistencia del material, que, por su parte, es directamente influenciada por la distribución de poros del hormigón;
- La carbonatación: como en la propiedad de absorción capilar, el avance del frente de carbonatación está vinculado a la resistencia del material, que, por su parte, es directamente influenciada por la distribución de poros del hormigón;
- La difusión de cloruros: los poros pueden ser los responsables por el incremento de su conductividad a través del hormigón.

La **presencia del mortero adherido** de los áridos reciclados de hormigón pueden haber influenciado las siguientes propiedades de los hormigones reciclados HRH y HRC:

- La resistencia á compresión: independiente de la cantidad, el mortero adherido puede influenciar en la reducción de la resistencia del hormigón reciclado si la calidad del mortero adherido es inferior a la del nuevo mortero (debilidad en la zona de transición antigua);
- El modulo de elasticidad: la posible mayor debilidad de las zonas de transición entre el árido y la pasta puede haber influenciado en la reducción del módulo de elasticidad de la estructura, ya que esta propiedad es determinada por la rigidez del árido;
- La carbonatación: La porosidad existente en la zona de transición antigua de los áridos reciclados de hormigón puede contribuir para que el CO₂ avance localmente. En cambio, la presencia del mortero adherido puede incrementar el contenido de elementos alcalinos carbonatados en hormigones reciclados y, en consecuencia, este incremento en la reserva alcalina del hormigón puede provocar una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación;
- La difusión de cloruros: la presencia de mortero adherido puede incrementar el contenido de aluminato cálcico en la mezcla, generando la posible formación de mono cloro-aluminatos de calcio hidratados y, en consecuencia, la disminución del contenido de cloruro libre en el hormigón. Además, los cloruros también pueden quedar retenidos por el CSH existente en el mortero adherido.

La **presencia de elementos asfálticos** en el árido reciclado pueden haber influenciado las siguientes propiedades de los hormigones reciclados HRH:

- La resistencia á compresión y el módulo de elasticidad: debido a su carácter plástico, los elementos asfálticos pueden influenciar en la reducción de la resistencia y del modulo de elasticidad del hormigón si presentados en relevante cantidad, como es el caso de las mezclas HRH en estudio;
- La carbonatación: esta propiedad está vinculada a la resistencia del hormigón, que, por su parte es directamente influenciada por la presencia de elementos asfálticos en su composición;
- La difusión de cloruros: debido a su baja permeabilidad, los elementos asfálticos que componen el árido AH pueden haber contribuido para disminuir el proceso de ingreso de iones cloruros en las mezclas HRH.

La **presencia de elementos cerámicos** en el árido reciclado pueden haber influenciado las siguientes propiedades de los hormigones reciclados HRC:

- La resistencia á compresión: el formato, rugosidad y composición mineralógica de los elementos cerámicos puede contribuir para aumentar la debilidad de los hormigones hechos con áridos reciclados compuestos total o parcialmente por esos elementos;
- El modulo de elasticidad: la mayor porosidad de los áridos cerámicos puede haber influenciado en la reducción del módulo de elasticidad de la estructura, ya que esta propiedad es determinada por la rigidez del árido;
- La absorción capilar: aunque el árido no necesariamente tenga influencia directa en la absorción capilar de un hormigón, un árido con alta permeabilidad, como los áridos cerámicos, puede

contribuir para incrementar la permeabilidad de los hormigones y, en consecuencia, aumentar el área efectiva del flujo de agua;

- La carbonatación: debido a su alta porosidad, los áridos cerámicos pueden contribuir para facilitar el avance del frente de carbonatación, promoviendo una evolución irregular en puntos donde hay la presencia de árido cerámico;
- La difusión de cloruros: los áridos cerámicos pueden contribuir para incrementar la permeabilidad de los hormigones y, en consecuencia, facilitar el ingreso de iones cloruros. En cambio, su presencia también incrementa el contenido de sulfatos de las mezclas. La posible existencia de iones sulfatos en el hormigón puede promover la liberación de iones cloruros para la formación de aluminato cálcico hidratado.

Respecto a la evaluación del impacto ambiental por lixiviación de los hormigones HO, HRH y HRC, se concluye que:

- La aplicación inicial de un ensayo de conformidad en los áridos reciclados, como la norma europea UNE-EN 12457-4:2003, ha resultado ser un procedimiento sencillo y eficiente para la evaluación del impacto ambiental de esos áridos en la producción de hormigones. La lixiviación de componentes analizada en este ensayo puede ser utilizada para descartar la necesidad de realización de un ensayo de caracterización básica del hormigón;
- En cambio, los áridos reciclados que no han cumplido los límites máximos exigidos en el ensayo de conformidad no necesariamente deben ser descartados para el uso en hormigón, ya que las condiciones impuestas son extremas. Para estos casos, la realización de ensayo de caracterización básica como el NEN 7345:1995, puede obtener resultados más próximos de la realidad;
- Como las muestras de árido AH no han presentado ningún elemento lixiviado en cantidad superior a los límites exigidos por la normativa UNE-EN 12457-4:2003, no ha sido necesaria la realización del ensayo monolítico para los hormigones HRH. Se comprueba que los hormigones HRH producidos en este trabajo no representan ningún riesgo ambiental al medio;
- Ya para los áridos AC se ha identificado una cantidad importante de sulfatos lixiviados en el ensayo de conformidad. A la vista de esos resultados, se ha analizado la conformidad de muestras del árido AC sometidas a proceso de lavado (muestras ACL) y se ha realizado la caracterización básica de hormigones hechos con áridos AC. En ambos casos, sea para el material granular o monolítico, se comprueba la viabilidad ambiental de uso del material:
 - Todos los componentes lixiviados en las muestras ACL han presentado valores por debajo de los límites máximos de la normativa, incluyendo el lixiviado de sulfatos. Además, los resultados indican un descenso de todos los valores de lixiviados identificados en el ensayo realizado con la muestra sin lavar. Se observa que el proceso de lavado ha producido la disminución de elementos lixiviados en el árido AC.
 - Todos los valores de emisión acumulada obtenidos para los hormigones HRC se han presentado dentro de los límites indicados por el Build Materials Decree (1995), indicando que esos hormigones pueden ser utilizados sin cualquiera restricción de carácter ambiental.

Respecto a los resultados de la UNE-EN 12457-4:2003, se debe destacar que la fuerte naturaleza alcalina de los elementos de hormigón que componen tanto los áridos AH como los AC, y los diferentes grados de carbonatación que estos áridos puedan presentar, pueden haber influenciado en

la lixiviación de componentes. Cuanto más alcalino y menos carbonatado sea el material, menor será su cantidad de componentes lixiviados. Y en ese contexto, se percibe que las suspensiones de los áridos reciclados AC y ACL son menos alcalinas que las de los áridos AH.

Respecto a los resultados del NEN 7345:1995, se puede afirmar que:

- El medio de estabilización / solidificación creado por el cemento Portland ha contribuido para que el alto contenido de sulfatos existente en los áridos AC no produjera emisiones de sulfatos en los hormigones HRC superiores a los límites exigidos por la norma. El ambiente altamente alcalino del hormigón contribuye para esta estabilización / solidificación del medio ya que promueve la inmovilización de los mecanismos químicos producidos por el cemento hidratado.
- La presencia de áridos reciclados AC en las mezclas recicladas puede haber contribuido tanto para el aumento del contenido de los componentes V, Cl⁻ y SO⁼⁴, como para su mayor lixiviación.
- Mientras los elementos Cu y Pb proceden fundamentalmente de los áridos convencionales, la lixiviación de Zn se reduce gradualmente a medida que la mezcla en análisis presenta un mayor contenido de material reciclado. En todos los casos, la lixiviación de esos elementos es influenciada por el contenido de árido convencional y no por el contenido de árido reciclado.

Finalmente, se cree que en el futuro próximo, el análisis ambiental de áridos reciclados por lixiviación será realizado con base en el ensayo llamado de columna en su versión EN TS 14405, en lugar del ensayo de conformidad UNE EN 12457-4:2003. El ensayo de conformidad ha sido adoptado en este trabajo como una solución transitoria ya que la administración española, hasta el momento de elaboración de este documento, aún no ha indicado valores límites para el ensayo de columna.

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN Y MEDIDA DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Un indicador es una observación empírica que sintetiza aspectos relevantes de un determinado fenómeno con el objetivo de generar análisis. Puede referirse tanto a las características observables de este fenómeno, como a aquellas que son susceptibles de expresión numérica. Los indicadores permiten valorar y analizar esas características, que son razón de estudio, generando información suficiente para planificar y tomar decisiones a partir de éstos (Quintero, 1997).

En términos generales, los indicadores pueden suministrar, entre otros puntos, importantes informaciones para:

- determinar el nivel de cumplimiento de metas y objetivos;
- proveer información de rendimiento;
- tomar decisiones en el ámbito estratégico sobre detalles técnicos y operacionales del fenómeno en análisis.

Es importante resaltar que la calidad de un indicador está vinculada a la calidad tanto de los componentes utilizados en su construcción, como de los sistemas de medición (información, recolección y registro de los datos). Según United Nations (1999), los criterios que determinan la calidad y utilidad de un indicador son:

- Validez: capacidad de medir lo que se necesita;
- Confiabilidad: capacidad de reproducir, a partir de mediciones repetidas en condiciones similares, resultados equivalentes y coherentes;
- Especificidad: capacidad de medir solo el fenómeno que se necesita medir;
- Sensibilidad: capacidad de realizar medidas que consideren posibles cambios en el fenómeno objeto de análisis;

- Mensurabilidad: facilidad de obtener los datos de medida;
- Relevancia: capacidad de dar resultados claros y representativos al tema en análisis;
- Costo-efectividad: capacidad de dar resultados que justifiquen la inversión en tiempo y otros recursos.

Mientras sean más concretos y haya menor número de indicadores, mayor será la probabilidad de profundizar en su análisis y mayor será su aportación.

Ya un índice se trata del análisis integrado de varios indicadores. Puede tratarse, por ejemplo, de una expresión numérica adimensional obtenida por medio de la combinación de varias variables a las que se les asigna un valor numérico y un factor de ponderación, si es aplicable.

En ese contexto, se asume que la aplicación de índices y indicadores para evaluar la sostenibilidad del uso de áridos reciclados en hormigón puede proporcionar informaciones que permitan:

- determinar el nivel de viabilidad técnica y ambiental de uso de esos materiales en la producción de hormigón;
- desarrollar estrategias que hagan más eficientes el uso de los áridos reciclados en aplicaciones más “nobles” como el hormigón. Es decir, promover una utilización de recursos más efectiva, a fin de implantar soluciones que ayuden a generar mejores manejos administrativos y operacionales, particularmente direccionados, en el caso del presente estudio, al uso de los áridos reciclados en hormigón.

La evaluación y medida de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en este trabajo se ha basado en el análisis comparativo entre índices y indicadores de previsión de vida útil y de impacto ambiental por lixiviación de esos hormigones y de un hormigón convencional de referencia. Todos los hormigones en análisis han sido producidos en condiciones equivalentes de diseño, ejecución y ambiente.

Por lo tanto, uno de los puntos principales de este trabajo ha sido la definición de una metodología basada en índices y indicadores adecuados y eficientes.

Tratándose de la sostenibilidad ambiental de hormigones reciclados es necesario considerar un conjunto de índices y indicadores que incluyan, principalmente, tanto los aspectos de durabilidad como los de impacto ambiental. El análisis comparativo ha sido determinado a través del desarrollo y de la aplicación de los siguientes índices y indicadores:

- Índice de Vida Útil Total: Obtenido a través del análisis integrado de los siguientes indicadores:
 - Indicador de durabilidad y vida útil por carbonatación: Determina el tiempo en años que el hormigón estructural permanecerá en la actividad para la que ha sido diseñada, en función de la corrosión de la armadura por carbonatación;
 - Indicador de durabilidad y vida útil por penetración de cloruros: Determina el tiempo en años que el hormigón permanecerá en la actividad para la que ha sido diseñada en función de la corrosión de la armadura por penetración de cloruros;

- Índice de Emisiones de Contaminantes: Obtenido a través del análisis integrado de los Indicadores de Emisiones de Contaminantes. Los Indicadores de Emisiones de Contaminantes determinan la cantidad total de un contaminante emitido por unidad de peso del producto, y se calculan a través de la realización de ensayos de lixiviación.

Para el desarrollo de todos los indicadores propuestos, se ha utilizado los resultados obtenidos en el plan experimental realizado en este estudio (capítulo 5).

La definición, aplicación y validación de los indicadores y del índice de durabilidad y vida útil se presentan en el punto 6.2 de este capítulo. Los resultados han sido analizados y comparados entre sí, con el objetivo de validar los métodos desarrollados y de definir niveles de calidad técnicos y ambientales de uso de áridos reciclados en hormigón de acuerdo con las necesidades, deficiencias y calidades de cada material.

En el punto 6.3 se presenta la definición, aplicación y validación de los indicadores y del índice de emisiones de contaminantes.

6.2 DEFINICIÓN Y APLICACIÓN DE LOS INDICADORES Y ÍNDICE DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL

En ese punto se definen los indicadores y el índice de durabilidad y vida útil adoptados en este trabajo como herramientas para el análisis comparativo de la sostenibilidad de hormigones convencionales y reciclados.

En la bibliografía se ha identificado la existencia de diversos modelos relacionados a su deterioro por corrosión de la armadura en función del tiempo. La mayoría de ellos se basan en el modelo de Tuutti (Tuutti, 1982). Este modelo es considerado el más generalizado, aceptado y utilizado en la actualidad. En él, la vida útil puede ser estimada considerando la suma de las dos etapas de vida de un hormigón: etapa de iniciación de la corrosión y etapa de propagación de la corrosión.

El análisis de la vida útil de esas dos etapas, indicadas gráficamente en la figura 2.4 de este documento, representa un análisis completo de la vida funcional de un hormigón. El inicio del proceso de corrosión en un hormigón no significa el término de su funcionalidad.

Es en el período de iniciación de la corrosión que el hormigón efectivamente actúa en la calidad para la cual fue diseñada: una estructura de hormigón alcalino compuesto por una armadura pasivada. El período de propagación, por su parte, es variable en función de las condiciones de exposición, y puede ser bastante reducido en condiciones favorables para la corrosión (Helene, 1997).

El tiempo necesario para la etapa de prorrogación está relacionado con velocidad de corrosión de la armadura del hormigón. Puede ser estimado a través del conocimiento de la humedad de equilibrio del hormigón, de su resistividad eléctrica o de la corriente de corrosión (Ley de Faraday), siempre admitiéndose que esos parámetros permanecen constantes a lo largo del tiempo.

Así mismo, la corrosión de hormigones exteriores es inevitable en climas cuya humedad relativa del aire pueda variar entre 60% y 99% en algún período o estación del año y/o pueda presentar períodos de lluvias, como es el caso del clima en España.

En ese contexto, como base inicial para el desarrollo de los indicadores de durabilidad y vida útil propuestos en este trabajo, se han escogidos algunos modelos matemáticos que se basan en el modelo de Tuutti, pero se limitan al análisis del período de iniciación del proceso de corrosión.

La validez de uso de esos métodos en el análisis comparativo propuesto ha sido comprobada a través del uso de los resultados de los ensayos acelerados realizados en la etapa experimental, como variables de aplicación de esos modelos.

Este procedimiento ha permitido que los modelos empleados se adecuasen a las condiciones del estudio y, en consecuencia, generasen resultados que pudiesen tener más trascendencia para el análisis final.

Como se trata de un análisis comparativo, no se ha considerado modelos probabilísticos.

Para el período de propagación del proceso de corrosión, se ha adoptado en todos los casos el modelo matemático presentado por la EHE (2008):

$$t_p = \left(\frac{80}{\phi} \frac{c}{v_{corr}} \right) \quad (6.1)$$

c = Recubrimiento del hormigón (mm)

v_{corr} = Velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)

ϕ = Diámetro de la armadura (mm)

Las propiedades analizadas en cada indicador escogido han sido la carbonatación y la penetración por cloruros de los hormigones, respectivamente. El índice generado se ha basado en el análisis integrado de la aplicación de los indicadores desarrollados.

Para cada situación de aplicación de los modelos, ha sido posible predecir la vida útil a partir del uso de un valor pre determinado de 25 mm referente al recubrimiento mínimo de la armadura pasiva.

A los efectos de la EHE (2008), se define este espesor para hormigones con un valor de vida útil de proyecto de 100 años, hechos con cemento CEM I, con resistencia características entre 25 y 40 N/mm^2 y sometidos a la clase de exposición IIa, lo que representa elementos en las siguientes condiciones:

- interiores sometidos a humedades relativas medias altas ($> 65\%$) o a condensaciones;
- exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm;
- elementos enterrados o sumergidos.

Ya la vida útil de proyecto es definida por la EHE (2008) con base en los parámetros indicados en la tabla 6.1.

Es importante destacar que una misma vida útil puede ser alcanzada por distintas situaciones de recubrimientos y resistencia del hormigón. Es decir que un hormigón A, con resistencia inferior a la presentada por un hormigón B, puede presentar el mismo valor de vida útil del segundo hormigón, si presenta mayor recubrimiento.

Este tipo de análisis, en cambio, no será considerado en el presente estudio. El objetivo es hacer un análisis comparativo de la sustentabilidad del uso de áridos reciclados en hormigón, en condiciones equivalentes al de un hormigón convencional. Todos los parámetros de diseño, ejecución y ambiente se consideran equivalentes para todos los hormigones producidos en este estudio.

Tabla 6.1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura (EHE, 2008)

Tipo de estructura	Vida útil propuesta (años)
Estructuras de carácter temporal	3 – 10
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal	10 - 25
Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas	15 - 50
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100

6.2.1 INDICADOR DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL POR CARBONATACIÓN

Para el análisis de la durabilidad de los hormigones por carbonatación, también se ha considerado la función matemática simplificada determinada por la ley de Fick. En este caso, se aplica:

$$x = K\sqrt{t} \tag{2.1}$$

x = Recubrimiento del hormigón

t = Vida útil

K = Coeficiente del agente agresor, en este caso, el coeficiente de carbonatación, que depende de la difusidad del CO₂ y otros parámetros relevantes, como condiciones ambientales y de concentración de CO₂ en el ambiente y en el interior del hormigón.

El ensayo de carbonatación acelerado realizado en el plan experimental se basa en la aplicación de esta ecuación. El coeficiente de carbonatación de los hormigones analizados (HO, HRH 20% y HRC 20%) ha sido calculado con la aplicación en la referida ecuación de los valores de profundidad de carbonatación y tiempo real obtenidos experimentalmente.

En el caso de este ensayo, las probetas han sido expuestas a una concentración exterior de 4% de CO₂, que se trata de un valor mucho mayor que el presentado en la atmósfera natural, donde la concentración de CO₂ en promedio es de 0,035%.

Se puede considerar que el tiempo real necesario para alcanzar las profundidades de carbonatación obtenidas es aproximadamente 100 veces menor que el obtenido durante el ensayo acelerado (Ocampo y col., 2010).

Con la ecuación 2.1, y los valores de coeficiente de carbonatación obtenidos en el ensayo, se ha calculado el tiempo $t_{4\%}$ necesario para que a una concentración de CO₂ de 4% llegue al acero de una estructura con recubrimiento de 25 mm.

A continuación, para el cálculo del tiempo de iniciación real de la corrosión de esos hormigones, se ha realizado una interpolación de las concentraciones de CO₂ en el ensayo y en el ambiente, según indica Ocampo y col. (2010):

$$\frac{t_{4\%}}{t_{0,035\%}} = \sqrt{\frac{C_{4\%}}{C_{0,035\%}}} \quad (6.2)$$

t = Tiempo de iniciación

c = Concentración de CO₂ en el ambiente

Los resultados obtenidos no presentan gran diferencia de valores, aun que se identifica que la presencia tanto del árido reciclado AH como del árido reciclado AC reducen la expectativa de vida útil del hormigón (figura 6.1).

