

ASPECTOS ESPECIALES DEL CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO UTILIZADO EN EL PUENTE ATIRANTADO SOBRE EL RIO TURIA EN MANISES (VALENCIA)

Marta SÁNCHEZ DE JUAN	Pilar ALAEJOS GUTIERREZ	Alberto DOMINGO CABO	Calos LAZARO FERNÁNDEZ
Dr. Ingeniero de Caminos	Dr. Ingeniero de Caminos	Dr. Ingeniero de Caminos	Dr. Ingeniero de Caminos
CEDEX. Mº de Fomento. Madrid	CEDEX. Mº de Fomento. Madrid	CMD INGENIEROS. Valencia	CMD INGENIEROS. Valencia
Jefe de División de Tecnología de Hormigón	Jefe del Área de Ciencia de Materiales	Director General	Director Técnico
msanchez@cedex.es	palaejos@cedex.es	albertodomingo@cmdingenieros. com	carlafer@mes.upv.es

RESUMEN

Este estudio se centra en una experiencia piloto de hormigón reciclado estructural consistente en un puente atirantado de hormigón armado sobre el río Turia ubicado en la carretera CV-371 (VV-6117) de Manises a Paterna (de dos vanos asimétricos, con 55,00 m de luz del lado Paterna y 90,00 m de luz del lado Manises), que reemplazará a una estructura de hormigón ya existente. El objetivo del proyecto es reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura.

Debido a la singularidad del proyecto, que suponen un hito en el ámbito del reciclado de residuos de construcción y demolición, tanto en nuestro país como a nivel internacional, se ha realizado un control de calidad del hormigón más completo que el estrictamente necesario para un hormigón convencional.

Los resultados obtenidos tanto en los ensayos previos como en los ensayos característicos han sido satisfactorios. En ellos se han evaluado las siguientes propiedades: consistencia, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, profundidad de penetración de agua, retracción y carbonatación.

Palabras Clave: Puente atirantado, hormigón reciclado, control de calidad, ensayos previos, ensayos característicos

1. Introducción

Este estudio se centra en una experiencia piloto de hormigón reciclado estructural consistente en un puente atirantado de hormigón armado sobre el río Turia ubicado en la carretera CV-371 (VV-6117) de Manises a Paterna (de dos vanos asimétricos, con 55,00 m de luz del lado Paterna y 90,00 m de luz del lado Manises), que reemplazará a una estructura de hormigón ya existente. El objetivo del proyecto es reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura.

Para la gestión de los materiales resultantes de la demolición del puente antiguo se optó por el reciclado de los residuos en las obras del proyecto. Esta opción presenta la ventaja de reducir el depósito a vertedero de unos 2000 m³ de un material de buena calidad como son los residuos de hormigón. Por ser una experiencia pionera en nuestro país, se decidió emplear en una proporción máxima de árido reciclado del 20% del peso del árido grueso natural, de acuerdo con el Anejo 15 de la Instrucción EHE 08, utilizando el hormigón reciclado en un tramo de la losa del tablero mixto del nuevo puente (tramo de 90 m), en el que se utilizará un hormigón HA-35 IIb.

El trabajo que está desarrollando el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX consiste en la asistencia técnica necesaria al proyecto y a la Dirección de Obra en los temas relacionados con los materiales reciclados.

2. Trabajos realizados

Las actuaciones llevadas a cabo y la metodología seguida en este estudio han incluido los siguientes pasos.

- **Inspección del puente antiguo.** Para obtener un mayor conocimiento de los materiales disponibles, se realizó una inspección visual del puente antiguo, que permitió establecer zonas de muestreo y ensayos diferenciadas [1]. Se extrajeron testigos y se analizaron en laboratorio, determinando propiedades como la densidad, módulo de elasticidad, resistencia a compresión, profundidad de carbonatación y porosidad.
- **Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.** Se participó en la redacción del PPTP cubriendo los aspectos relacionados con los materiales reciclados. Los requisitos establecidos para el árido reciclado están basados en los que recoge el anejo de la nueva Instrucción EHE "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados".
- **Planificación de la utilización de los materiales reciclados.** Con toda esta información, y partiendo de los criterios establecidos en estudios previos realizados por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX [2], se seleccionaron los elementos del puente actual, a partir de los cuales se obtendría el árido reciclado a utilizar en el hormigón del nuevo puente proyectado. De igual forma, se seleccionaron los elementos del nuevo puente en los que se utilizarán estos áridos reciclados (hormigón HA-35 de un tramo de la losa).
- **Requisitos técnicos de las empresas involucradas.** Se han establecido unos requisitos que se considera deben cumplir cada una de las empresas involucradas en los aspectos del reciclado de los materiales (la empresa constructora, de demolición, de reciclado, la planta de hormigón y la empresa de control de calidad). Algunos de los requisitos establecidos fueron los siguientes:
 - o La **empresa de demolición** realizó una demolición selectiva, separando los elementos de hormigón del resto de materiales.