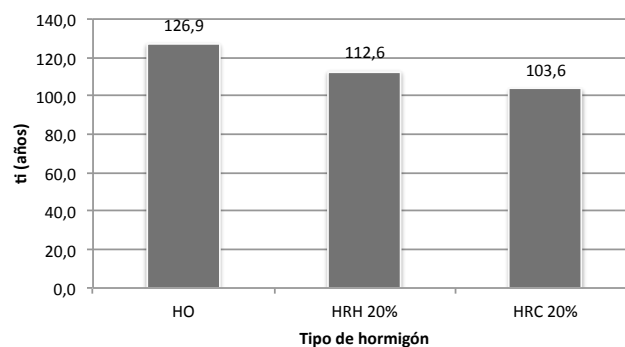


Figura 6.1. Tiempo de iniciación (en años) de los hormigones analizados en función del coeficiente de carbonatación obtenido por medio experimental

En seguida, a modo comparativo, se ha realizado el cálculo de la estimativa de vida útil por carbonatación a partir de algunos modelos disponibles en la bibliografía.

La mayoría de las metodologías de previsión de la vida útil de hormigones relacionadas con el periodo de iniciación de la corrosión en función de la carbonatación están basadas en las leyes de

Fick. Muchas de ellas correlacionan el tiempo y la profundidad de carbonatación de un hormigón a variables de aplicación con mayor facilidad de medida.

Los modelos escogidos consideran la etapa de iniciación del proceso de corrosión y presentan distintas variables de análisis en cada caso:

- Método Papadakis y col. (1992): es un modelo basado en la ley de Fick que considera varios parámetros que influyen en el proceso de carbonatación de un hormigón convencional (relación agua/cemento, densidad de los áridos, del agua y del cemento, humedad relativa, y otros);
- Método EHE (2008): es un modelo simplificado, también basado en la ley de Fick, que considera la resistencia del hormigón. Indicado en el anejo 9 de la normativa española, es recomendado para la previsión de la vida útil de hormigones convencionales en la etapa del proyecto;
- Método CEB (1997): es un modelo similar al modelo de Tuutti (1982). Es considerado bastante completo, por incluir prácticamente todas las variables que afectan el proceso de carbonatación de un hormigón convencional, incluyendo las condiciones de cura y exposición de la estructura, a través del uso de tablas y coeficientes.

Es importante tener en cuenta que esas metodologías han sido creadas para aplicación en hormigones convencionales. No se consideran las características de porosidad y permeabilidad de los áridos reciclados directamente.

Papadakis y col. (1992), por ejemplo, presenta la siguiente fórmula simplificada para expresar la evolución de la profundidad de carbonatación a lo largo del tiempo en hormigones ordinarios de cemento portland:

$$c = 350 \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \frac{(w/c) - 0,3}{1 + (\rho_c/\rho_w)(w/c)} \left(1 - \frac{HR}{100} \right) \left\{ \left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \frac{w}{c} + \frac{\rho_c}{\rho_a} \left(\frac{a}{c} \right) \right] \gamma_{CO_2} t \right\}^{1/2} \quad (6.3)$$

c = Profundidad de carbonatación (mm)

ρ_c = Densidad del cemento (kg/m^3)

ρ_w = Densidad del agua (kg/m^3)

ρ_a = Densidad de los áridos (kg/m^3)

w/c = Relación agua/cemento

a/c = Relación árido/cemento

γ_{CO_2} = Concentración de CO_2 en la atmósfera (en volumen)

HR = Humedad relativa (%)

t = tiempo (años)

Para la aplicación de este método en los datos de los hormigones producidos en este trabajo, se ha adoptado los valores de densidad de áridos obtenidos en la campaña experimental. Las variables adoptadas se presentan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Variables adoptadas por hormigón para aplicación del método de previsión de vida útil propuesto por Papadakis y col. (1992)

Variable	Unidad	Tipo de hormigón						
		HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
c	mm	25	25	25	25	25	25	25
ρ_c	kg/m ³	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
ρ_a	kg/m ³	2551	2528	2493	2427	2498	2412	2245
w/c	-	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
a/c	-	7,09	7,02	6,92	6,74	6,90	6,61	6,12
γ_{Cco2}	%	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
HR	%	65	65	65	65	65	65	65

Los valores de tiempo de iniciación obtenidos para todos los hormigones son similares y se presentan alrededor de 80 años (figura 6.2).

La falta de representatividad de los resultados se debe a las condiciones del análisis comparativo planteado. La fórmula de cálculo propuesta por Papadakis y col. (1992) indica una relación inversamente proporcional entre el tiempo de iniciación y los valores de densidad total de los áridos y de la relación árido / cemento. En consecuencia, los hormigones con menor densidad tienden a presentar tiempos de iniciación sutilmente más elevados.

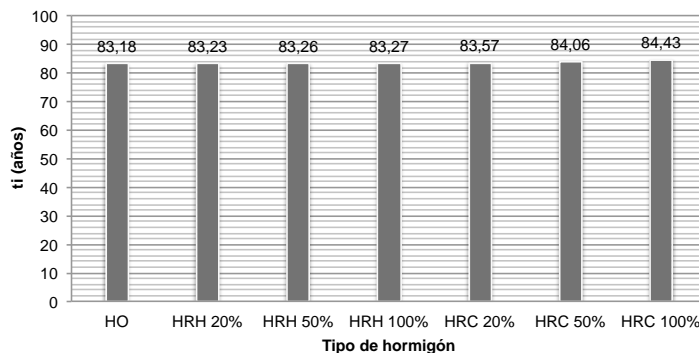


Figura 6.2. Tiempo de iniciación (en años) por carbonatación de los hormigones analizados de acuerdo con el método Papadakis y col. (1992)

Este factor no se presenta adecuado al análisis propuesto. Al analizarse los resultados obtenidos en el plan experimental, no se identifica una correlación en este sentido entre las propiedades de densidad y carbonatación de los hormigones (figura 6.3).

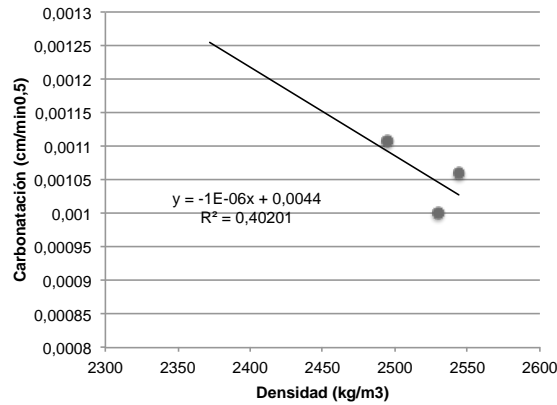


Figura 6.3. Correlación entre las propiedades de densidad y carbonatación de los hormigones analizados

Por lo tanto, se asume que este modelo no sirve para el propósito de esta tesis porque no considera los parámetros verdaderos de durabilidad, relacionados directamente con la carbonatación de hormigones reciclados.

Por otra parte, se ha aplicado el método indicado en el anejo 9 de la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE, 2008). Este modelo es presentado en el documento como una herramienta para comprobar el Estado Límite de la Durabilidad de hormigones, en función de la vida útil de cálculo, y comprende las siguientes formulas:

$$t_i = \left(\frac{c}{K_c} \right)^2 \tag{6.4}$$

$$K_c = c_{env} c_{air} a f_{cm}^b \tag{6.5}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \tag{6.6}$$

c = Profundidad de carbonatación (mm)

t_i = Tiempo de iniciación (años)

K_c = Coeficiente de carbonatación (mm/años^{0,5})

f_{cm} = Resistencia a compresión media del hormigón (N/mm²)

f_{ck} = Resistencia característica especificada (N/mm²)

c_{env} = Coeficiente de ambiente (Tabla 6.3)

c_{air} = Coeficiente de aerantes (Tabla 6.3)

a = Parámetro relacionado al tipo de conglomerante (Tabla 6.4)

b = Parámetro relacionado al tipo de conglomerante (Tabla 6.4)

Tabla 6.3. Coeficientes de ambiente y aerantes (c_{env} y c_{air})

Coeficiente c_{env}		Coeficiente c_{air}	
Tipo de ambiente	Valor	Valor de aire ocluido (%)	Valor
Protegido de lluvia	1	< 4,5	1
Expuesto a la lluvia	0,5	$\geq 4,5$	0,7

Tabla 6.4. Coeficientes a y b

Conglomerante	Tipo de cemento	Valor de a	Valor de b
Cemento Portland	CEM I, CEM II/A, CEM II/B-S, CEM II/B-L, CEM II/B-LL, CEM II/B-M, CEM/V	1800	-1,7
Cemento Portland con 28% de cenizas volantes	CEM II/B-P, CEM II/B-V, CEM IV/A, CEM IV/B	360	-1,2
Cemento Portland con 9% de humo de sílice	CEM II/A-D	400	-1,2
Cemento Portland con 65% de escorias	CEM III/A, CEM III/B	360	-1,2

Para la aplicación de este modelo, se ha considerado los valores de resistencia a compresión obtenidos en el plan experimental en el lugar del cálculo de la resistencia a través de la ecuación 6.6. Se ha considerado que la estructura está expuesta a lluvia y que contiene un valor de aire ocluido inferior a 4,5%. Las variables adoptadas para cada hormigón se presentan en la tabla 6.6, mientras que los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.4.

En este caso, todos los valores de tiempo de iniciación obtenidos para los hormigones reciclados son más bajos que el presentado por el hormigón de referencia HO, siendo que los valores más bajos se presentan por los hormigones HRH100%, HRC50% y HRC100%.

Se observa que el tiempo de iniciación de los hormigones reciclados se reducen a medida que se aumenta el contenido de árido reciclado en la composición del hormigón.

Además, los hormigones reciclados con contenido de árido AC presentan valores más bajos que los hormigones reciclados con árido AH equivalentes.

Tabla 6.5. Variables adoptadas por hormigón para aplicación del método de previsión de vida útil propuesto por la EHE (2008)

Variable	Unidad	Tipo de hormigón						
		HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
f_{cm}	N/mm ²	38,09	35,12	31,96	31,15	32,93	26,92	24,93
c	mm	25	25	25	25	25	25	25
c_{env}	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
c_{air}	-	1	1	1	1	1	1	1
a	-	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
b	-	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7

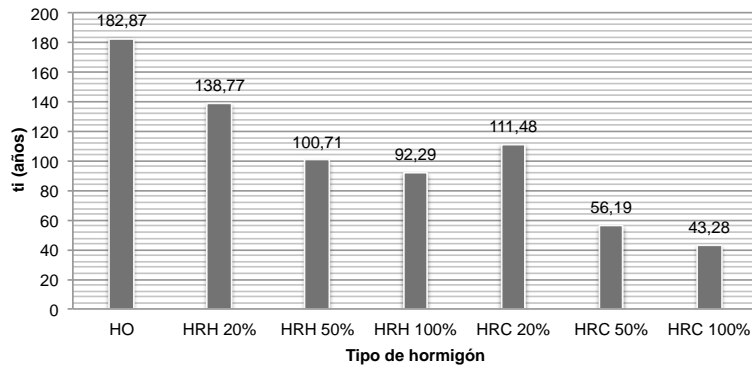


Figura 6.4. Tiempo de iniciación (en años) por carbonatación de los hormigones analizados de acuerdo con el método EHE (2008)

Sin embargo, el método propuesto por la EHE (2008) no se presenta adecuado al uso como base para el desarrollo del indicador de Vida Útil por Carbonatación. Se comprueba que no existe una correlación adecuada entre sus resultados y los resultados estimados a través del ensayo acelerado (figura 6.5). La correlación lineal obtenida no coincide los valores de x e y en el 0.

De hecho, la propiedad de resistencia a compresión no debe ser utilizada como parámetro de referencia para la modelización de la carbonatación de hormigones reciclados. Un hormigón con gran porosidad puede presentar baja resistencia, pero solo se presentará más susceptible a la carbonatación en comparación con un hormigón menos poroso si los poros están conectados y permitan el paso del CO₂.

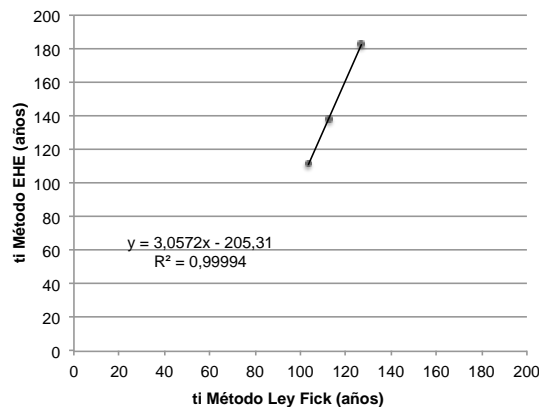


Figura 6.5. Correlación entre los resultados de tiempo de iniciación (en años) por carbonatación obtenidos a través de la aplicación directa de la Ley de Fick y del método propuesto por la EHE (2008)

Por fin, se ha aplicado el método indicado por CEB (1997). Este modelo propone la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$c = \sqrt{2\psi_1\psi_2\psi_3\Delta_c} \sqrt{\frac{D_{nom}t}{a}} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (6.7)$$

c = Profundidad de carbonatación (m)

ψ_1 = Factor relacionado a las condiciones de micro clima (tabla 6.7)

ψ_2 = Factor relacionado a las condiciones de curado (tabla 6.7)

ψ_3 = Factor relacionado a la relación agua / cemento (tabla 6.7)

Δ_c = Diferencia de la concentración de CO_2 entre el ambiente y el frente de carbonatación (kg/m)

D_{nom} = Coeficiente de difusión del CO_2 (m^2/s)

a = Contenido de CaO para carbonatación completa (kg/m^3)

t = tiempo (años)

t_0 = Tiempo de referencia (años)

n = Factor de edad (Tabla 6.6)

$$a = 0,75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \frac{MCO_2}{MCAO} \quad (6.8)$$

C = Consumo de cemento del hormigón (kg/m^3)

CaO = Contenido de CaO en el cemento

α_H = Grado de hidratación

MCO_2 = Masa molar del CO_2 (kg)

$MCAO$ = Masa molar del CaO (kg)

Tabla 6.6. Coeficientes de proyecto para estructuras sujetas à carbonatación

Clase	I	II	III	IV	V	Ref
Curado	Malo	Bueno				
Exposición	-			+		Interno
ψ_1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
ψ_2	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ψ_3	1,5	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
n	0,3	0,3	0,2	0,1	0,05	0

Para la aplicación de esta metodología, se ha considerado los parámetros de proyecto referentes a la clase IV. Además, en el caso de los hormigones reciclados, se ha considerado que la presencia del cemento existente en el mortero adherido a los áridos reciclados de hormigón influencia el cálculo del contenido de CaO. Se ha estimado un incremento de 10% del contenido de CaO proporcionales a la cantidad en porcentaje de áridos reciclados de hormigón utilizados en la producción de cada hormigón.

El valor de D_{nom} ha sido calculado a partir de los datos obtenidos experimentalmente y la ecuación 6.7. El tiempo de referencia aplicado al calculo de este parámetro ha sido de 0,0767 años, referente al periodo de curado de las probetas.

Este procedimiento ha sido realizado con el objetivo de calibrar el modelo considerando las condiciones de los hormigones en estudio. Así, los cálculos se limitan al análisis de los hormigones HO, HRH 20% y HRC 20%.

Las variables adoptadas para el cálculo del tiempo de iniciación se presentan en la tabla 6.7. Los valores finales han sido ajustados a la concentración de CO₂ de la atmósfera natural, según la ecuación 6.2, y se presentan en la figura 6.6.

Tabla 6.7. Variables adoptadas y calculadas por hormigón para aplicación del método de previsión de vida útil por carbonatación propuesto por CEB (1997)

Variable	Unidad	Tipo de hormigón		
		HO	HRH 20%	HRC 20%
C	Kg/m ³	275	275	275
CaO	-	0,65	0,65	0,65
α_H	-	0,75	0,75	0,75
MCO ₂	Kg	0,044	0,044	0,044
MCaO	Kg	0,056	0,056	0,056
a	-	79,00	79,88	79,55
c	m	0,025	0,025	0,025
ψ_1	-	0,50	0,50	0,50
ψ_2	-	1,00	1,00	1,00
ψ_3	-	1,00	1,00	1,00
Δ_c	-	0,6E-03	0,6E-03	0,6E-03
t ₀	años	1	1	1
n	-	0,1	0,1	0,1

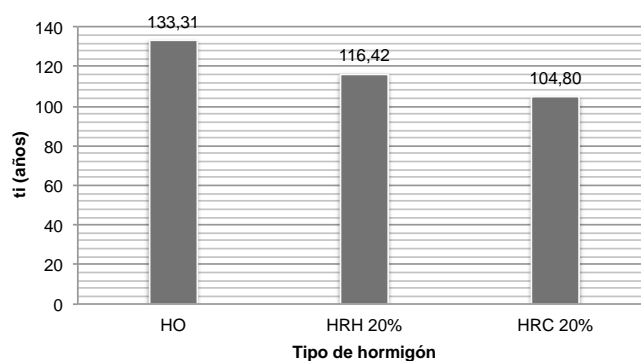


Figura 6.6. Tiempo de iniciación (en años) por carbonatación de los hormigones analizados de acuerdo con el método CEB (1997)

Como resultado, los cálculos hechos con base en el modelo propuesto por la CEB (1997) indican valores de tiempo de iniciación coherentes con los resultados estimados a través del ensayo acelerado (figura 6.7).

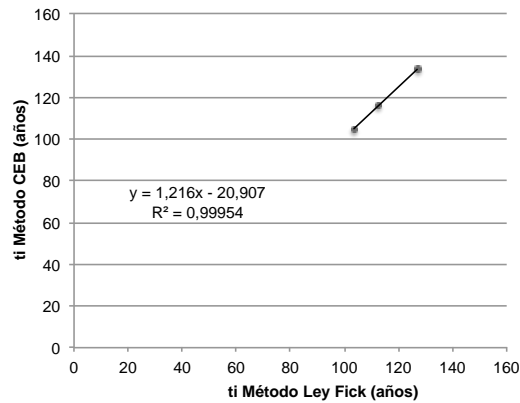


Figura 6.7. Correlación entre los resultados de tiempo de iniciación (en años) por carbonatación obtenidos a través de la aplicación directa de la Ley de Fick y del método propuesto por CEB (1997)

Por presentar ecuaciones más complejas, que contemplan más variables de entradas que los demás, este modelo ha sido considerado el mejor entre los modelos analizados para representar el proceso de degradación por carbonatación.

Por otra parte, es importante destacar que la estimación del contenido de CaO existente en los hormigones reciclados solo ha sido realizada con el objetivo de permitir la continuidad de aplicación del modelo. Sin embargo, este aspecto indica cierta debilidad de este método para la aplicación en hormigones reciclados. No se puede hacer una estimación precisa del contenido de CaO existente en un hormigón reciclado, relacionándole con el contenido estimado del mortero adherido de los áridos reciclados de hormigón utilizados. Parte del mortero adherido existente puede ya estar carbonatada.

Los resultados obtenidos a partir los ensayos de carbonatación realizados en este estudio comprueban la existencia eventual de carbonatación previa en el mortero adherido de los áridos reciclados (figura 5.43).

En este sentido, considerando todos los aspectos analizados en los modelos aplicados anteriormente, y teniendo en cuenta la necesidad de desarrollo de un indicador válido, confiable, específico, sensible, mensurable, relevante y efectivo económicamente, se ha buscado analizar el proceso de carbonatación a través de otras propiedades del hormigón reciclado.

Se asume la correlación indicada en la figura 6.8. En esta figura se observa la correlación logarítmica entre los valores de coeficiente de carbonatación obtenidos a partir de la campaña experimental y los valores de porosidad por intrusión de mercurio.

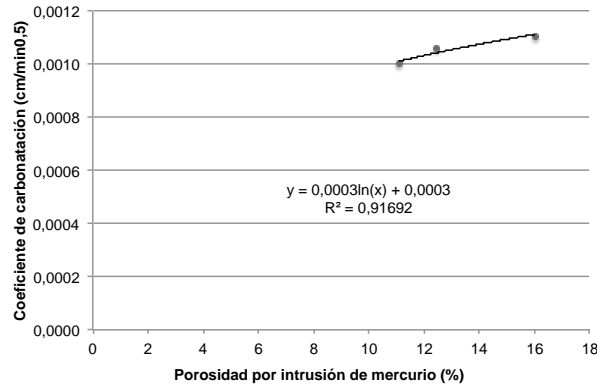


Figura 6.8. Correlación entre los resultados de coeficiente de carbonatación y porosidad por intrusión de mercurio obtenidos durante la campaña experimental

Considerando que el contenido de áridos reciclados en la producción de hormigones influye directamente sus propiedades de porosidad, se plantea que el cálculo del coeficiente de carbonatación del hormigón considere directamente este aspecto.

La figura 6.9 presenta la correlación existente entre los valores de porosidad por intrusión de mercurio y el contenido de árido reciclado en el hormigón según su tipo.

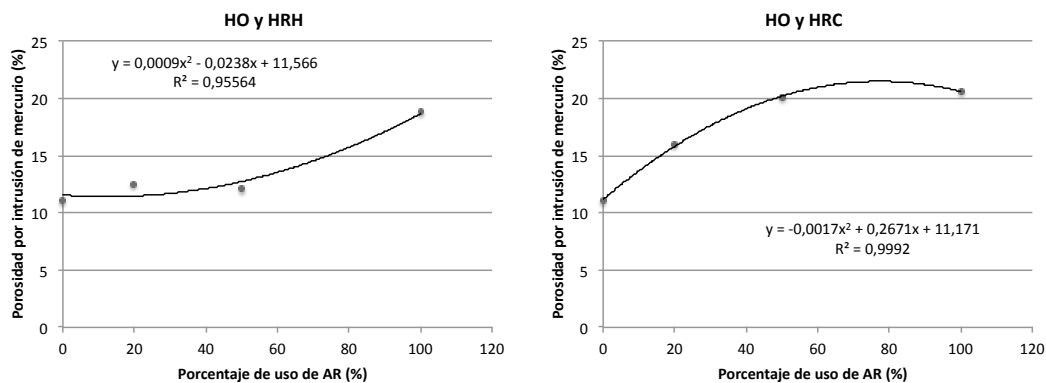


Figura 6.9. Correlación entre los valores de porosidad por intrusión de mercurio de los hormigones y su contenido de árido reciclado AH y AC

En ese contexto, se propone que el cálculo del Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación (VU_C) sea realizado con base en la ley de Fick y a través de las siguientes ecuaciones:

$$VU_C = t_{i_c} + t_p \tag{6.9}$$

VU_C = Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación (años)

t_{i_c} = Tiempo de iniciación por carbonatación (años)

t_p = Tiempo de propagación (años)

$$t_{i_c} = \alpha \left(\frac{c}{K_c} \right)^2 \quad (6.10)$$

α = Conversor de unidad igual a 2,03118543853443E-05

c = Recubrimiento del hormigón (cm)

K_c = Coeficiente de carbonatación (cm/minuto^{0,5})

$$t_p = \left(\frac{80}{\phi} \frac{c}{v_{corr}} \right) \quad (6.1)$$

c = Recubrimiento del hormigón (mm)

v_{corr} = Velocidad de corrosión (μm/año)

ϕ = Diámetro de la armadura (mm)

La estructura de cálculo del tiempo de iniciación es equivalente a la propuesta por la Ley de Fick, mientras que el cálculo del tiempo de propagación es equivalente a la propuesta de la EHE (2008).

El cálculo del coeficiente de carbonatación es realizado a partir de la porosidad del hormigón, determinada en función del contenido y tipo de árido reciclado existente en la estructura:

$$K_c = 2,75E - 04 \ln(P_H) + 3,49E - 04 \quad (6.11)$$

K_c = Coeficiente de carbonatación (cm/minuto^{0,5})

P_H = Porosidad del hormigón (%)

$$P_H = 9,48E - 04 (\%_{AH})^2 - 2,38E - 02 (\%_{AH}) + 11,3685 \quad (6.12)$$

$$P_H = -1,73E - 03 (\%_{AC})^2 + 2,67E - 01 (\%_{AC}) + 11,3685 \quad (6.13)$$

$\%_{AH}$ = Porcentaje de árido reciclado AH (%)

$\%_{AC}$ = Porcentaje de árido reciclado AC (%)

La figura 6.10 presenta la correlación entre los valores de porosidad por intrusión de mercurio obtenidos en la campaña experimental y los obtenidos a través de las formulas 6.12 y 6.13.

La figura 6.11 presenta los valores de vida útil resultantes de la aplicación de las formulas de cálculo del Indicador de Durabilidad y Vida Útil por carbonatación (VU_C).

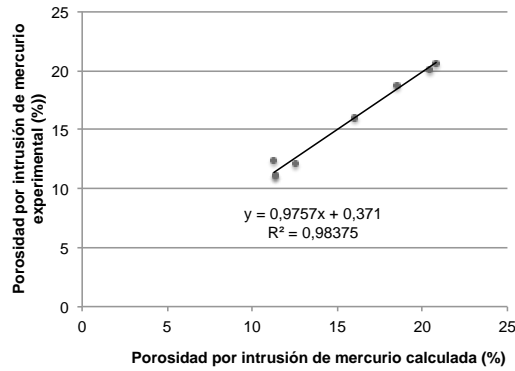


Figura 6.10. Correlación entre los valores de porosidad por intrusión de mercurio de los hormigones obtenidos experimentalmente y a través del uso de las formulas 6.12 y 6.13

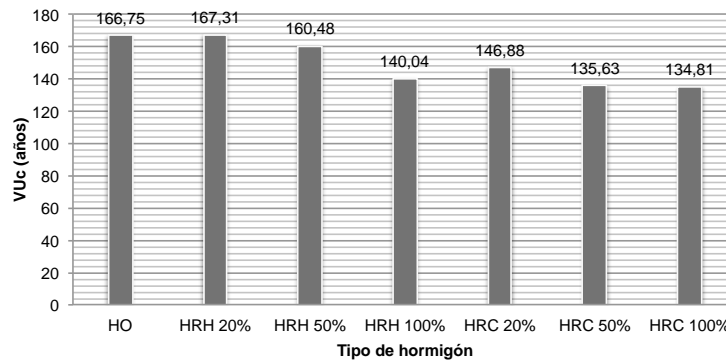


Figura 6.11. Vida útil (en años) de los hormigones analizados de acuerdo con el Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación (VU_c)

La figura 6.12 presenta la correlación entre los valores de vida útil obtenidos a través de la formula de la Ley de Fick y del método propuesto por la CEB (1997), y la formula propuesta. Ambos valores consideran tanto el periodo de iniciación como el de prorrogación del proceso de corrosión.

El periodo de propagación en los tres casos ha sido calculado a través del método propuesto por la EHE (2008). Se considera, por lo tanto, que el indicador de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación proporciona todas las características necesarias para el análisis de la carbonatación de los hormigones reciclados en estudio (validez, confiabilidad, especificidad, sensibilidad, mensurabilidad, relevancia y costo-efectividad).

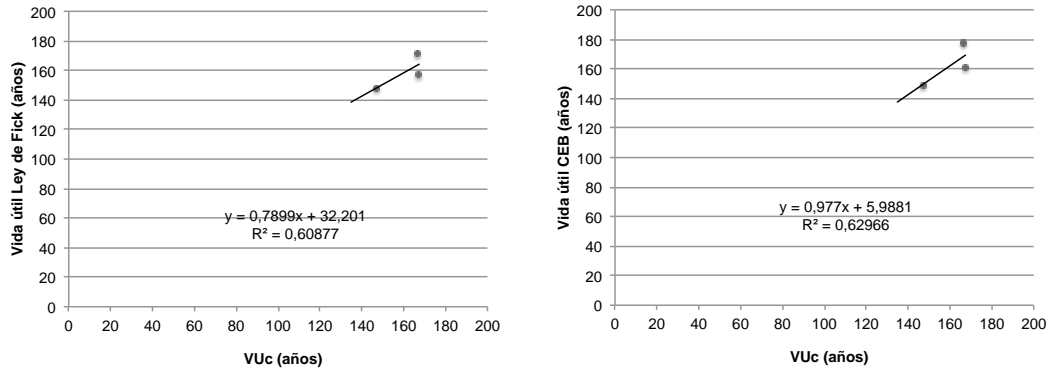


Figura 6.12. Correlación de los valores de vida útil (en años) por carbonatación obtenidos aplicándose directamente los métodos de la Ley de Fick y del CEB (1997) y los resultados obtenidos aplicándose el indicador VU_c

6.2.2 INDICADOR DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL POR PENETRACIÓN DE CLORUROS

Para el análisis de la vida útil por difusión de cloruros, se ha aplicado directamente los valores de coeficiente de difusión de cloruros obtenidos a través de ensayos de laboratorio en las formulas propuestas respectivamente por el modelo indicado por Helene (1997) y por el modelo indicado en el anejo 9 de la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE, 2008).

Se han considerado válidos únicamente los valores de coeficiente de difusión de cloruros calculados a partir de los resultados obtenidos a través del procedimiento indicado en la norma AASTHO T259:2002. Se ha adoptado tanto los valores de coeficiente de difusión calculados a partir del método de Helene (1997), D_{HELENE} , como los valores calculados a partir del método de la EHE (2008), D_{EHE} (figura 5.51).

Los valores de coeficiente de difusión obtenidos por el método prUNE 83987:2007 no han sido adoptados en el análisis pues las condiciones de ensayo no han permitido la obtención de valores legítimos.

El modelo indicado por Helene (1997) para la previsión de la vida útil de hormigones por penetración de cloruros estima el tiempo necesario para que la concentración de cloruros junto a la armadura alcance el valor umbral para producir la corrosión.

El modelo considera que inicialmente el hormigón contiene una cantidad de cloruros C_i , y se basa en la aplicación directa de las siguientes formulas y tabla:

$$x = 2(z) \sqrt{D_{efCl} t} \tag{5.6}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{x,t} - C_i}{C_s - C_i} \tag{5.7}$$

$$\text{erf}(z) = \frac{C_s - 0,30}{C_s - 0,20} \tag{5.8}$$

x = Recubrimiento del hormigón (cm)

D_{efCl} = Coeficiente efectivo de difusión (cm²/año)

t = tiempo de iniciación (años)

z = valor de la función del error de Gauss (Tabla 6.8)

C_{cCl} = Concentración dos cloruros en la profundidad c_{Cl} , en el tiempo t (% en peso del cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón ((% en peso del cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (contenido en peso de cloruros, en el hormigón, como % de la cuantía de cemento del hormigón)

erf (z)= Función del error de Gauss

Tabla 6.8. Valores de z por la aplicación de la función del error de Gauss

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0,00	0	0,4	0,4284	1,2	0,9103
0,01	0,0113	0,45	0,4755	1,3	0,9340
0,05	0,0564	0,5	0,5205	1,4	0,9523
0,10	0,1125	0,6	0,6039	1,5	0,9661
0,15	0,1680	0,7	0,6778	1,6	0,9763
0,2	0,2227	0,8	0,7421	1,7	0,9838
0,25	0,2763	0,9	0,7969	1,8	0,9891
0,3	0,3286	1	0,8427	1,9	0,9928
0,35	0,3794	1,1	0,8802	2	0,9953

Por otra parte, el modelo propuesto por la EHE (2008) propone que el cálculo del tiempo de iniciación de la corrosión por penetración de cloruros de un hormigón sea realizado directamente a través de las siguientes ecuaciones:

$$t = \left(\frac{x}{K_{Cl}} \right)^2 \tag{5.10}$$

K_{Cl} = Coeficiente de penetración de cloruros

t_i = Tiempo de iniciación (años)

x = Recubrimiento del hormigón (mm)

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D_{t_{Cl}}} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{cr} - C_i}{C_s - C_i}} \right) \quad (5.11)$$

K_{Cl} = Coeficiente de penetración de cloruros (mm/año^{0,5})

α = Conversor de unidad igual a 56157

$D_{t_{Cl}}$ = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros para la edad t_{Cl} (cm²/s)

C_{cr} = Concentración crítica dos cloruros (% en peso de cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (% en peso de cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón (% en peso de cemento)

$$D_{t_{Cl}} = D_{t_o} \left(\frac{t_o}{t_{Cl}} \right)^n \quad (6.14)$$

t_{Cl} = Edad estimada para que los hormigones en análisis alcancen la concentración crítica de cloruros (años)

D_{t_o} = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros para la edad t_o obtenido mediante ensayos específicos de difusión (cm²/s)

t_o = Edad del hormigón al momento de realización del ensayo (años)

n = Factor de edad igual a 0,5

Para la aplicación del método indicado por Helene (1997) en los valores obtenidos en el plan experimental, se ha considerado las ecuaciones 5.6 y 5.7 y las variables indicadas en la tabla 6.9.

Tabla 6.9. Variables adoptadas por hormigón para aplicación del método de previsión de vida útil propuesto por Helene (1997)

Variable	Unidad	Tipo de hormigón				
		HO	HRH 20%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 100%
x	cm	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
D_{HELENE}	cm ² /s	1,16E-07	1,26E-07	1,19E-07	1,43E-07	2,02E-07
D_{EHE}	cm ² /s	1,02E-07	1,10E-07	1,04E-07	1,25E-07	1,78E-07
z	-	0,4858	0,4858	0,4858	0,4858	0,4858
C_{cr}	%	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
C_s	%	1,1709	1,1709	1,1709	1,1709	1,1709
C_i	%	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Según recomienda la EHE (2008), se ha considerado que el valor de la concentración crítica es equivalente a 0,6%, mientras la concentración inicial es de 0,05%, ambos expresados como porcentaje de la cuantía de cemento del hormigón. Ya la concentración superficial de cloruros fue considerada equivalente a 0,14%, expresada como porcentaje de la cuantía de hormigón.

Los cálculos han consistido básicamente en reemplazar el valor de x por un valor de recubrimiento pre determinado (25 mm) y adoptar el coeficiente de difusión determinado mediante los ensayos. Los resultados se presentan en la figura 6.13.

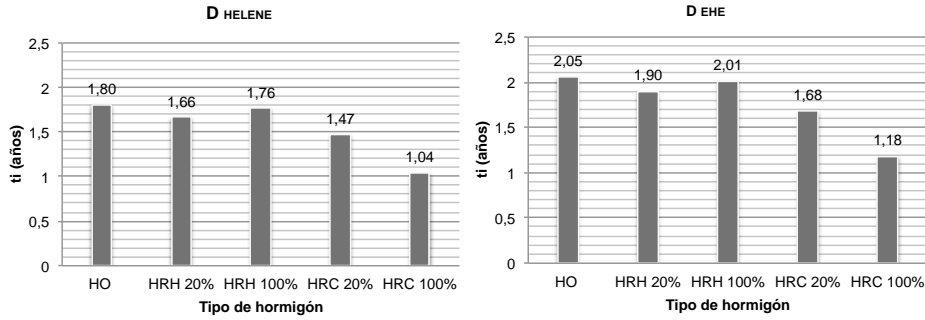


Figura 6.13. Tiempo de iniciación (en años) por penetración de cloruros calculado de acuerdo con el método de Helene (1997) y a partir de los valores de coeficiente de difusión D_{HELENE} y D_{EHE}

Para la aplicación de esos mismos resultados en el método indicado por EHE (2008), se ha considerado las variables indicadas en la tabla 6.10. Los valores de la concentración de cloruros han sido los mismos adoptados para el calculo anterior. Además, se ha estimado un periodo de 8 años como el tiempo necesario para que los hormigones en análisis alcanzaran la concentración crítica de cloruros de 0,6%. Se indican los resultados en la figura 6.14.

Tabla 6.10. Variables adoptadas por hormigón para aplicación del método de previsión de vida útil propuesto por EHE (2008)

Variable	Unidad	Tipo de hormigón				
		HO	HRH 20%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 100%
x	mm	25	25	25	25	25
D_{HELENE}	cm ² /s	1,16E-07	1,26E-07	1,19E-07	1,43E-07	2,02E-07
D_{EHE}	cm ² /s	1,02E-07	1,10E-07	1,04E-07	1,25E-07	1,78E-07
t_0	año	0,0767	0,0767	0,0767	0,0767	0,0767
t	año	8	8	8	8	8
n	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ccr	%	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Cs	%	1,1709	1,1709	1,1709	1,1709	1,1709
Ci	%	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

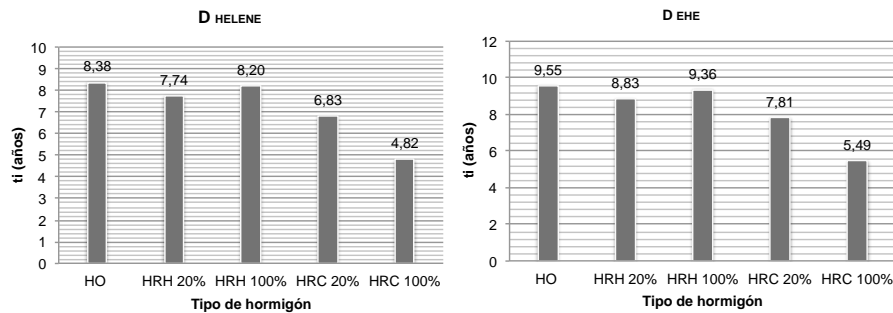


Figura 6.14. Tiempo de iniciación (en años) por penetración de cloruros calculado de acuerdo con el método de EHE (2008) y a partir de los valores de coeficiente de difusión D_{HELENE} y D_{EHE}

La correlación entre los dos métodos analizados es comprobada en la figura 6.15.

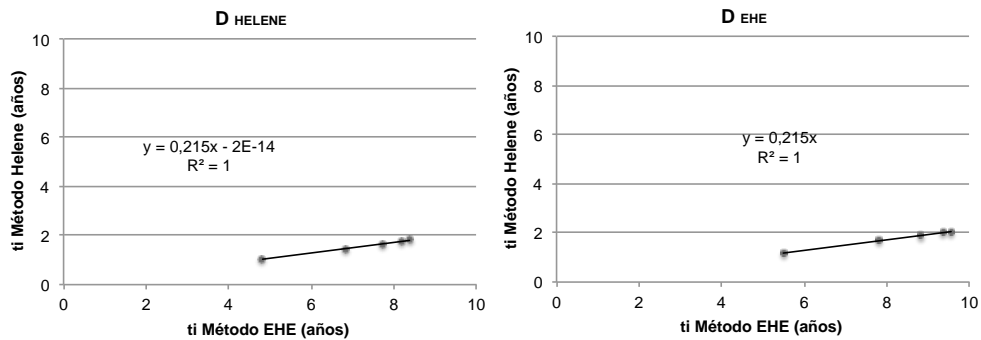


Figura 6.15. Correlación entre el tiempo de iniciación (en años) por penetración de cloruros obtenido a través de los métodos propuestos por Helene (1997) y por la EHE (2008)

Al analizarse los resultados de las figuras 6.13, 6.14 y 6.15, se puede afirmar que:

- El método de cálculo propuesto por Helene (1997) es más conservador que el método propuesto por la EHE (2008). Los valores de tiempo de iniciación obtenidos a través del método de Helene (1997) son inferiores a los presentados por el método EHE (2008). Esta diferencia se debe al hecho de que el método de la EHE (2008) realiza el ajuste del valor del coeficiente obtenido experimentalmente en función del tiempo estimado de alcance de la concentración crítica de cloruros (ecuación 6.14), mientras el método de Helene (1997) no considera esta variación en el tiempo;
- No obstante, independiente del método adoptado, todos los hormigones han presentado periodos de iniciación bajos. Esto es un reflejo de la propia dosificación característica de esos hormigones, que presentan en todos los casos una relación agua/cemento alta.
- Todos los resultados obtenidos han presentando comportamiento similar, independiente del método de cálculo o del coeficiente de difusión adoptado:
 - El uso de áridos reciclados AH en la producción de hormigón no promueve un descenso en la vida útil de la estructura por ataque de cloruros. Los valores de vida útil de los hormigones HO y HRH se mantienen en el mismo rango.
 - Los hormigones HRC presentan un descenso gradativo de la vida útil por ataque de cloruros, en comparación al hormigón de referencia, a medida que contienen mayor contenido de árido AC en su composición.

Ambos métodos se consideran validos para realizar la comparación de los valores de vida útil entre hormigones reciclados y convencional. Esta comparación ha permitido identificar que existe una diferencia entre el tiempo de iniciación del proceso de corrosión por cloruros entre un hormigón

convencional y hormigones reciclados, aunque esta diferencia no es significativa como se podría esperar.