Figura 1. Demolición de la estructura



Figura 2. Separación de material asfáltico

- o La **planta de producción de los áridos reciclados** debería disponer de sistemas adecuados que permitan obtener unos áridos de calidad suficiente tales como: un acopio individual para los escombros de origen colocado sobre láminas aislantes para evitar la contaminación con tierras u otros materiales no adecuados, un acopio del árido reciclado producido sobre láminas aislantes u otro sistema (por ejemplo Big-Bag) para evitar su contaminación con el terreno, trituradoras de impacto y sistema de eliminación de materiales metálicos mediante cintas magnéticas.



Figura 3. Planta de producción de árido reciclado



Figura 4. Almacenamiento en planta de los escombros

- La **planta de hormigón** deberá ser una central amasadora de Clase A y utilizar un cemento de categoría resistente mínima de 42,5 que deberá tener además un bajo contenido de álcalis. Deberá utilizar arena natural caliza que no sea dolomítica y grava caliza no dolomítica. Durante el almacenamiento de los áridos reciclados en la central de hormigón, los acopios deberán disponer sistemas adecuados para evitar la contaminación de los áridos por el terreno. Estos acopios estarán separados de los áridos naturales. Las instalaciones de dosificación dispondrán además de un silo independiente para los áridos reciclados. Los camiones parara el transporte a obra del hormigón se llenarán como máximo a 2/3 de su capacidad.
- **Realización de ensayos previos y característicos.** Debido a la falta de experiencia previa en la utilización de estos materiales, se han realizado ensayos previos y característicos.
- **Ensayos de ejecución.** Está previsto el hormigonado del tablero en el que se utilizará árido reciclado en septiembre de 2008, por lo que los datos relativos al control de ejecución se recogerán en la ponencia que se presente. Las figuras 5 y 6 muestran el estado actual de las obras.



Figura 5. Estado actual de las obras



Figura 6: Tablero mixto en el que se situará la losa de hormigón reciclado

Se han realizado además algunas recomendaciones para la puesta en obra del hormigón reciclado como las establecidas durante el proceso de curado, en el que se deberá evitar las pérdidas prematuras de agua por evaporación, especialmente superficiales o sometidos a condiciones meteorológicas desfavorables (ambiente seco, caluroso y con viento). Para ello se deberá realizar un curado inicial por nebulizado que deberá aplicarse inmediatamente después que el brillo del agua de exudación desaparezca. Los aspersores utilizados tendrán boquillas especiales que no originen gota gruesa. El curado se hará con agua, y no será inferior a 7 días.

3. Planificación

3.1 Caracterización de los materiales componentes

Se han caracterizado todos los materiales utilizados para la fabricación del hormigón reciclado HA-35 del proyecto: cemento, agua, arena, áridos naturales, áridos reciclados y aditivos (plastificante y superplastificante).

Los áridos utilizados son de tipo calizo no dolomítico, según se especifica en los requisitos técnicos recogidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto (PPTP), separados en las siguientes fracciones granulométricas: Arena: 0/4 mm, Gravilla: 4/12 mm y Grava: 12/20 mm. El cemento utilizado es CEM I 52,5 R, cumpliéndose así el requisito del PPTP que exigía un cemento de categoría resistente mayor o igual a 42,5. Se han utilizado además aditivos plastificante y superplastificante.

Para los ensayos previos se ha utilizado árido reciclado procedente del hormigón de las pilas y de las vigas de hormigón armado del antiguo puente entre Manises y Paterna (Figura 7). De este material se trituroó una parte en una planta fija de reciclado de RCDs, tal y como se especificaba en el PPTP (Figura 8).



Figura 7: Escombros procedentes de la demolición

Figura 8: Árido reciclado obtenido de los escombros

Las tablas 1 y 2 recogen las características físicas de los materiales utilizados. El árido reciclado cumple todas las especificaciones establecidas en el Anejo 15 "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados" de la EHE.