Por otro lado, teniendo en cuenta la importancia de la adopción de un indicador que sea válido, confiable, específico, sensible y, principalmente, mensurable, relevante y efectivo económicamente, se estimula que el cálculo del Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros (VU_{PC}) considere el uso del contenido de árido reciclado utilizado, como una de las variables de aplicación.

En ese sentido, se han identificado correlaciones de carácter polinomial establecidas entre el tipo y contenido de árido reciclado utilizado y los valores de coeficiente de difusión obtenidos, tanto para los coeficientes D_{HELENE} (figura 6.16) como para los coeficientes D_{EHE} (figura 6.17).

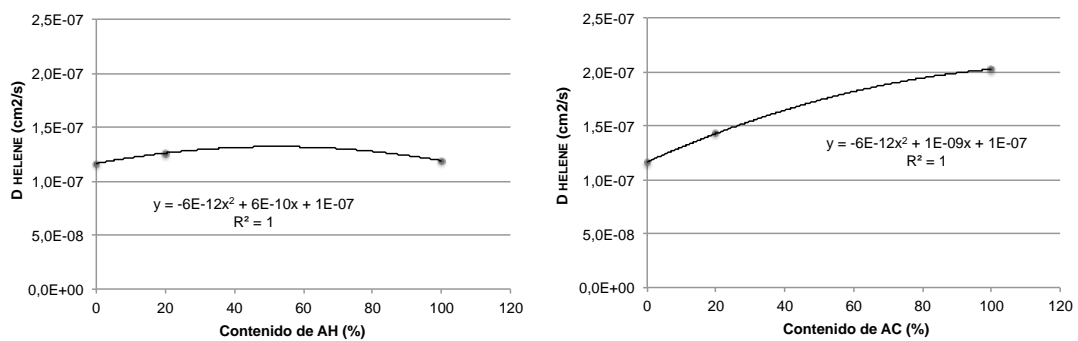


Figura 6.16. Correlación entre los coeficientes de difusión D_{HELENE} de los hormigones y su contenido de árido reciclado

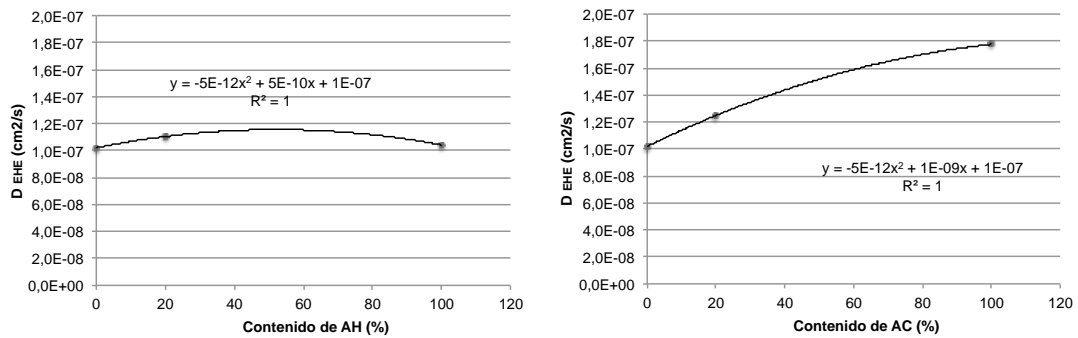


Figura 6.17. Correlación entre los coeficientes de difusión D_{EHE} de los hormigones y su contenido de árido reciclado

Tanto las correlaciones realizadas con los valores de coeficiente D_{HELENE} como las correlaciones realizadas con los valores de coeficiente D_{EHE} se presentan válidas.

Para el desarrollo del indicador, no obstante, se decide adoptar como base de cálculo tanto el método propuesto por la EHE (2008) como los valores de coeficiente de difusión obtenidos a través de este mismo método (D_{EHE}).

Se asume que esta metodología, aunque que menos conservadora, sea más coherente con la realidad, ya que realiza el ajuste del valor del coeficiente obtenido mediante ensayo en función del tiempo (ecuación 6.14).

En consecuencia, se propone una nueva estructura del cálculo del tiempo de iniciación por penetración de cloruros a ser incorporado al indicador VU_{PC} . El modelo resultante es calculado de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$VU_{PC} = t_{i_{PC}} + t_p \quad (6.15)$$

VU_C = Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros (años)

$t_{i_{PC}}$ = Tiempo de iniciación por penetración de cloruros (años)

t_p = Tiempo de propagación (años)

$$t_{i_{PC}} = \left(\frac{c}{K_{PC}} \right)^2 \quad (6.16)$$

$$t_p = \left(\frac{80}{\phi} \frac{c}{v_{corr}} \right) \quad (6.1)$$

K_{Cl} = Coeficiente de penetración de cloruros ($\text{mm/año}^{0,5}$)

c = Recubrimiento del hormigón (mm)

v_{corr} = Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)

ϕ = Diámetro de la armadura (mm)

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D_{t_{Cl}}} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{cr} - C_i}{C_s - C_i}} \right) \quad (5.11)$$

α = Conversor de unidad igual a 56157

$D_{t_{Cl}}$ = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros para la edad t_{Cl} (cm^2/s)

C_{cr} = Concentración crítica dos cloruros (% en peso de cemento)

C_s = Concentración dos cloruros en la superficie del hormigón (% en peso de cemento)

C_i = Concentración inicial de cloruros en el interior del hormigón (% en peso de cemento)

$$D_{t_{Cl}} = D_{t_o} \left(\frac{t_o}{t_{Cl}} \right)^n \quad (6.14)$$

t_{Cl} = Edad estimada para alcance de la concentración crítica de cloruros (años)

D_{t_o} = Coeficiente efectivo de difusión de cloruros estimado para la edad t_o (cm^2/s)

t_o = Edad estimada igual a 0,0767 (años)

n = Factor de edad igual a 0,5

$$D_{t_o} = -4,94E - 12(\%_{AH})^2 + 5,16E - 10(\%_{AH}) + 1,02E - 07 \quad (6.17)$$

$$D_{t_o} = -4,80E - 12(\%_{AC})^2 + 1,24E - 09(\%_{AH}) + 1,02E - 07 \quad (6.18)$$

$\%_{AH}$ = Porcentaje de árido reciclado AH (%)

$\%_{AC}$ = Porcentaje de árido reciclado AC (%)

La figura 6.18 presenta los valores resultantes de la aplicación de la nueva formula. Se observan valores bastante coherentes con los resultados obtenidos a partir de los coeficientes de difusión experimentales.

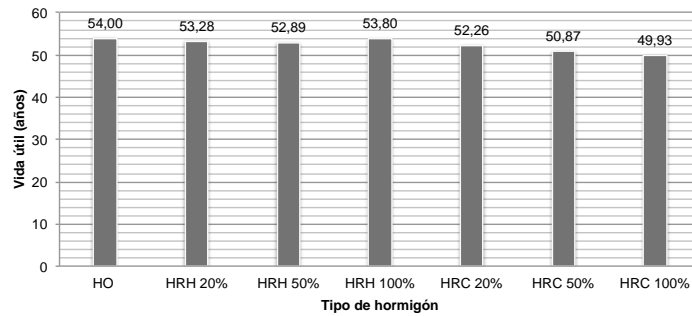


Figura 6.18. Vida útil (en años) de los hormigones analizados de acuerdo con el Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros (VU_{PC})

La figura 6.19 presenta la correlación entre los valores de vida útil obtenidos por la formula original propuesta por la EHE (2008) y los datos de coeficiente D_{EHE} , y la formula propuesta para el indicador VU_{PC} , ambos considerando tanto el periodo de iniciación como de propagación de la corrosión de la armadura. Como resultado, se obtiene una correlación que valida claramente el uso de los valores propuestos por el indicador VU_{PC} .

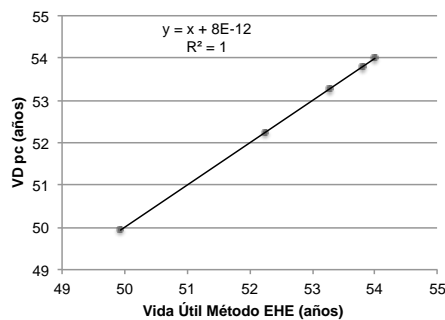


Figura 6.19. Correlación entre las vidas útiles (en años) por penetración de cloruros obtenidas a través del método de la EHE (2008) y del indicador VU_{PC}

6.2.3 ÍNDICE DE VIDA ÚTIL TOTAL

El anejo nº9 de la EHE (2008) propone que el análisis de la durabilidad de un hormigón sea realizado a través de la comprobación del Estado Límite de Durabilidad de este material, es decir, el

estado producido por las acciones físicas y químicas, de carácter distinto del producido por las cargas y acciones estructurales, que pueden degradar el elemento hasta límites inadmisibles.

Este análisis consiste en comprobar si el tiempo necesario para que el agente agresivo en análisis produzca un ataque o degradación relevante es mayor o igual al valor de cálculo de la vida útil. La vida útil de cálculo, por su parte, corresponde al valor útil nominal de proyecto, definido en función de las características del proyecto (tabla 6.1) y multiplicado por un coeficiente de seguridad, normalmente equivalente al valor de 1,10. Las etapas de este análisis corresponden a:

- Definición del valor nominal de la vida útil de la estructura;
- Identificación de las acciones que pueden afectar a la durabilidad;
- Identificación de los mecanismos preferentes de degradación;
- Identificación del estado límite de durabilidad;
- Selección del método de comprobación;
- Selección de los modelos de comportamiento;
- Comprobación del estado límite;
- Establecimiento de las prescripciones de proyecto;
- Definición, en su caso, de medidas especiales de mantenimiento.

En ese sentido, el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados por durabilidad y vida útil propuesto en este trabajo consiste en evaluar la estructura en análisis de modo a obtener un índice (Índice de Vida Útil Total) que corresponde en la práctica al Estado Límite de Durabilidad de la estructura.

Por considerar que los mecanismos de degradación preferenciales pueden ser la carbonatación y la penetración de cloruros, el Índice de Vida Útil Total (I_{VU}) propuesto corresponde a la evaluación conjunta de todos los indicadores de Durabilidad y Vida Útil descritos anteriormente.

Cada indicador proporciona el valor de vida útil estimado que la estructura en análisis puede alcanzar en función del mecanismo de degradación medido. El menor valor de vida útil encontrado para los dos indicadores corresponderá al I_{VU} del hormigón analizado.

El Índice de Vida Útil Total (I_{VU}) permite no solo estipular valores mínimos de cumplimiento, sino también comparar los valores obtenidos entre los hormigones reciclados en análisis y su equivalente convencional, y identificar el mecanismo de degradación más actuante.

Al analizarse el Índice de Vida Útil Total de un hormigón reciclado en comparación al índice obtenido para su equivalente convencional, se considera que el uso del hormigón reciclado representará una solución más sostenible que el uso del hormigón convencional equivalente, siempre y cuando el valor obtenido cumpla con las condiciones de vida útil de cálculo del proyecto.

En ese contexto, y a la vista de los resultados obtenidos en los puntos 6.2.1 y 6.2.2, se puede afirmar que (tabla 6.11):

- El principal mecanismo de degradación limitador de uso de los hormigones estudiados es la corrosión de la armadura por penetración de cloruros. En todos los casos, el Índice de Vida Útil Total (I_{VU}) correspondió al valor obtenido a través del Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros (VU_{PC});
- La producción de hormigones con árido reciclado AH, en cualquier proporción y en las condiciones adoptadas en el presente estudio, representa claramente una solución más sostenible que la producción de hormigones con 100% de árido convencional, para estructuras con vida útiles de cálculo de hasta 50 años;
- Para estructuras con vida útiles de cálculo de 45 años, la producción de hormigones con árido reciclado AC, en cualquier proporción y en las condiciones adoptadas en el presente estudio, representa claramente una solución más sostenible que la producción de hormigones con 100% de árido convencional. Por otro lado, para estructuras con vida útiles de cálculo de 50 años, el uso comprobadamente sostenible en comparación a hormigones convencionales en las mismas condiciones, es identificado solo para hormigones con hasta 50% de árido reciclado AC;
- En el caso de estructuras con vida útil de cálculo de 55 años, ninguno hormigón estudiado, incluso el hormigón de referencia, se ha presentado adecuado. Todos los resultados de I_{VU} encontrados se presentan por debajo de este valor.

Tabla 6.11. Índices de Vida Útil Total y confirmación de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en el trabajo

Hormigón	VU_C	VU_{PC}	I_{VU}	Uso sostenible por vida útil de cálculo (años)		
				45	50	55
HO	166,75	54,00	54,00	-	-	No cumple
HRH 20%	167,31	53,28	53,28	Cumple	Cumple	No cumple
HRH 50%	160,48	52,89	52,89	Cumple	Cumple	No cumple
HRH 100%	140,04	53,80	53,80	Cumple	Cumple	No cumple
HRC 20%	146,88	52,26	52,26	Cumple	Cumple	No cumple
HRC 50%	135,63	50,87	50,87	Cumple	Cumple	No cumple
HRC 100%	134,81	49,93	49,93	Cumple	No Cumple	No cumple

Es importante destacar que el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados por durabilidad y vida útil propuesto también permite hacer una evaluación en sentido contrario. El análisis también puede, a partir de condiciones pre determinadas de proyecto, identificar hasta que valor de vida útil de proyecto una determinada estructura puede presentar para que el uso de una determinada solución que prevé el uso de un hormigón reciclado pueda ser adoptada en lugar de su equivalente convencional.

Es decir, partiéndose de la premisa que las acciones que pueden afectar a la durabilidad y los mecanismos preferentes de degradación de una estructura de hormigón convencional y su equivalente reciclado son iguales, el análisis propone la identificación del punto en que ambas soluciones presentan condiciones de durabilidad suficientes para atender las condiciones de una vida útil nominal estipulada en proyecto.

La comparación entre Índices de Vida Útil Total se define con la categorización de niveles de uso para las estructuras de hormigón en análisis (tabla 6.12).

Tabla 6.12. Categorías de uso en función del Índice de Vida Útil Total

Categoría de uso	Tipo de estructura	Vida útil nominal (años)	I _{VU}
1	Estructuras de carácter temporal	3 – 10	3,3 - 11
2	Estructuras de carácter temporal Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal	10 - 15	11 – 16,5
3	Estructuras de carácter temporal Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas	15 - 50	16,5 – 55
4	Estructuras de carácter temporal Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	> 50	> 55
5	Estructuras de carácter temporal Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media Edificios de carácter monumental o de importancia especial Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	> 100	> 110

Para la definición de las categorías, se ha considerado las condiciones de vida útil nominal determinadas por la EHE (2008) para tipos de estructura.

En ese contexto, aplicándose los parámetros utilizados en los puntos 6.2.1 y 6.2.2, adoptándose los valores de vida útil de calculo indicados por la EHE (2008) y solucionado las ecuaciones propuestas en cada indicador, se puede afirmar que:

- En función del proceso de **corrosión por carbonatación**, los hormigones reciclados, en cualquier proporción y tipo, siempre son una solución más sostenible de uso que su equivalente convencional (figura 6.20);
- En función del proceso de **corrosión por penetración de cloruros**, ningún hormigón reciclado, sea reciclado o convencional, representa una solución más sostenible para usos en las categorías 4 y 5. Para la categoría 3, considerando una vida útil máxima de cálculo de 50 años, los hormigones reciclados HRH siempre son más sostenibles, mientras que los hormigones HRC solo son más sostenibles cuando la sustitución de árido convencional por árido AC se limita al valor máximo de 93,22%. Por fin, los hormigones reciclados, en cualquier proporción, siempre son una solución más sostenible hasta la categoría de uso 2. (figura 6.21).

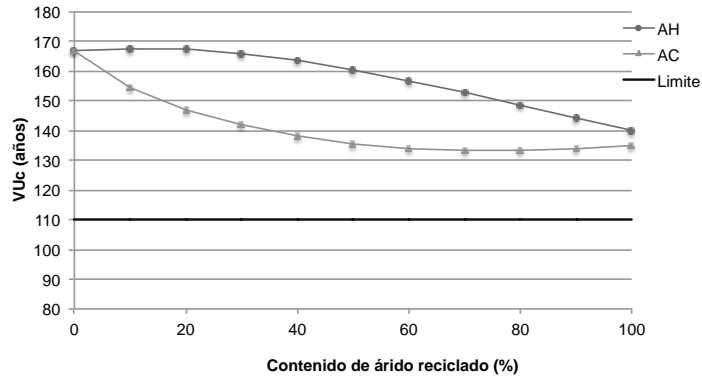


Figura 6.20. VU_c de los hormigones en función del contenido de árido reciclado

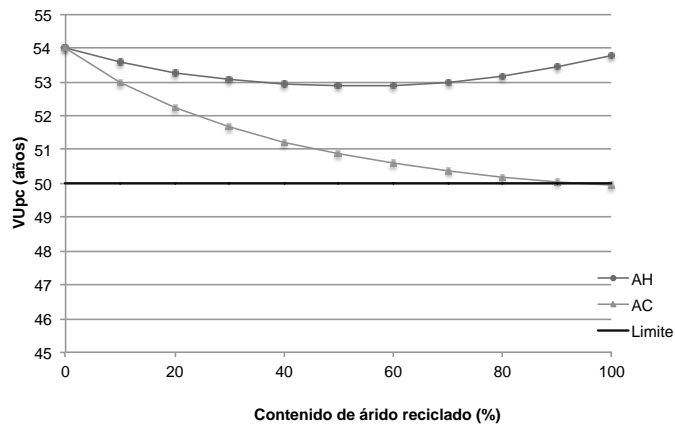


Figura 6.21. VU_{pc} de los hormigones en función del contenido de árido reciclado

La validez de esos resultados es confirmada al realizarse la comparación entre los valores de vida útil calculados a través del uso directo de los resultados experimentales con los obtenidos a través de la aplicación directa del indicadores creados.

Las figuras 6.22 y 6.23 comparan los valores de vida útil calculados a través del uso directo de los resultados experimentales con los obtenidos a través de la aplicación directa de los indicadores generados.

El análisis de esos gráficos muestra que los resultados obtenidos a través de los indicadores son válidos, coherentes con la realidad experimentada y a favor de la seguridad.

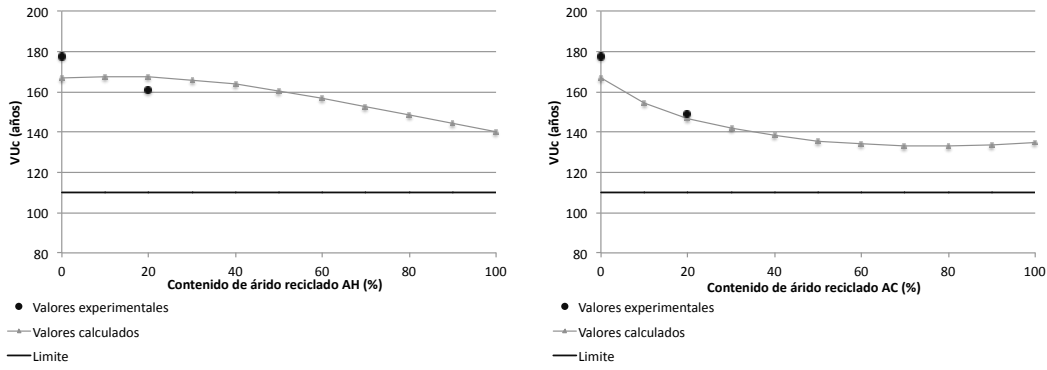


Figura 6.22. VU_c de los hormigones en función del contenido de árido reciclado

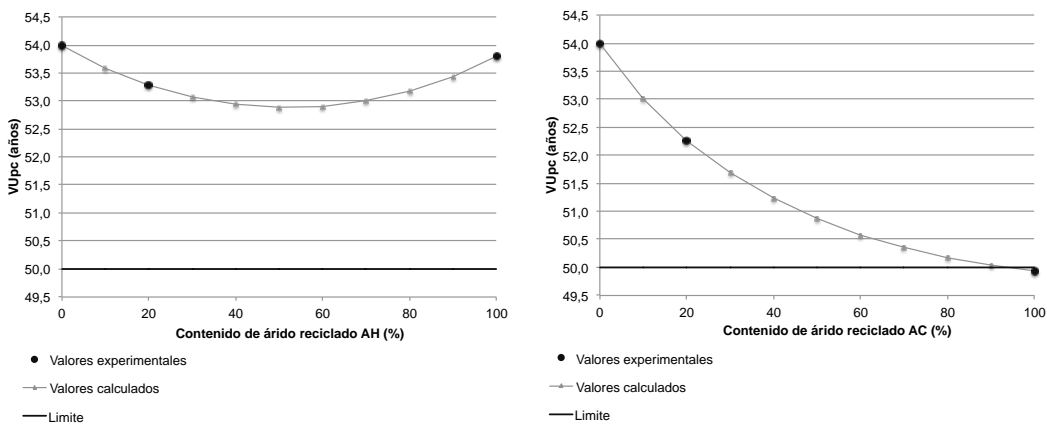


Figura 6.23. VU_{pc} de los hormigones en función del contenido de árido reciclado

6.3 DEFINICIÓN Y APLICACIÓN DE LOS INDICADORES Y ÍNDICE DE EMISIONES DE CONTAMINANTES

Según Kosson y col. (2002), un plan de trabajo para la evaluación de la lixiviación de contaminantes debe:

- proporcionar estimaciones conservadoras pero lo más realísticas posibles de las emisiones de contaminantes liberadas por lixiviación del material evaluado, siempre considerando los componentes de interés, las condiciones ambientales y las opciones de gestión que caracterizan el escenario en análisis;
- utilizar un plan de trabajo técnica y económicamente factible (uso de métodos de laboratorio estandarizados aplicables a periodos de tiempo razonables);
- proporcionar una evaluación de carácter flexible que permita que el análisis sea adaptable a las exigencias / necesidades de los usuarios del material;

- interpretar la nueva información obtenida, aprovechando la información previa, y fomentar mejoras en las prácticas de gestión del material en análisis;

En consonancia con estos objetivos, y considerando el contexto de investigación de hormigones hechos con áridos reciclados, el presente estudio se ha limitado al análisis de:

- El árido reciclado propiamente dicho, como material granular, considerando las etapas del ciclo de vida de un hormigón relacionadas a la provisión de materias prima y a la demolición (Etapas 1 y 5 de la figura 2.10);
- Los hormigones producidos con ese material, como material monolítico, considerando esencialmente su influencia en la etapa de uso del ciclo de vida de un hormigón (Etapa 4 de la figura 2.10).

Para ambos casos, se ha realizado los siguientes pasos:

- Definición del escenario y de los mecanismos de transporte que controlan la liberación de contaminantes;
- Análisis del conocimiento previo del elemento en análisis y definición del método de ensayo a aplicarse;
- Medición intrínseca de los parámetros de lixiviación del material en análisis, a través del uso de métodos de ensayos consolidados en el área de investigación de áridos reciclados;
- Aplicación de los parámetros medidos en modelos de lixiviación para estimar los flujos de liberación acumulados a largo plazo acumulado;
- Comparación entre los resultados estimados de liberación y los criterios de aceptación estipulados por la normativa española.

En cuanto a la definición de los métodos de ensayos aplicados en este estudio, es importante resaltar que los métodos de caracterización más detallados generan estimaciones más precisas y acordes con la realidad. Al mismo tiempo, ofrecen resultados con márgenes de seguridad al reducir el grado de liberación sobreestimado.

Por otro lado, por lo general, estos métodos comprenden en más costos y tiempo que los métodos más simplificados. Sea por la limitada cantidad de residuos manejada, las limitaciones de tiempo, o por otras razones, la realización de métodos detallados no siempre es justificada y/o considerada viable (Kosson y col., 2002).

Debido a las características propias de ambos materiales en análisis (áridos reciclados AH y AC, y hormigones reciclados HRH y HRC), y al conocimiento previo existente de un modo general respecto a los áridos reciclados, se ha optado por realizar un ensayo de conformidad simplificado para el análisis de los áridos reciclados en su estado granular.

En el caso de que los resultados obtenidos no cumplan con los límites estipulados por la normativa española, un ensayo de caracterización básica más detallado es aplicado para los hormigones hechos con el material reciclado no aprobado en la prueba de conformidad.

Los ensayos de lixiviación realizados corresponden al grupo de ensayos de impacto ambiental por lixiviación del plan experimental propuesto en la tabla 4.9. Son ellos:

- Norma UNE-EN 12457-4:2003: El método de ensayo indicado por esta normativa es realizado como el ensayo de conformidad del material granular. Aplicado a los áridos reciclados, este ensayo identifica las propiedades características de esos materiales frente a su comportamiento lixivante (la existencia de elementos agresivos al medio en la composición del líquido lixivante y los factores que controlan su capacidad lixivante). Además, verifica el cumplimiento de los requisitos ambientales de lixiviación exigidos para esos materiales, tanto para su uso en la construcción civil en la producción de hormigones como para su destinación final;
- Norma NEN 7345 (1995): El método de ensayo indicado por esta normativa es realizado como el ensayo de caracterización básica del material monolítico. A través de ello, verificase si los hormigones hechos con árido reciclado cumplen con los requisitos ambientales de lixiviación exigidos por esos materiales. En este análisis, se tiene en cuenta el comportamiento lixivante de los áridos reciclados, identificados previamente en el ensayo de conformidad UNE-EN 12457-4:2003.

Partiéndose de estas premisas, se definen los indicadores y el índice de emisiones de contaminantes adoptados en este trabajo como herramientas para el análisis comparativo de la sostenibilidad de hormigones convencionales y reciclados.

Los indicadores propuestos se basan en el uso directo de los resultados de emisiones lixiviadas obtenidos en los ensayos de disponibilidad y, si es aplicable, en los ensayos de difusión.

En primer lugar, el árido reciclado en su estado granular debe ser analizado a través de una prueba de cumplimiento basada en el concepto de equilibrio entre las fases líquida y sólida (pH, conductividad y potencial redox). En este trabajo se propone el uso del método de ensayo indicado por la norma europea UNE EN 12457-4:2003.

Los valores obtenidos deben ser comparados a los valores límite de la normativa española (Decisión del Consejo 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE). Si los valores obtenidos cumplen los límites exigidos, se asume que el hormigón producido con el material analizado no ofrece ningún riesgo ambiental al medio.

Si alguno valor de lixiviado obtenido no cumple los límites exigidos, se debe analizar el material reciclado como componente del hormigón, a través de una prueba de difusión basada en el concepto de transferencia de masa, conforme realizada en el plan de análisis de impacto ambiental propuesto en este trabajo. En este trabajo se propone el uso del método de ensayo indicado por la norma holandesa NEN 7345:1995.

Los valores obtenidos deben ser comparados a los valores límite establecidos para esta norma por el Build Materials Decree (1995):

- Si los valores obtenidos cumplen los límites U_1 exigidos, se asume que el hormigón reciclado en análisis no ofrece ningún riesgo ambiental al medio y pueden ser utilizados sin cualquiera restricción de carácter ambiental.
- Si los valores obtenidos cumplen los límites U_2 exigidos, se asume que el hormigón reciclado pueden ser utilizados con algunas restricciones de carácter ambiental. En este caso, un nuevo análisis general de la sostenibilidad debe ser realizado, considerando los ajustes obligatorios a las condiciones de escenario y material en función de las restricciones ambientales necesarias.
- Si alguno valor de lixiviado obtenido no cumple los límites exigidos, en este caso, se considera que el hormigón reciclado en análisis representa riesgo ambiental al medio, por lixiviación de contaminantes, y, por lo tanto, no puede ser considerado como una solución sostenible en comparación a su hormigón convencional equivalente.

El índice de Emisiones de Contaminantes corresponde, por lo tanto, al análisis conjunto de todos los indicadores de Emisiones de Contaminantes, sea para el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de disponibilidad o en el ensayo de difusión. El índice considera que el material es sostenible si todos los valores de los indicadores, en conjunto, cumplen con las exigencias de la normativa en uso.

La metodología adoptada es presentada en la figura 6.24.

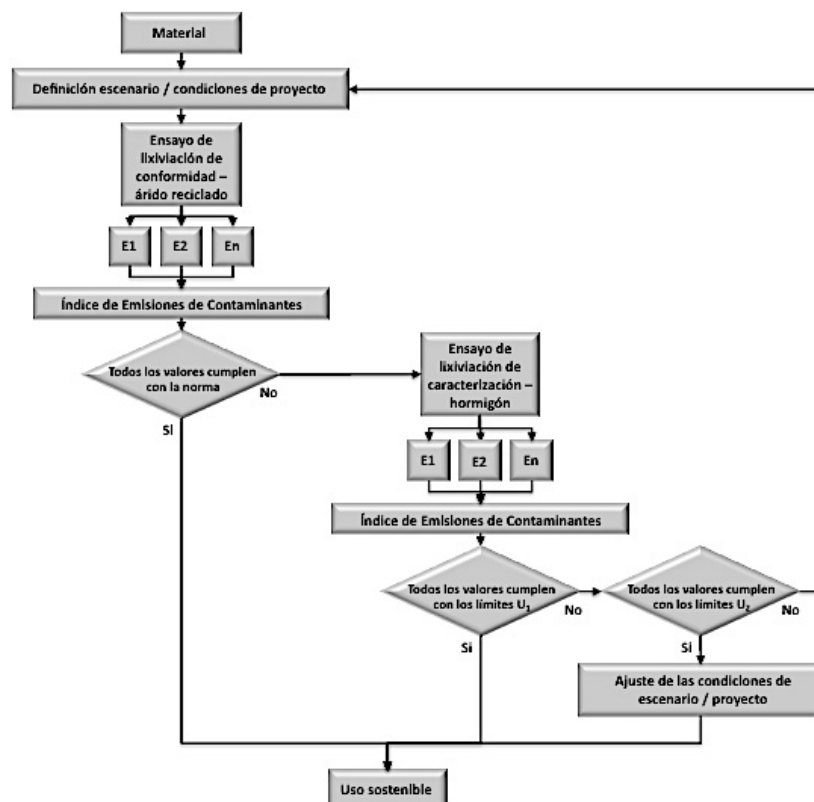


Figura 6.24. Metodología de análisis de la sostenibilidad por impacto ambiental por lixiviación – uso de indicadores y índices de emisiones de contaminantes

Como resultado del análisis de los hormigones producidos en el trabajo (tabla 6.13):

- La sostenibilidad de los hormigones HRH fue comprobada directamente a través del ensayo de disponibilidad realizado en el árido AH (tabla 5.13). No fue necesaria, por lo tanto, la realización del ensayo de difusión para análisis del material en estado monolítico. Se considera que la producción de un hormigón reciclado con árido AH en cualquiera proporción no implica ningún riesgo ambiental al medio por lixiviación de contaminantes.
- Como los áridos reciclados AC han presentado un elemento lixiviado en cantidad superior a la establecida por el límite de la norma (tabla 5.13), se ha realizado el ensayo de difusión para análisis del material en estado monolítico para una comprobación más detallada. Según los resultados, indicados en la tabla 5.14 de este documento, las emisiones acumuladas de los hormigones HRC fueran siempre inferiores a los límites U_1 indicados por la NEN 7345:1995, en todas las proporciones de uso de árido reciclado analizadas (20, 50 y 100%). En consecuencia, se considera que la producción de un hormigón reciclado con árido AC en cualquiera proporción no implica ningún riesgo ambiental al medio por lixiviación de contaminantes.

Tabla 6.13. Índices de Emisiones de Contaminantes y confirmación de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en el trabajo

Hormigón	Análisis realizado		I _{ec}
	Material granular	Material monolítico	
HRH 20%	Cumple	-	Cumple
HRH 50%	Cumple	-	Cumple
HRH 100%	Cumple	-	Cumple
HRC 20%	No cumple	Cumple	Cumple
HRC 50%	No cumple	Cumple	Cumple
HRC 100%	No cumple	Cumple	Cumple

6.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Se ha presentado un método de análisis de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en este trabajo, basado en un análisis simplificado y comparativo entre índices que consideran las condiciones de durabilidad e impacto ambiental de esos materiales.

Para llegar a obtener este método se ha realizado una amplia campaña experimental que ha objetivado el análisis de varias propiedades de dos tipos distintos de hormigones reciclados, ambos compuestos por áridos reciclados cuyas características no se adecuan a las condiciones impuestas por la EHE (2008) para uso en hormigones. Con el análisis de todos estos resultados se ha podido mensurar el comportamiento de cada uno de ellos frente a las propiedades de durabilidad por carbonatación y penetración de cloruros e de impacto ambiental por lixiviación, llegando de esta forma a los indicadores propuestos.

Respecto a los indicadores de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación y Penetración de Cloruros, se debe resaltar que:

- Diversos modelos de previsión de vida útil fueron identificados en la bibliografía. Se ha identificado que la mayoría de ellos se basan en el conocido modelo de Tuutti. Aplicados tanto al análisis del fenómeno de carbonatación como al de penetración de cloruros, estos modelos pueden considerar el tiempo de iniciación del proceso de corrosión (tiempo que el CO_2 o los cloruros tardan en atravesar el recubrimiento), el tiempo de propagación de la corrosión (tiempo en que el acero pierde su capa pasivante) o ambos;
- Se observa, sin embargo, que existe una carencia por métodos de previsión de la vida útil destinado al análisis de hormigones reciclados. Con características distintas a las presentadas por hormigones convencionales, el análisis de la vida útil de esos materiales debe considerar determinados aspectos como su posible mayor porosidad y permeabilidad;
- Los métodos de previsión de vida útil por carbonatación y penetración de cloruros propuestos por la EHE (2008) se presentan válidos para la aplicación de hormigones reciclados, dentro del universo de uso permitido por la referida norma (uso de hasta 20% de áridos reciclados compuestos por áridos reciclados de hormigón). Sin embargo, el uso de estos métodos en el análisis de hormigones hechos en condiciones distintas a las impuestas por la norma debe considerar algunos ajustes;
- En base a los modelos de tiempo de iniciación propuestos por la EHE (2008), este trabajo propuso ampliarlos a las estructuras de hormigón reciclado analizadas en este estudio. Las adaptaciones se realizaron aplicando el conocimiento adquirido durante la campaña experimental referente al progreso del frente de carbonatación y al ingreso de los cloruros en los hormigones reciclados y sus demás propiedades correlacionadas;
- Como los indicadores han sido desarrollados para aplicación en un análisis comparativo entre los hormigones reciclados y su equivalente convencional producidos en este trabajo, el principal aspecto a valorar es la influencia que los áridos reciclados utilizados pueden generar en la matriz del cemento, de modo a afectar el tiempo de iniciación del proceso de corrosión;
- En consecuencia, las ecuaciones para el cálculo de los indicadores de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación y Penetración de Cloruros se definen claramente por el tiempo de iniciación del proceso de corrosión de la armadura;
- Durante la aplicación de esos indicadores, se ha considerado parámetros de análisis relacionados a ambientes de exposición de degradación media a baja, con lo cual es bastante satisfactorio porque esta dentro de una realidad aceptable de aplicación de hormigones reciclados.

En cuanto al proceso de desarrollo y aplicación de los indicadores de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación, se observa que:

- Los modelos identificados en la bibliografía no pueden ser aplicados directamente para la modelización de la carbonatación de hormigones reciclados. Las variables aplicadas en los modelos analizados no consideran los verdaderos parámetros de influencia del proceso de la carbonatación de hormigones hechos con áridos reciclados;

- En especial, se cita el modelo propuesto por la EHE (2008). Este modelo vincula el progreso del frente de carbonatación de un hormigón a su resistencia. El uso de este método no pudo ser utilizado directamente para el análisis de los hormigones reciclados en estudio, ya que se ha verificado durante la campaña experimental que la resistencia los hormigones reciclados producidos tiende a disminuir en función del contenido de árido reciclado utilizado. Además, se resalta que la resistencia a compresión no debe ser relacionada a la carbonatación de hormigones reciclados. Un hormigón con gran porosidad puede presentar baja resistencia, pero solo se presentará más susceptible a la carbonatación en comparación con un hormigón menos poroso si los poros están conectados y permitan el paso del CO_2 . En consecuencia, los resultados obtenidos a través de este modelo y utilizándose los valores de resistencia obtenidos en la campaña experimental no se correlacionan adecuadamente a los resultados estimados a través del ensayo acelerado;
- En ese contexto, el Indicador VU_C desarrollado relaciona el fenómeno de la carbonatación a la porosidad de los hormigones reciclados producidos, y esta, por su parte, es relacionada directamente con el contenido y tipo de árido reciclado utilizado. La correlación entre la carbonatación y la porosidad por intrusión de mercurio de los hormigones reciclados producidos en este trabajo fue comprobada durante la campaña experimental;
- La aplicación del indicador ha determinado que el proceso de carbonatación no es un limitador de uso para los hormigones HRH y HRC. Todos los hormigones HRH y HRC, en cualquier proporción de uso de árido reciclado, siempre son una solución más sostenible que el hormigón de referencia.

Relacionado al proceso de desarrollo y aplicación de los indicadores de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros, se explica que:

- Tanto el método propuesto por la EHE (2008) como el método propuesto por Helene (1997) se han considerados válidos para el análisis de los hormigones reciclados estudiados, ya que ambos utilizan directamente el coeficiente de difusión de cloruros como una variable de aplicación;
- Durante la campaña experimental, se ha verificado que los coeficientes de difusión de cloruros de los hormigones reciclados estudiados son influenciados tanto por la distribución de poros del hormigón como por la composición del árido reciclado utilizado (presencia o no de elementos de hormigón, de asfalto y/o cerámicos);
- En ese contexto, para el desarrollo del Indicador VU_{PC} , se ha realizado la vinculación directa entre el fenómeno de difusión de cloruros y el contenido de árido reciclado del hormigón, según tipo. Este vínculo se ha definido a través del análisis de los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos experimentalmente;
- A través de la aplicación de este indicador, se ha podido ver que el ingreso de cloruros es el proceso más rápido y más perjudicial a la vida útil de los hormigones estudiados, reciclado o convencional. En todos los casos, el valor del indicador VU_{PC} ha determinado el valor del Índice de Vida Útil Total. Como resultado, se observa que ningún hormigón reciclado, sea reciclado o convencional, representa una solución más sostenible para usos en las categorías 4 y 5. Los hormigones reciclados, sea HRH o HRC, en cualquier proporción, siempre son una solución

más sostenible que hormigones convencionales equivalentes, cuando el uso se limita a las categorías de uso 1 y 2. Para la categoría de uso 3, los hormigones reciclados HRH solo son una solución más sostenible que hormigones convencionales equivalentes para una vida útil máxima de cálculo de 50 años, mientras que los hormigones reciclados HRC solo son una solución más sostenible en esta situación si el contenido de árido AC es de hasta 93,22%.

En cuanto a los Indicadores de Emisiones de Contaminantes, se afirma que:

- Dentro de sus características significativas están: son de fácil medición, tangibles, adecuados al nivel de agregación del sistema bajo análisis, centrados en aspectos prácticos y claros, sensibles a los cambios en el sistema, con un modo de recolección de información fácil y de menor coste posible. Además las mediciones pueden repetirse a través del tiempo y permiten el análisis de su relación con otros indicadores;
- Los indicadores permiten identificar que elemento lixiviado puede ser considerado un limitador de uso del material en análisis en la producción de hormigones. Los resultados han indicado, por ejemplo, que los áridos AC tienen una cantidad importante de sulfatos. No obstante, el análisis final ha comprobado que la presencia de contaminantes en los áridos reciclados AH y AC no ha sido alta lo suficiente para limitar su uso en la producción de hormigones. Sea para el caso de uso de cualquiera proporción.

Por último, y considerando el funcionamiento del método propuesto en otras situaciones de análisis de hormigones reciclados, se observa que:

- Se ha presentado un esquema simple de aplicación de los indicadores y índices desarrollados, volcado al análisis específico de hormigones reciclados en la etapa de diseño. En ese ámbito, la validez y especificidad de todos los indicadores propuestos es considerada adecuada para las características de los hormigones reciclados producidos en este trabajo. Las medidas efectivamente miden los fenómenos en análisis;
- El Índice de Durabilidad y Vida Útil y el Índice de Emisiones de Contaminantes contribuyen para que el análisis final sea realizado de modo integrado, mientras que los indicadores permiten identificar cuales son los aspectos de durabilidad e impacto ambiental que tienen más influencia en la sostenibilidad de los hormigones en estudio;
- La mensurabilidad y costo-efectividad de los indicadores producidos es confirmada. Mientras los indicadores de Durabilidad y Vida Útil se basan en la aplicación de variables muy sencillas (contenido de árido reciclado utilizado, según tipo), los indicadores de Emisiones de Contaminantes se basan en el análisis de resultados obtenidos a través de la realización de un plan de ensayos de lixiviación simplificado;
- Sin embargo, para el caso de los indicadores de Durabilidad y Vida Útil, es importante resaltar que la relevancia de los indicadores es restringida. Aun que los resultados obtenidos son claros y representativos, el uso de esos indicadores es limitado únicamente al análisis de los hormigones reciclados producidos en este trabajo:
 - El análisis de posibles cambios en los fenómenos objeto de análisis relacionados al uso de otros tipos de áridos reciclados debe ser realizado, ya que el tipo de árido reciclado influencia directamente en las propiedades de un hormigón. La campaña experimental

realizada confirma que el análisis de un hormigón hecho con árido reciclado compuesto mayoritariamente por elementos de hormigón debe ser tratado de una manera distinta de uno hecho con áridos reciclados mixtos. Elementos cerámicos tiene mayor influencia en la estructura de poros de un hormigón reciclado que elementos de hormigón. Por otro lado, la presencia relevante de elementos asfálticos influyen en la reducción de resistencia y del módulo de elasticidades de los hormigones. Debido a la limitación de tipos de hormigones reciclados utilizados en este trabajo, la confiabilidad y sensibilidad de los indicadores de Durabilidad y Vida Útil propuestos no pudo ser comprobada;

- Los procesos de carbonatación y de difusión de cloruros de hormigones está fuertemente relacionado con la relación a/c del hormigón. Menores relaciones a/c suponen menores coeficientes de carbonatación y difusión de cloruros (López y col., 2009). Para indicadores con magnitud más amplia de uso, las variables de aplicación deberían estar relacionadas tanto al valor de la relación a/c de esos hormigones como al contenido de árido reciclado.
- Por otra parte, por tratarse de un análisis basado en la comparación de situaciones equivalentes (uso de hormigones reciclados en lugar de convencionales equivalentes), muchas otras variables que afectan los fenómenos en análisis no necesitan ser consideradas.

La aplicación de esa metodología en otros tipos de hormigones reciclados, compuestos por áridos reciclados con características distintas a los áridos AH y AC, debe ser evaluada con más detalle. Para evaluar posibles deficiencias del modelo propuesto, se recomienda probar el uso de los indicadores desarrollados en hormigones reciclados con la misma dosificación producidos con otros tipos de áridos reciclados.

También se recomienda la realización de estudios futuros de durabilidad por carbonatación y penetración de cloruros de hormigones reciclados producidos con distintas relaciones a/c. El objetivo sería proponer nuevos indicadores de vida útil, de carácter más amplio, cuyas variables de aplicación estarían relacionadas tanto al valor de la relación a/c como al contenido de árido reciclado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES FINALES

El presente trabajo tubo como objetivo determinar la sostenibilidad de uso de áridos reciclados procedentes de RCD en la producción de hormigón, mediante el análisis de su durabilidad y de su impacto ambiental por lixiviación a través de indicadores.

El uso de áridos reciclados en hormigón es una de las principales actividades existentes actualmente en la construcción civil para el fomento de la sostenibilidad ambiental de esta industria, ya que promueven el cierre ideal del ciclo de vida de esos materiales. Para garantizar la sostenibilidad de esta actividad, sin embargo, es necesario optimizar el potencial de reciclaje de estos materiales en esta aplicación.

A partir de los conocimientos obtenidos de la bibliografía existente, se puede afirmar que en muchos casos los hormigones reciclados tienden a presentar una menor durabilidad que los hormigones convencionales. Como se ha mostrado en los puntos anteriores, debido a la mayor profundidad de carbonatación y velocidad de difusión de cloruros, la protección proporcionada por el hormigón reciclado suele ser inferior, especialmente para altos porcentajes de sustitución de áridos reciclados de baja calidad.

Para mitigar el problema, se puede utilizar recursos como el empleo de porcentajes moderados de sustitución por árido reciclado, el control de la calidad del árido reciclado, la disminución de la relación agua/cemento del hormigón reciclado y/o la garantía de un espesor adecuado del recubrimiento de la armadura.

En ese contexto, el desarrollo y la aplicación de índices y indicadores de durabilidad e impacto ambiental puede contribuir para identificar la solución óptima de uso de esos materiales, indicando el contenido máximo de árido reciclado o el recubrimiento mínimo de la armadura que deben ser adoptados para una determinada situación. La aplicación de estas herramientas pueden orientar el uso de los áridos reciclados en la producción de hormigones, garantizando, consecuentemente, la optimización de su potencial de reciclaje.

Para llegar a obtener un método de análisis por indicadores eficiente, se ha realizado una amplia campaña experimental que ha objetivado el análisis de varias propiedades de dos tipos distintos de hormigones reciclados. Los dos tipos de áridos gruesos reciclados escogidos para este trabajo (denominados árido AH y árido AC) son de carácter mixto y no se adecuan en alguno requisito exigido por la EHE (2008) para uso en hormigón. Por otra parte, han dado gran representatividad al trabajo, ya que simbolizan áridos característicos de la industria del reciclaje en España. La opción de uso de esos materiales ha permitido ampliar el análisis realizado y identificar un potencial más amplio de uso de áridos reciclados mixtos en la producción de hormigón.

El análisis de las propiedades de carbonatación, penetración de cloruros y lixiviación de los hormigones reciclados producidos en este trabajo, en conjunto con las demás propiedades analizadas, ha permitido tener un conocimiento general y complementario de los principales mecanismos de transporte de agentes agresivos existentes en el interior de estos materiales. Con el análisis de estos resultados se ha podido medir el comportamiento de cada uno de ellos frente a las propiedades de durabilidad e de impacto ambiental por lixiviación, llegando de esta forma a los índices y indicadores propuestos.

Respecto a las **propiedades físicas y mecánicas y de durabilidad** de los hormigones producidos en este trabajo, se concluye que, por lo general, existe una tendencia a la reducción de la calidad técnica del hormigón a medida que se aumenta el contenido de árido reciclado en su producción por encima del 20%.

Se observa que los hormigones reciclados con hasta 20% de árido reciclado en su composición, sea de árido AH sea de árido AC, han presentado características similares al hormigón de referencia producido con 100% de árido grueso natural.

En ese contexto, se debe resaltar que el comportamiento presentado por los hormigones reciclados hechos con árido AH es distinto a lo presentado por los hormigones hechos con áridos AC. Y no necesariamente el descenso de la calidad técnica de esos materiales está vinculado al contenido de árido reciclado, sino a su composición.

Los siguientes factores han sido considerados los responsables por las diferencias de comportamiento de los hormigones HRH y HRC:

- **Distribución de poros:** El uso de áridos reciclados AC ha generado una influencia en la estructura de poros de los hormigones producidos distinta a la generada por los áridos AH:
 - Las mezclas HRC han presentado un incremento progresivo en el volumen de intrusión de mercurio en los poros con diámetros comprendidos entre 0,1-10 μm . A medida que se ha aumentado el contenido de árido AC, se ha observado el aumento de la cantidad de poros con diámetros alrededor de 0,07 μm y entre 3-4 μm .
 - Las mezclas HRH han presentado un incremento progresivo general en el volumen de intrusión de mercurio en los poros solo para las mezclas con 100% de árido AH. Como en las mezclas HRC, a medida que se aumenta el contenido de árido AH, se ha observado el aumento de la cantidad de poros con diámetros alrededor de 0,07 μm y entre 1-10 μm .

Esos incrementos han sido menores que los presentados por las mezclas HRC y solo se han presentado relevantes para las mezclas con 100% de árido AH.

- **Composición del árido reciclado:** la presencia de mortero adherido en los áridos reciclados de hormigón que componen tanto el árido AH como el AC, la presencia de elementos asfálticos en el árido AH y la presencia de elementos cerámicos en el árido AC, han influenciado, cada uno de un modo particular, las mezclas al cual hacían parte:
 - El mortero adherido ha generado una segunda zona de transición para análisis, y probablemente ha incrementado el contenido de aluminato cálcico en el hormigón reciclado.
 - Los elementos asfálticos que componen el árido AH presentan carácter más plástico y menos permeable que los demás áridos;
 - Los elementos cerámicos presentan formato, rugosidad y composición mineralógica más débil que los demás áridos, y probablemente han incrementado el contenido de sulfatos de las mezclas.

Esa afirmación es corroborada principalmente por los siguientes resultados obtenidos:

- El incremento de la porosidad de los hormigones HRH frente al hormigón de referencia HO ha alcanzado el valor máximo de 3,67%, según el ensayo UNE-EN 12390-7:2001, y 69,34%, según el ensayo ASTM D4404:1984. Por otra parte, el incremento de la porosidad de los hormigones HRC frente al hormigón de referencia HO ha alcanzado el valor máximo de 13,75%, según el ensayo UNE-EN 12390-7:2001, y 86,02%, según el ensayo ASTM D4404:1984;
- La reducción de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados frente al hormigón de referencia ha variado entre 8,08 a 18,23% para los hormigones HRH y entre 13,54 a 36,40% para los hormigones HRC. Este comportamiento ha sido asignado a la distribución de poros de esos hormigones, la calidad del mortero adherido presente en los áridos reciclados de hormigón y su posible mayor debilidad de las zonas de transición entre el árido y la pasta, la presencia de elementos asfálticos, en el caso de los hormigones HRH, y la presencia de elementos cerámicos, en el caso de los hormigones HRC;
- La reducción del módulo de elasticidad de los hormigones reciclados frente al hormigón HO ha variado entre 8,74 a 39,01% para los hormigones HRH y entre 14,12 a 48,36% para los hormigones HRC. En el caso de esta propiedad, la porosidad de los áridos ha tenido una gran influencia, ya que esta característica determina la rigidez del árido. Para las mezclas HRH, la presencia de mortero adherido y elementos asfálticos ha influenciado los resultados, mientras que para las mezclas HRC, los elementos de influencia han sido el mortero adherido y los elementos cerámicos;
- El uso de hasta 20% de árido reciclado, tanto para el árido reciclado AH como para el árido reciclado AC, no ha influenciado en las propiedades de retracción por secado del material frente al hormigón HO. Por otro lado, el aumento del contenido de árido reciclado ha producido un descenso gradual de la calidad del hormigón reciclado frente a esta propiedad. Además, en las mezclas recicladas, la estabilización de la pérdida de agua ha sido más tardía y con valores más altos que el presentado por el hormigón HO. La mayor porosidad de las

mezclas recicladas puede haber contribuido para aumentar la retracción de esos materiales, ya que la principal causa de la retracción en hormigones es la salida del agua adsorbida de la pasta de cemento debido a la diferencia de humedad relativa existente entre el hormigón y el ambiente;

- Se ha observado un crecimiento gradual del coeficiente de absorción capilar en los hormigones reciclados en función del contenido de árido reciclado utilizado, en especial en los hormigones reciclados hechos con 100% de árido reciclado AC. Aunque el árido no necesariamente tenga influencia directa en esta propiedad, un árido con alta permeabilidad, como los áridos cerámicos, puede haber contribuido para incrementar la permeabilidad de los hormigones y, en consecuencia, aumentar el área efectiva del flujo de agua;
- A pesar de presentar mayor porosidad que el hormigón HO, las mezclas recicladas no han presentado coeficientes de carbonatación muy superiores al hormigón de referencia, como sería lo esperado. Por un lado, una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación puede haber sido generada por la presencia del mortero adherido, que puede haber incrementado el contenido de elementos alcalinos carbonatados en los hormigones reciclados. Por el otro, se ha observado que la posible mayor permeabilidad del árido reciclado, principalmente el cerámico, ha hecho con que el árido actúe como foco de propagación de la carbonatación;
- Los hormigones HRC han presentado un incremento del coeficiente de difusión de cloruros a medida que se ha aumentado el contenido de árido AC, mientras los hormigones HRH han presentado coeficientes de difusión similares a los obtenidos para el hormigón HO:
 - Se asume que la mayor porosidad de las mezclas HRC ha ejercido una influencia significativa en el incremento de los coeficientes de difusión de cloruros de esos hormigones, en comparación al hormigón HO;
 - Asimismo, la posible existencia de iones sulfatos en las mezclas HRC, originados de elementos cerámicos que componen el árido AC, puede haber promovido la liberación de iones cloruros para la formación de aluminato cálcico hidratado;
 - Por otro lado, la presencia de mortero adherido puede haber incrementado el contenido de aluminato cálcico en las mezclas HRH y HRC, generando la posible formación de mono cloro-aluminatos de calcio hidratados y, en consecuencia, la disminución del contenido de cloruro libre en el hormigón;
 - Además, los cloruros también pueden quedar retenidos por el CSH existente en el mortero adherido;
 - Finalmente, debido a su baja permeabilidad, los elementos asfálticos existentes en el árido AH pueden haber contribuido para mejorar la calidad de las mezclas HRH.

Respecto al **impacto ambiental** de los hormigones producidos en este trabajo, se observa que el estudio del impacto ambiental por lixiviación propuesto en este trabajo se reafirma como un estudio cualitativo de extrema importancia para el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados.

La aplicación inicial de un ensayo de conformidad en los áridos reciclados, como la norma europea UNE-EN 12457-4:2003, ha resultado en un procedimiento sencillo y eficiente para la evaluación del impacto ambiental de esos materiales en la producción de hormigones. Como este

procedimiento es bastante exigente frente al escenario en análisis, ha sido posible utilizarlo con seguridad para descartar la necesidad de realización de un ensayo de caracterización básica del hormigón. Solo los áridos reciclados que no han cumplido los límites máximos exigidos en este ensayo han sido sometidos a un análisis más adecuado a la realidad. En estos casos, el ensayo de caracterización básica NEN 7345:1995, se ha mostrado bastante eficiente.

Según los resultados obtenidos:

- Las muestras de árido AH no han presentado ningún elemento lixiviado en cantidad superior a los límites exigidos por la normativa UNE-EN 12457-4:2003. Su uso en hormigón, por lo tanto, ha sido considerado ambientalmente seguro tanto para uso como material granular como para uso en hormigón.
- Ya para los áridos AC, se ha identificado una cantidad importante de sulfatos lixiviados (6888,73 mg/kg). En este caso:
 - Un análisis más detallado ha indicado que el uso de esos áridos como material granular puede ser ambientalmente seguro. El uso de un sistema de lavado sencillo durante el proceso de producción de esos áridos puede reducir la presencia de esos contaminantes a niveles seguros para uso como material granular;
 - Además, el ensayo de caracterización básica ha comprobado que su uso en hormigón es seguro independiente del uso de un sistema de lavado. El medio de estabilización / solidificación creado por el cemento Portland ha contribuido para que el alto contenido de sulfatos existente en los áridos AC no produjera emisiones de sulfatos en los hormigones HRC superiores a los límites exigidos por la norma. El ambiente altamente alcalino del hormigón ha contribuido para esta estabilización / solidificación del medio ya que ha producido la inmovilización de los mecanismos químicos producidos por el cemento hidratado.

Finalmente, para **medir la sostenibilidad** de los hormigones producidos con los áridos reciclados utilizados en este trabajo, se ha desarrollado un esquema simple de aplicación de indicadores y índices. El método se ha desarrollado para ser utilizado en la etapa de diseño del hormigón, a través del uso de variables de aplicación sencillas relacionadas con el contenido de árido reciclado.

Todos los indicadores creados han sido considerados válidos, de fácil medición, tangibles, adecuados al nivel de agregación del sistema bajo análisis, centrados en aspectos prácticos y claros, sensibles a los cambios en el sistema, con un modo de recolección de información fácil y de menor coste posible. Además las mediciones pueden repetirse a través del tiempo y permiten el análisis de su relación con otros indicadores.

A través del uso de esos indicadores, ha sido posible afirmar que:

- En función del proceso de corrosión por carbonatación, los hormigones reciclados HRH y HRC, en cualquier proporción, siempre son una solución más sostenible de uso que su equivalente convencional;

- En función del proceso de corrosión por penetración de cloruros, ningún hormigón producido, sea reciclado o no, puede ser utilizado para usos que requieran una vida útil nominal mayor que 50 años. La degradación por cloruros ha sido identificada como la principal limitación de uso de esas mezclas en hormigón estructural. Los hormigones HRH, en cualquier proporción, siempre representarán una solución más sostenible que el hormigón convencional de referencia si la estructura no requiere más de 50 años de vida útil de cálculo. Ya los hormigones HRC siempre serán una solución más sostenible en esta situación si la sustitución de árido convencional por árido AC se limita al valor máximo de 93,22%;
- En función de su capacidad de lixiviación de contaminantes, la sostenibilidad de los hormigones HRH ha sido comprobada directamente a través del ensayo de disponibilidad realizado en el árido AH. Ya para los hormigones HRC, la sostenibilidad ha sido comprobada a través de un análisis más detallado, a partir de la realización de un ensayo de difusión para análisis del material en estado monolítico. Los resultados han comprobado que la producción de un hormigón reciclado, sea con árido AH o AC, en cualquiera proporción, no implica ningún riesgo ambiental al medio por lixiviación de contaminantes. En el caso especial del árido reciclado AC, su aplicación en hormigón genera un valor añadido al proporcionar un medio de estabilización / solidificación de los contaminantes contenidos en este material.

Cabe señalar que, en el ámbito de este trabajo, la validez y especificidad de todos los indicadores propuestos ha sido considerada adecuada. Las medidas efectivamente han medido los fenómenos en análisis en los hormigones estudiados. El desarrollo de los índices de Vida Útil y Emisiones de Contaminantes ha contribuido para que el análisis final fuera realizado de modo integrado, mientras los indicadores han permitido identificar cuales son los aspectos de durabilidad e impacto ambiental que han tenido más influencia en la sostenibilidad de los hormigones en estudio.

Sin embargo, aun que los resultados obtenidos son claros y representativos, el uso de esos indicadores es limitado al análisis de los hormigones reciclados producidos en este trabajo. La aplicación de esa metodología en otros tipos de hormigones reciclados, compuestos por áridos reciclados con características distintas a los áridos AH y AC, debe ser evaluada con más detalle.

No se puede generalizar la aplicación de estos indicadores a otros tipos de áridos, ya que el tipo de árido reciclado influencia directamente en las propiedades de un hormigón. La campaña experimental realizada ha confirmado que el análisis de un hormigón hecho con árido reciclado compuesto mayoritariamente por elementos de hormigón debe ser tratado de una manera distinta de uno hecho con áridos reciclados mixtos. Elementos cerámicos tiene mayor influencia en la estructura de poros de un hormigón reciclado que elementos de hormigón.

Por lo tanto, el análisis de posibles cambios en los fenómenos objeto de análisis relacionados al uso de otros tipos de áridos reciclados debe ser realizado.

Un desarrollo más amplio de indicadores de vida útil también debe ser realizado para la interpretación de situaciones de análisis de hormigones reciclados hechos con dosificaciones distintas. Los mecanismos de degradación están fuertemente relacionados con la relación agua/cemento del hormigón.

En ese sentido, se cree que el vínculo directo entre esos fenómenos y el contenido de árido reciclados utilizado en el hormigón en análisis no es suficiente para definir un indicador. Para un indicador más preciso, las variables de aplicación deberían estar relacionadas tanto al valor de la relación agua/cemento de esos hormigones como al contenido y tipo de árido reciclado.

Para concluir, este estudio resalta que el análisis de los principales mecanismos de transporte de gases y líquidos en un hormigón reciclado, es decir, la permeabilidad, la migración y la difusión, deben ser representados por funciones o ecuaciones desarrolladas en función de las características específicas de este material. Métodos destinados al análisis de hormigones convencionales no pueden ser utilizados directamente.

Los resultados obtenidos en este trabajo representan una importante simplificación en el estudio del transporte de agentes agresivos y contaminantes en los poros de un hormigón reciclado. Este autor cree que dentro de poco tiempo la durabilidad y el impacto ambiental de los hormigones reciclados podrán ser clasificados y modelados a partir de constantes específicas relacionadas tanto al tipo de material reciclado en uso como al "frente de penetración" de elementos agresivos en estudio.

La simplicidad de este sistema sin duda contribuirá a aumentar el conocimiento de los medios técnicos para la importancia de los beneficios ambientales de estructuras de hormigón reciclado relacionados con la durabilidad y el impacto ambiental, y para la consideración de estos parámetros durante el diseño de una estructura sostenible.

Decisivamente, el objetivo de ese estudio ha sido elaborar un marco inicial sólido para la valoración del uso de áridos reciclados en hormigón. Al mismo tiempo, contribuir para que en la práctica la toma de decisiones sobre el uso de materias primas recicladas en la construcción civil sea más consciente con las necesidades de sostenibilidad del sector.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Basándose en las conclusiones obtenidas, se propone los siguientes estudios futuros:

- Expandir los estudios relacionados al uso de áridos reciclados mixtos en hormigón a otras propiedades tanto mecánicas como de durabilidad;
- Realizar el inventario de todos los elementos consumidos y generados en todas las etapas del ciclo de vida de un hormigón reciclado, con el fin de aportar una información más completa para medida de la sostenibilidad global de este material;
- Estudiar las relaciones entre el comportamiento lixivante de áridos reciclados en laboratorio y en campo con el objetivo de identificar los principales factores del entorno de influencia y de validar los modelos actualmente adoptados. Del mismo modo se sugiere realizarse comparaciones entre resultados obtenidos en laboratorio y análogos naturales o históricos;
- Profundizar el análisis y la validación de los modelos matemáticos desarrollados a hormigones reciclados con misma dosificación pero con áridos reciclados de RCD con características distintas a las presentadas por los áridos utilizados en este trabajo. Se sugiere la adaptación de esos modelos a nuevos estudios de casos específicos en laboratorio y su comprobación en base a casos reales de referencia;
- Realizar estudios de durabilidad por carbonatación y penetración de cloruros en hormigones reciclados producidos con distintas relaciones agua/cemento. El objetivo sería proponer nuevos indicadores de vida útil, cuyas variables de aplicación estarían relacionadas tanto al valor de la relación agua/cemento real como al contenido de árido reciclado.

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 259:2002. Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.

ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Brasil: ABNT, 2002.

ACHE. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Grupo de trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado”. Monografía M 11: Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural. Madrid: ACHE, 2006. ISBN 84-89670-55-2.

ACI Committee 201. ACI 210.2R-01: Guía para la Durabilidad del Hormigón. American Concrete Institute, 2001.

ACI Committee 365. ACI 365.1R-00: Service-Life Prediction - State-of-the-Art Report. American Concrete Institute, 2000.

AENOR. UNE 83304:1984. Ensayos de hormigón. Determinación de la resistencia a compresión de probetas. Madrid: AENOR, 1984

AENOR. UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión. Madrid: AENOR, 1996.

AENOR. UNE 83318:1994. Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud. Madrid: AENOR, 1994.

AENOR. UNE-EN 932-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio. Madrid: AENOR, 1999.

AENOR. UNE-EN 933-1:1998. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método de tamizado. Madrid: AENOR, 1998.

AENOR. UNE-EN 933-11:2009. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. Madrid: AENOR, 2009.

AENOR. UNE-EN 1097-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Madrid: AENOR, 1999.

AENOR. UNE-EN 1097-6:2001. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Madrid: AENOR, 2001.

AENOR. UNE-EN 1744-1:1999. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químicos. Madrid: AENOR, 1999.

AENOR. UNE-EN 12350-2:2006. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento. Madrid: AENOR, 2006.

AENOR. UNE-EN 12390-2:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. Madrid: AENOR, 2001.

AENOR. UNE-EN 12390-7:2001. Ensayos de hormigón endurecido, parte 7: Densidad del hormigón endurecido. Madrid: AENOR, 2001.

AENOR. UNE EN 12390-8:2001. Ensayos de hormigón endurecido, parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. Madrid: AENOR, 2001.

AENOR. UNE-EN 12457-1:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 1: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 2 l/kg para materiales con un alto contenido en sólidos y con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño). Madrid: AENOR: 2003.

AENOR. UNE-EN 12457-2:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño). Madrid: AENOR: 2003.

AENOR. UNE-EN 12457-3:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 3: Ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 2 l/kg y 8 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño). Madrid: AENOR: 2003.

AENOR. UNE-EN 12457-4:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño). Madrid: AENOR: 2003.

AENOR. UNE-EN 12620:2003. Áridos para hormigón. Madrid: AENOR, 2003.

AENOR. UNE-EN 146508:1998. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero. Madrid: AENOR, 1998.

Agopyan, Vahan. A durabilidade dos materiais e componentes. *Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção: Patologia das Edificações*. São Paulo: Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1986, p. 1-9.

Aguado, A.; Barra, M.; Gómez-Soberón, J.; González, B. Potencialidades del hormigón estructural y su tecnología en el marco de la sostenibilidad de la construcción. *Hormigón y acero*, 2003, núm. 228-229, p. 207-217.

Aguado, A.; Casanova, I. Introducción. Capítulo 1 Demolición y reutilización de estructuras de Hormigón. *Monografía nº E-7. Estructuras y Edificación*. GEHO-ATEP-Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1997, 160 p.

Akhtaruzzaman, A.; Hasnat, A. Properties of Concrete Using Crushed Brick as Aggregate. *Concrete International*, 1983, vol. 5, núm. 2, p. 58-63.

Alaejos Gutiérrez, P. Tipos y Propiedades de Áridos Reciclados. 2008. Texto extraído del Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Informe CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente, 2008.

Alaejos Gutiérrez, P.; Sánchez de Juan, M. Utilization of Recycled Concrete Aggregate for Structural Concrete. A: Vázquez, E; Hendriks, Ch.; Janssen, G. (eds.). *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. RILEM Proceedings 40*. Bagneux: RILEM, 2004, p. 693-704. ISBN 2-912143-54-3.

Álamo, L; Gonzales, M; Sumpsi, C. Sistemes de gestió ambiental – medi ambient i tecnologia. *Guía ambiental de la UPC – Universitat Politecnica de Catalunya*. Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 187-199. ISBN 84.8301.278.2.

Alonso, C.; Andrade, C. Corrosion Behavior of Steel During Accelerated Carbonation of Solutions which Simulate the Pore Concrete Solution. *Materiales de Construcción*, 1987, vol. 37, núm. 206, p. 5-16.

Andrade, C. Electrical Resistivity as Microstructural Parameter for the Calculation of Reinforcement Service Life. *Jornada Técnica 2009-JT-01. Nanotecnología en el Hormigón y Hormigones Autocompactantes*. Barcelona: Cátedra BMB – UPC, 2009. p. 1-12.

Andrade, C.; Alonso, C.; Gonzalez, J.; Rodriguez, J. Remaining service life of corroding structures. *Report IABSE Symposium - Durability of structures*. Lisbon: IABSE Symposium, 1989, p. 359-364.

Andrade, J. Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2001.

Andrade, M. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. Tradução e adaptação de Antônio Carmona e Paulo Helene. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1992. ISBN 85-7266-011-9.

Ang, A.; Tang, W. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles. vol. 1, 1ªed. New York: John Wiley and Sons, 1975, 409 p.

Angulo, S. Caracterização de Agregados de Resíduos da Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento de Concretos. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

Anink, D.; Boonstra, C.; Mak, J. Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment. London: Earthscan Publications, 1996. ISBN: 1873936389.

ASTM C 192/C 192M-95. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken: ASTM International, 2002.

ASTM D4404:1984. Standard test methods for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury porosimetry. ASTM International, 1984.

Bakker, R. Chapter Three. A: Schiessl, P. (ed.). *Corrosion of Steel in Concrete. Report of the Technical Committee 60 – CSC. RILEM*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 36-42.

Barra, M. Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación con hormigón armado. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 1996.

Barra, M.; Vázquez, E.; Aponte, D. El impacto ambiental de los áridos reciclados en España. A: Güell, A.; Vázquez, E.; Varela, E. (eds.) *Guía Española de Áridos Reciclados*. Barcelona: Fuego Editores, 2011 (en proceso de publicación).

Bazant, Z. Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Application. *Journal of the Structural Division*, 1979, vol. 105, núm. 6, p. 1155-1166.

Bob, C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. *Proceedings International Conference Concrete in the Service of Mankind*. Dundee: Taylor & Francis, 1996, p. 17-28.

Bourdeau, L. 1999. Sustainable development and the future of construction: a comparison of visions from various countries. *Building Research & Information*, 1999, vol. 27, núm. 6, p. 355-367.

British Standards Institution. BS 7543:1992: Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components. London: British Standards Institution, 1992.

Brito J.; Pereira, A.; Correia J. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 2005, núm. 27, p. 429–433.

Bruntland, G. (ed.). Our common future: The World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987.

Buil, M.; Ollivier, J.-P. Conception des bétons: la structure poreuse. A: Baron J.; Ollivier J.-P. *La durabilité des bétons*. Paris: Presses Ponts et Chaussées, 1992, p. 57-99.

Building Materials Decree. Staatsblad Van Het Koninkrijk der Nederlanden, 1995, 567 pp.

Burón Maestro, M. La Sostenibilidad de las Construcciones de Hormigón. *Revista Cemento Hormigón*, 2007, núm. 897, p. 58-65, ISSN: 0008-8919.

Cady, P.; Weyers R. Deterioration Rates of Concrete Bridge Decks. *Journal of Transportation Engineering*, 1984, vol. 110, núm. 1, p. 34-45.

Canadian Standards Association. CSA S478-1995. Guideline on durability in buildings, Canada: Canadian Standards Association, 1995.

Caré, S.; Hervé, E. Prediction of the chloride diffusion coefficient in concrete using the homogenization technique. A: Andrade, C.; Kropp J. (eds.). *Second International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete*. Paris: RILEM, 2000.

Carvalho Filho, A. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis doctoral, UPC, Programa de Doctorado en Ingeniería Civil, 2001.

Cascudo, O. Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: Pini; 1997, 237 p. ISBN 85-7266-080-1.

Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C. Chloride binding isotherms in concrete submitted to non steady state migration experiments. *Cement concrete research*, 1999, núm. 29, p. 1799-1806.

Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C. Measurement of the steady and non steady state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion test. *Cement and concrete research*, 2001, núm. 31, p. 1411-1420.

CEB-FIP. Código Modelo CEB-FIP 1990 para Hormigón Estructural. Recomendaciones y manuales técnicos. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos /GEHO/ATEP, 1990. ISBN 84-380-0097.

CEB. Comité Euro-International du Béton. New Approach to Durability Design: An Example for carbonation Induced Corrosion. *Bulletin D'Information n° 238*. Suissa: CEB, 1997, 142 p.

CEN/TC 292. CEN/TS 14405:2004. Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Up-flow percolation test (under specified conditions). 2004.

CEN/TC 292. CEN/TS 14429:2005. Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Influence of pH on leaching with initial acid/base addition. 2005

CEN/TC 292. CEN/TS 14997:2006. Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Influence of pH on leaching with continuous pH-control. 2006.

CEN/TC 292. CEN/TS 15364:2006. Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Acid and base neutralization capacity test. 2006.

CEN/TC 292. Characterization of waste in Europe. State of the art report for CEN TC 292. Comité Europeo de normalización, 1994. STB/94/28.

CEN/TC 292. prEN 15862. Characterization of waste - Compliance leaching test - One stage batch leaching test for monoliths at fixed liquid to surface area ratio (L/A) for test portions with fixed minimum dimensions. (draft) 2008.

CEN/TC 292. prEN 15863. Characterisation of waste - Leaching behaviour test for basic characterisation -Dynamic Monolithic Leaching Test with periodic leachant renewal, under fixed test conditions. (draft) 2008.

CEN/TC 292. prEN 15864. Characterisation of waste - Leaching behaviour test for basic characterisation - Dynamic Monolithic Leaching Test with continuous leachant renewal under conditions relevant for specified scenario(s). (draft) 2008.

CIB W080 / RILEM 175 SLM. Service Life Methodologies Prediction of Service Life for Building and Components. *Performance Based Methods for Service Life Prediction. State of the art Reports. CIB Report: Publication 294*. CIB, NTNU and EMPA, 2004. ISBN: 90-6363-040-9.

Clear, K.; Hay, R. Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs. *Report FHWA/RD-73/32*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1973, p. 361-373.

Collins, R. BRE Digest 433: Recycled Aggregates, 1998.

Construpédia. Materiales de Construcción Sostenibles. [Consulta: 02/2009]. Disponible en: <http://www.construmatica.com/construpedia/Materiales_de_Construcción_Sostenibles>.

Cook, R.; Hover, K. Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors. *Construction and Building materials*, 1993, núm.4, p. 231-240.

Correia J.; Brito J.; Pereira, A. Effects on Concrete Durability of Using Recycled Ceramic Aggregates. *Materials and Structures*, 2006, núm. 39, p. 169-177.

CPD 93/68/EEC. Construction Products Directive. European Community Council, 1993.

Crumbie, A.; Scrivener, K.; Pratt, P. The relationship between the porosity and permeability of the surface layer of concrete and the ingress of aggressive ions. A: Roberts, L.; Skalny, J. (eds.). *Pore structure and permeability of cementitious materials. Vol. 137*. Pennsylvania: Materials research society, 1989.

Curwell, S.; Cooper, I. The implications of urban sustainability. *Building Research and Information*, 1998, vol. 26, núm. 1, p. 17-28.

De Coss, R.; Murrieta, G.; Castro, P. Effect of weather cycles on chloride diffusion in porous concrete. A: Castro, P.; Troconis, O.; Andrade, C. (eds.). *Rehabilitation of Corrosion Damaged*

Infrastructure. Chapter IV: Modeling, methods, techniques and technologies. Houston: NACE International, 1998, p. 285-293. ISBN-970-92095-0-7.

DeSimone, L.; Popoff, F. *Eco-efficiency – The business link to sustainable development.* 2ª ed. MIT Press, 1998, 280p.

Díaz, V.; Hernández, R.; Gutiérrez, L. Las tecnologías del concreto en su ciclo de vida. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 2010, vol. 2, enero-junio, p. 42-47

Dijkstra, J.; Meeussen, J.; Comans, R. Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modeling study, *Environmental Science & Technology*, 2004, vol. 38, núm. 16, p. 4390–4395.

Dijkstra, J.; Van der Sloot, H.; Spanka, G.; Thielen, G. How to judge release of dangerous substances from construction products to soil and groundwater. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands, 2005, 71 p. ECN-C-05-045.

DIN 4226-100. Aggregates for concrete and mortar - Part 100: Recycled aggregates. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 2002.

Directiva 89/106/CEE. Directiva del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción. 1989.

DURAR Network. Inspection, evaluation and Diagnostic manual of Corrosion in Reinforced Concrete Structures. CYTED. Iberoamerican Program of Science and Tecnology for Development. Subprogram XV Environmental Corrosion/Impact about Materials. Maracaibo: CYTED, 1997.

Economy Watch. World Construction Industry. [Consulta: 02/2009]. Disponible en: <<http://www.economywatch.com/world-industries/construction/world.html>>.

EHE. Ministerio de Fomento/ Comisión Permanente del Hormigón. Instrucción de Hormigón Estructural. EHE. Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.

Elsayed, A. *Reliability Engineering.* New York: Addison Wesley Longman, 1996, 736 p.

EMPA. SIA 162/1:1989. Test No. 5 – Water Conductivity, Suiza: EMPA, 1989.

Engelsen, C.; Van der Sloot, H.; Wibetoe, G.; Justnes, H.; Lund, W.; Stoltenberg-Hansson, E. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 2010, núm. 40, p. 1639-1649.

Engelsen, C.; Van der Sloot, H.; Wibetoe, G.; Petkovic, G.; Stoltenberg-Hansson, E.; Lund W. Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling. *Cement and Concrete Research*, 2009, núm. 39, p. 446–459.

Estévez, B.; Aguado, A.; Josa, A. Environmental impact of concrete recycling, coming from construction and demolition waste (C&DW). *Proceedings of the 11th Rinker International Conference. Deconstruction and Materials Reuse. CIB Publication 287*. Florida: CIB, 2003.

Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Hendrik, Ch.; Maasakkers, M. The Role and Influence of Recycled Aggregate, in *Recycled Aggregate Concrete*. A: Vázquez, E; Hendriks, Ch.; Janssen, G. (eds.). *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. RILEM Proceedings 40*. Bagneux: RILEM, 2004, p. 665-674. ISBN 2-912143-54-3.

EurActiv.com. Sustainable Development: Introduction. 2006. [Consulta: 02/2009]. Disponible en: <<http://www.euractiv.com/en/sustainability/sustainable-development-introduction/article-117539>>.

Fernandez-Sempere, J.; Barrueso-Martínez, M.; Font-Montesinos, R.; Sabater-Lillo, M. Characterization of Tannery Wastes, Comparison of Three Leachability Tests. *Journal Of Hazardous Materials*, 1997, núm. 54, p. 31-45.

Fundación Conama. Grupo de trabajo 14: Gestión de Residuos de Construcción. VII CONAMA. Cumbre del Desarrollo Sostenible, Madrid, 2004. [Consulta: 04/2006] Disponible en: <www.aecpa.es/noticias/archivo/Resumen%20Ponencias%20GT%2014.doc>.

Garboczi, E. Microstructure and transport properties of concrete. A: Kropp J.; Hilsdorf, H. (eds.). *RILEM - Technical Committee 116-PCD - Performance Criteria for Concrete Durability. Report 12*. London: E & FN Spon, 1995, p. 198-212. ISBN: 0419198806.

Gayarre, F. Influencia de la variación de los parámetros de Dosificación y Fabricación de Hormigón reciclado Estructural sobre sus Propiedades Físicas y Mecánicas. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2008.

GEHO-CEB - Grupo Español del Hormigón - Comité Euro-International du Béton. Durabilidad de estructuras de hormigón - Guía de diseño CEB. Boletín nº 12. GEHO-CEB, 1993, 164 pp. ISBN: 84-7493-183-5.

GIASA. Recomendaciones para la Redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el Uso de Materiales reciclados de residuos de Construcción y Demolición (RCD). 1ª ed. Sevilla: Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A. Consejería de Obras Públicas y Vivienda, 2010.

Glass, G.; Buenfeld, N. Chloride induced corrosion of steel in concrete. *Progress in structural engineering and materials*, 2000 , núm. 2, p. 448-458.

González, B. Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante. Tesis doctoral, Universidad Politécnica A Coruña, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, 2002.

González-Fonteboa, B; Martínez-Abella, F. Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas. *Materiales de Construcción*, 2005, vol. 55, núm. 279, p. 53-66.

González, J.; Andrade, C. Relaciones Cuantitativas entre la Carbonatación del Hormigón y la Corrosión de las Armaduras. *Corrosion Protection*, 1980, núm. 11, p. 15-24.

Hansen, T.; Narud, H. Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International*, 1983, vol. 5, núm. 1, p. 79-83.

Hansen, T.; Schulz, R.; Hendricks, Ch.; Molin, C.; Lauritzen, E. Recycling of demolition concrete and masonry. A: Hansen, T. *RILEM Report of Technical Committee 37-DCR Demolition and Reuse of Concrete*. RILEM, 1992. ISBN: 0-419-15820-0.

Helene, P. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: Pini, 1986.

Helene, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1993, 231p.

Helene, P. Vida Útil das Estruturas de Concreto. *Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 4.; Congresso de Controle de Qualidade, 6*. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997, vol.1, p. 1-30.

Hendriks, C. Durable and Sustainable Construction Materials. The Netherlands: Aeneas, 2000. ISBN: 90-75-365-30-6.

Hendriks, C.; Janssen, G. A New Vision on the Building Cycle, Netherlands: Aeneas, 2004. ISBN: 90-75365-64-0.

Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. Santiago: Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1988.

International Institute for Sustainable Development. What is Sustainable Development?. [Consulta: 02/2009]. Disponible en: <<http://www.iisd.org/sd/>>.

IRAM-ISO 14040:1998. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco. ISO, 1998.

IRAM-ISO 14041:2000. Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de vida- Definición de la meta y el alcance y análisis del inventario del ciclo de vida. ISO, 2000.

IRAM-ISO 14042:2000. Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de vida- Evaluación del impacto del ciclo de vida. ISO, 2000.

IRAM-ISO 14043:2001. Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de vida- Interpretación del ciclo de vida. ISO, 2001.

Izquierdo, L. Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de la armadura de hormigón. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003.

Janssen, G. Reducing Greenhouse Gas Emissions by Megarecycling in Urban Renewal. *Proceedings of the International Conference on Climate Change*. Hong Kong: ICCC, 2007.

John, V. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Doutorado, USP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

John, V. Aproveitamento de Resíduos Sólidos como Materiais de Construção. Cassa, J.; Carneiro, A.; Brum, I. (eds.). *Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção*. Salvador: CAIXA/EDUFBA, 2001, 312p. ISBN 85-232-0226-9.

John, V.; Sato, N.; Agopyan, V.; Sjöström, C. Durabilidade e Sustentabilidade: Desafios para a Construção Civil Brasileira. [Consulta: 02/2009]. Disponível em: <<http://durar.pcc.usp.br/artigos/Durabilidade%20no%20Ambiente%20constru%EDdo.pdf>>.

Kaga, H.; Kasai, Y.; Takeda, K.; Kemi, T. Properties of Recycled from Concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 690-698. ISBN: 0-412-32110-6.

Kakizaki, M.; Harada, M.; Soshiroda, T.; Kubota, S.; Ikeda, T.; Kasai, Y. Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 565-574. ISBN: 0-412-32110-6.

Kasai, Y.; Hisaka, M.; Yanagi, K. Durability of concrete using recycled coarse aggregate. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 626-632. ISBN: 0-412-32110-6.

Kashino, N.; Takahashi, Y. Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 557-564. ISBN: 0-412-32110-6.

Kassai, Y. Barriers to the reuse of construction by-products and the use of recycled aggregate in concrete in Japan. A: Dhir, R.; Henderson, N.; Limbachiya, M. (eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Tomas Telford, 1998, p. 433-444. ISBN 978-0-7277-2726-8.

Kates, R., Parris, T.; Leiserowitz, A. What is Sustainable Development? Goals, indicators, values, and practice. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2005, vol. 47, núm. 3, p. 8–21.

Khalaf, F. Using Crushed Clay Brick as Coarse Aggregate in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, vol. 18, núm. 4, p. 518-526.

- Khalaf, F.; De Venny, A. Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Agregate in Concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE) 0899-1561*, 2004, vol. 16, núm. 4, p.331-340.
- Khaloo, A. Properties of Concrete Using Crushed Clinker Brick as Coarse Aggregate. *ACI Materials Journal*,1994, vol. 91, núm. 2, p. 401-407.
- Kikuchi, M.; Dosho, Y.; Narikawa, M.; Miura, T. Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. A: Dhir, R.; Henderson, N.; Limbachiya, M. (eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Tomas Telford, 1998, p. 55-68. ISBN 978-0-7277-2726-8.
- Kobayashi, S.; Kawano, H. Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 547-556. ISBN: 0-412-32110-6.
- Kosson, D.; Van Der Sloot, H.; Sanchez, F.; Garrabrants, A. An Integrated Framework for Evaluating Leaching in Waste Management and Utilization of Secondary Materials. *Environmental Engineering Science*. 2002, vol. 19, núm. 3, p. 159 -204
- Kumar, R.; Bhattacharjee, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2003, núm. 33, p. 155-164.
- Lagrega, M., Buckingham, P.; Evans, J. Stabilisation and solidification. Hazardous Waste Management, New York: McGraw-Hill College, 1994, p. 641-704. ISBN: 0070195528.
- Laskar, M.; Kumar, R.; Bhattacharjee B. Some aspects of evaluation of concrete through mercury intrusion porosimetry. *Cement and Concrete Research*, 1997, núm. 27, p. 93-105.
- Lauritzen, E. K. Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings. *Industry and Environment*, 1994, vol. 17, núm. 2, p. 26-31.
- LEMaC. Evaluación de un catalizador agotado para su utilización en hormigones de cemento portland. Informe LEMaC, Área de estructuras y Materiales de Construcción. Buenos Aires: LEMaC, 2003.
- Levy, S.; Helene, P. Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/318*. 2002. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2002. ISSN 0103-9830.
- Lima, E. Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento de agentes agressivos. Dissertação, Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2000, 131p.
- Limbachiya, M.; Leelawat, T.; Dhir, R. RCA concrete: A study of properties in the fresh state, strength development and durability. A: Dhir, R.; Henderson, N.; Limbachiya, M. (eds.).

Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Tomas Telford, 1998, p. 227-238. ISBN 978-0-7277-2726-8.

Limbachiya, M.; Leelawat, T.; Dhir, R. Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete. *Materials and Structures*, 2000, vol 33 p. 574-580.

Liu, Y. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996, 117p.

LNEC E393-1993. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa: Moptc – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

LNEC E471:2006. Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Lisboa: Moptc – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

López, J.; Burón Maestro, M.; Fernández, L.; Carrascón, S. Determinación del recubrimiento mínimo de las armaduras conforme con la instrucción de hormigón estructural EHE-08. *Revista Cemento Hormigón*, 2009, núm. 932, p. 52-66. ISSN: 0008-8919.

Luping, T. Chloride transport in concrete - Measurement and prediction. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, 1996.

Machado, M. Estudo das patologias em edificações na região da Grande Vitória segundo uma abordagem sistêmica. Dissertação, Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2003, 304p.

Mangat P.; Molloy, B. Prediction of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 1994, vol. 27, núm. 6, p. 338-346.

Mansur, M.; Wee, T.; Cheran, L. Crushed Bricks as Coarse Aggregates for Concrete. *ACI Materials Journal*, 1999, vol. 96, núm. 4, p. 478-483.

Martínez-Abella, F. Hormigones con áridos reciclados. Nuevas propuestas rebasando los límites de la EHE. Ponencia presentada en la Jornada Técnica sobre Control y Tecnología del Hormigón, en el Salón de Actos de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Campus de Elviña, A Coruña, 2 de junio de 2011.

Mather, B. Concrete Durability. *Cement & Concrete Composites*, 2004, vol. 26, núm. 1, p. 3-4.

Matos, G.; Wagner, L. Consumption of Materials in United States 1900-1995. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1999, núm. 23, p. 107-122.

Mejlbro, L. The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. A: Sandberg, P. (ed.). *Durability of Concrete in Saline Environment. Proceedings*. Lund, 1996. p. 127-158.

- Mendoza-Rangel, J.; Castro-Borges, P. Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual. *Materiales de Construcción*, 2009, vol. 59, núm. 296, p. 117-124, ISSN: 0465-2746.
- Merlet, J.; Pimienta, P. Mechanical and physico – chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled concrete aggregates. A: Lauritzen, E. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. RILEM Proceedings 23*. London: E & FN Spon, 1994, p. 400-411. ISBN 0-203-63071-8.
- Metha, P.; Monteiro, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1994. ISBN 85- 7266-040-2.
- Midgley, H.; Illston, J. The penetration of chlorides into hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1984, vol. 14, núm. 4, p. 546-558.
- Monteiro, P. Concrete : microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill, 2006.
- Morinaga, S. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel. *Proceedings 1st International Conference - Durability of Building Materials and Components*. Brighton: 1st International Conference - Durability of Building Materials and Components, 1990, p. 5-16.
- Moro, F.; Böhni, H. Ink-bottle effect in mercury intrusion porosimetry of cement-based materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, núm. 246, p. 135-149.
- Mulheron, M.; O'mahony, M. The durability of recycled aggregates and recycled aggregate concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 633-642. ISBN: 0-412-32110-6.
- Müller, A. Closed loop of concrete rubble? 2005. Ponencia presentada en la Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento Ingeniería de la Construcción, Sección de Materiales de Construcción, Barcelona, 2005.
- Nagataki, S.; Gokce, A.; Saeki, T. Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. A: Malhotra, V. (ed.). *Durability of Concrete. Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference*. Barcelona: ACI International, 2000, p. 51-71.
- Neville, A. Propiedades do Concreto. São Paulo: Pini, 1997
- Nguyen, T. Influence de la nature du liant et de la temperature sur le transport des chlorures dans les materiaux cimentaires. PhD Thesis, Institut National des Sciences Appliquées, 2006.
- Nilsson, L.; Poulsen, E.; Sandberg, P.; Sorensen, H.; Klinghoffer, O. Chloride penetration into concrete. state of the art: transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. Denmark Ministry of Transport, Road Directorate, 1996.

Nishbayashi, S.; Yamura, K. Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete. A: Kasai Y. (ed.). *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2: Reuse of Demolition Waste. Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. London: Chapman & Hall, 1988, p. 652-659. ISBN: 0-412-32110-6.

NMX-C-403-ONNCCE-1999: Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para Uso Estructural. México: ONNCCE, 1999.

NNI. NEN 7341. Leaching characteristics of earthy and stony building and waste materials. Leaching tests. Determination of the availability for leaching of inorganic from granular materials. Netherlands Normalisation Institute, 1995.

NNI. NEN 7343. Leaching characteristics of earthy and stony building and waste materials. Leaching tests. Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with the column test. Netherlands Normalisation Institute, 1995.

NNI. NEN 7345. Leaching characteristics of earthy and stony building and waste materials. Leaching tests. Determination of the leaching of inorganic components from buildings and monolithic waste materials with the diffusion test. Netherlands Normalisation Institute, 1995.

Ocampo, I.; Vuanello, O.; Ortúzar, R.; Seminara, H.; Paez, G.; Ibarbe, I.; Bustos, S.; Vila, R. Estudio de la Carbonatación Acelerada en Probetas de Hormigón Armado. *VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras*. Córdoba: CINPAR 2010, 2010.

Oliveira, M.; Assis, C.; Terni, A. Study on Compressed Stress, Water Absorption and Modulus of Elasticity of Produced Concrete Made by Recycled Aggregate. A: Vázquez, E; Hendriks, Ch.; Janssen, G. (eds.). *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. RILEM Proceedings 40*. Bagneux: RILEM, 2004, p. 636-642. ISBN 2-912143-54-3.

Otsuki, N.; Miyazato, S-I.; Yodsudjai, W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, vol. 15, núm. 5, p. 443-451.

Papadakis, V.; Vayenas, C.; Fardis, M. Fundamental Modeling and Experimental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation. *Materials and Structure*, 1992, núm. 25, p. 293-304.

Parrott, L. A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. *Report C/1-0987*. BRE/Cemente and Concrete Association, 1987, 369p.

Pera, J. State of the art report: use of waste materials in construction in western Europe. *Seminário sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção*. São Paulo: PCC-EPUSP, 1996, p.1-20.

Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 (versión preliminar), Anexo 6, II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCDD) 2008-2015. [Consulta: 11/2008]. Disponible en: <http://www.mma.es/secciones/calidad_contaminacion/residuos/planificacion_residuos/pdf/borrador_pnir_anexo6.pdf>.

Plessis, C (ed.). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries*. A disussion document. Pretoria: CSIR Building and Construction Technology, 2002. ISBN 0-7988-5540-1.

PNRCD. BOE: 166 de 12 de julio de 2001: Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006. 2001.

prEN 933-11:2004 E. Test for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test form the constituents of coarse recycled aggregates. (draft), 2004.

PROGROC. Programa de Gestió de Residus de la Construcció de Catalunya 2007-2012. Document aprovat inicialment pel Consell de Direcció de l'Agència de Residus de Catalunya de 29 d'octubre de 2007. Barcelona: Agència de Residus de Catalunya, 2007.

Proyecto GEAR. Informe 3 – Investigación Complementaria Inducida. Barcelona: Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.

prUNE 83982: 2007. Métodos de ensayo. Durabilidad del hormigón. Determinación de la absorción capilar del hormigón endurecido (Método Fagerlund). (proyecto de norma), 2007.

prUNE 83987: 2007. Métodos de ensayo. Durabilidad del hormigón. Determinación de la migración de iones cloruro. Método multirégimen. (proyecto de norma), 2007.

PTEC - Plataforma Tecnológica Española de Construcción. Visión 2030. PTEC, 2005.

Quintero, V. *Evaluación de Proyectos Sociales: Construcción de Indicadores*. 3ª ed. Cali: Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo, 1997. ISBN: 9589362184.

Ravindrarajah, R.; Tam, C. Properties of Concrete Made With Crushed Concrete as Coarse Aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 1985, vol. 37, núm. 130, p. 29-38.

RILEM CPC-18. Rilem Recommendations CPC-18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, 1988, vol. 21, núm. 6, p. 453-455.

RILEM. Hasen, T. (ed.). *Recycled Aggregates and Recycled Agrgregate Concrete. Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. RILEM Report 6. 1ª ed. London: E&FN Spon, 1992.

RILEM. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. *Materials and Structures*, 1994, núm. 27. p. 557-559.

Rincón, O.; Carruyo, A.; Andrade, C.; Helene, P.; Díaz, I. *Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estructuras de hormigon armado*. CYTED – Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento, 1997. ISBN 980-296-541-3.

Rodway, L. Durability of concrete: cement, concrete and aggregates. *CCAGDP*, 1985, núm. 7, p. 43-48.

Ryu, J. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, vol. 21, núm. 20, p. 1565-1567.

Saetta, A.; Schrefler, B.; Scotta, R.; Vitaliani R. Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures Subjected to Carbonation Process. *XX CILAMCE Congress*. São Paulo: XX CILAMCE Congress, 1999.

Sánchez de Juan, M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.

Sani, D.; Moriconi, G.; Fava, G.; Corinaldesi, V. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management*, 2005, vol. 25, núm. 2, p. 177-182.

Sanjuan, M. Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. Tesis Doctoral, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 1992.

Sarja, A.; Vesikari, E. (eds.). Durability Design of Concrete Structures. Chapter 7 Durability models. Manuscript of RILEM Report of TC 130-CSL. RILEM Report Series 14. E & FN Spon, Chapman and Hall, 1996, p. 97-111.

Serna, P. Hormigones con áridos reciclados Aplicaciones estructurales y no estructurales. Ponencia presentada en el Seminario Aplicaciones del Hormigón para una Construcción más Sostenible, en Construtec, Madrid, 6 de octubre de 2010.

Schiessl, P. Durabilidad de las estructuras de hormigón. *Cemento- Hormigón*, 1987, núm. 642, p. 472-485.

Schiessl, P. New Approach to Service Life Design of Concrete Structure. *Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)*, 2005, vol. 6, núm. 5, p. 393-407.

Senthamarai R.; Devadas Manoharan, P. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement & Concrete Composites*, 2005, núm. 27, p. 910-913.

Sentler, L. Stochastic Characterization of carbonation of Concrete. *Third International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1984, p. 569-580.

Siemes, T.; Vries, H. Overview of the development of service life design for concrete structures. *9th International Conference on the Durability of Building Materials and Components*. Brisbane: 9DBMC, 2002.

Sota J., Barreda, M. Valor Agregado de un Residuo Contaminante al Resolver un Problema Tecnológico. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP). Mendoza: PROCQMA - Universidad Tecnológica Nacional, 2006. ISBN 950-42-0056-7.

Tanaka, K.; Yada, K.; Maruyama, I.; Sato, R.; Kawai, K. Study on Corrosion of Reinforcing Bar in Recycled Concrete. A: Vázquez, E; Hendriks, Ch.; Janssen, G. (eds.). *International RILEM*

Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. RILEM Proceedings 40. Bagnaux: RILEM, 2004, p. 643-650. ISBN 2-912143-54-3.

Tang L.; Nilsson, L. A numerical method for prediction of chloride penetration into concrete structures. *The Modelling of Microstructure and it's Potential for Studying Transport Properties and Durability. Proceedings.* France, 1994.

Teranishi, K.; Dosho, Y.; Narikawa, M.; Kikuchi, M. Application of recycled aggregate concrete for structure concrete. Part. 3 – Production of recycled aggregate by real scale plant and quality recycled concrete aggregate. A: Dhir, R.; Henderson, N.; Limbachiya, M. (eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.* London: Tomas Telford, 1998, p. 143 – 156. ISBN 978-0-7277-2726-8.

Thomas, M.; Matthews, J. Carbonation of Fly Ash Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1992, vol. 44, núm. 160. p. 217-228.

Trinius, W. Environmental Assessment in Building and Construction – Goal and Scope Definition as Key to Methodology Choices. PhD Tesis, Kungliga Tekniska Högskolan, 1999, ISBN 91.7170.479.5.

Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 468p.

Udaeta, M.; Kanayama, P. A conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de lixo. *Seminário de Reciclagem de Resíduos.* Vitória: ABM, 1997, p. 215-232.

Uji, K.; Tsutsumi, T.; Maruya, T. Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. *Proceedings of the third international symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction.* London: Elsevier Applied Science, 1990, p. 258-268.

United Nations. Integrated and coordinated implementation and follow-up of major United Nations conferences and summits. A critical review of the development of indicators in the context of conference follow-up, Report of the Secretary-General, Anexo 3. New York: UN, 1999. [Consulta: 07/2010]. Disponible en: <<http://www.un.org/documents/ecosoc/docs/1999/e1999-11>>.

United Nations General Assembly. Resolution A/RES/60/1. 2005 World Summit Outcome, Resolution adopted by the General Assembly on 16 September 2005. New York: United Nations, 2005.

Valls, S.; Vázquez, E. Leaching properties of stabilised/solidified cement-admixtures-sewage sludges systems. *Waste Management*, 2002, vol. 22, núm. 1, p. 37-45.

Van der Sloot, H.; Dijkstra, J. Development of horizontally Standardized leaching tests for construction materials: A material based or release based approach? Identical leaching mechanisms for different materials. ECN, 2004. ECN-C--04-060.

Van Der Sloot, H.; Heasman, L.; Quevauviller, Ph. Harmonization of Leaching/Extraction Tests. *Studies in Environmental Science 70*. Amsterdam: Elsevier Science, 1997. ISBN 0-444-82808-7.

Van Der Sloot, H.; Kosson, D. A unified approach for the judgement of environmental properties of construction materials (cement-based, asphaltic, unbound aggregates, soil) in different stages of their life cycle. *Proceedings of WASCON 2003 Conference*. San Sebastian: WASCON 2003, 2003.

Van der Sloot, H.; Van Zomeren, A.; Dijkstra, J.; Meeussen, J.; Spanka, G.; Stoltenberg-Hansen, E.; Stenger, R. Environmental Impact to Soil and Groundwater through Leaching to Assess the Use of Alternative Materials in Construction: European standardisation, regulatory developments and modelling. *ECO-SERVE Seminar Challenges for Sustainable Construction: the concrete approach*. Warsaw: ECOSERVE, 2006.

Van Der Sloot, H.; Van Zomeren, A.; Meeussen, J.; Dijkstra, J.; Comans, R.; Seignette, P.; Kosson, D. Sanchez, F.; Garrabrants, A.; Hjelmar, O.; Holm, J.; Bjerre Hansen, J.; Laerke Braun, D. Leaching data – interpretation, modelling and scenarios. A: Gawlik, B.; Bidoglio, G. (eds.). *Problems Around Soil and Waste I – Horizontal Aspects of Leaching*. Luxembourg: European Communities, 2005, EUR Report 21659 EN.

Vázquez, E. Ensayos de lixiviación: Aplicación a la utilización ambientalmente correcta de residuos y subproductos en la construcción y gestión de residuos. 2002. Ponencia presentada en el Seminario Impacto Ambiental y Lixiviación – Experiencia Holandesa, en la Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento Ingeniería de la Construcción, Sección de Materiales de Construcción, Barcelona, 9 de abril de 2002.

Vázquez, E. Lixiviación. Apuntes de clase, Asignatura Utilización de Residuos. Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.

Wainwright, P.; Trevorrow, A.; Yu, Y; Wang, Y. Modifying the performace of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. A: Lauritzen, E. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. RILEM Proceedings 23*. London: E & FN Spon, 1994, p. 371-383. ISBN 0-203-63071-8.

Yagishita, F.; Sano, M.; Yamada, M. Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate. A: Lauritzen, E. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. RILEM Proceedings 23*. London: E & FN Spon, 1994, p. 384-399. ISBN 0-203-63071-8.

Yamamoto, A.; Motohashi, K.; Misra, S.; Tsutsumi, T. Proposed Durability Design for RC Marine Structures. A: Sakai, K.; Banthia, N.; Gjorv, O. (eds.). *Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading. Proceedings*. London: E & FN Spon, 1995, p. 544-553.

Zagottis, D. Introdução da Segurança no Projeto Estrutural. São Paulo: PEF/USP, 1974.