Tabla 1: Propiedades del cemento

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS			
Densidad (t/m ³)	UNE 80103:86	3,14	
Escurecimiento	UNE-EN 196-6:05	91%	
Resistencia a compresión (N/mm ²)	UNE-EN 196-1:05	2 días	28 días
		38,8	56,1
Resistencia a flexión (N/mm ²)	UNE-EN 196-1:05	2 días	28 días
		7,2	9,2
Fraguado	UNE-EN 196-3:96	Principio	Final
		2h. y 30 min (150 min)	3h. y 30min (210 min)
Agujas de Le Chatelier (mm)		1,1	

Tabla 2: Propiedades físicas de los áridos empleados en los ensayos previos

PROPIEDADES	NORMA DE ENSAYO	ARENA	GRAVA NATURAL		GRAVA RECICLADA (4/20 mm)	EHE
			GRAVILLA (4/12 mm)	GRAVA (12/20 mm)		
Contenido de finos (%)	UNE-EN 933-2:96	1	1,90	0,87	0	≤1
Absorción 24h (%)	UNE-EN 1097-6:01	1,69	0,96	0,87	5,38	≤5
Coefficiente de forma	UNE 7238:71	-	0,24	0,28	0,26	≥0,20
Índice de lajas (%)	UNE-EN 933-3:1997	-	26	21	13,91	≤35
Coefficiente de Los Ángeles (%)	UNE-EN 1097-2:99	-	33		32	≤40
Friabilidad de la arena (%)	UNE 8.3115:89	25	-	-	-	≤40

3.2 Ensayos previos

De acuerdo con el artículo 86º de la Instrucción EHE, al no haber experiencia anterior en planta de utilización del árido reciclado, se han realizando ensayos previos en Laboratorio para verificar que el hormigón con áridos reciclados satisface las condiciones que se le exigen en el Pliego de Prescripciones Técnicas particulares, antes de iniciar la producción del mismo. Según recoge la EHE, se han fabricado cuatro series de probetas procedentes de amasadas distintas.

Los ensayos han incluido además de los exigidos por la EHE: consistencia y resistencia a compresión, otros de gran interés para evaluar el futuro comportamiento del hormigón reciclado: módulo de elasticidad, retracción y fluencia, ya que son los aspectos más desfavorables en este tipo de hormigones, así como ensayos de durabilidad: carbonatación y profundidad de penetración de agua (este último requisito no exigido para la clase de exposición IIb).

3.3 Ensayos característicos

De acuerdo con el artículo 87º de la EHE, los ensayos característicos son preceptivos cuando no se posee experiencia previa con los mismos materiales y medio de ejecución. Los ensayos realizados son los mismos que los evaluados en los ensayos previos.

4. Dosificación utilizada

Teniendo en cuenta la proporción de árido reciclado utilizado (20% del total del árido grueso) y la buena calidad de éste, se aplicó la misma dosificación de cemento y agua que utiliza la Central de Hormigón de Paterna para un hormigón H-35 convencional.

El contenido de árido reciclado se calculó como el 20% del contenido de árido grueso natural utilizado en la dosificación de referencia de CEMEX (0,20x(344+671)). La dosificación utilizada se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosificación del hormigón reciclado

	HORMIGÓN DE REFERENCIA	HORMIGÓN RECICLADO
	kg/m3	kg/m3
CEMENTO CEM I 52,5 R	379	379
AGUA	185	185
ARENA	848	848
ARIDO GRUESO 6/12	344	275,2
ARIDO GRUESO 12/20	671	536,8
ARIDO RECICLADO 6/20 (20%)	0	203
PLASTIFICANTE	4,55	4,55
% del contenido de cemento	1,2	
SUPERPLASTIFICANTE	1,99	1,99
% del contenido de cemento	0,5	

5. Fabricación del hormigón

5.1 Ensayos previos

Las fabricación del hormigón se realizó en la amasadora del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX de 60 litros de capacidad, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C192 "Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".

5.2 Ensayos característicos

Los ensayos característicos se realizaron a partir de probetas obtenidas de seis amasadas de 2m³ cada una realizadas por la central de hormigón que suministrará el material a la obra (Figuras 9 y 10). Se utilizaron los materiales habituales de la central de hormigón, con los que ya se habían hecho los ensayos previos en Laboratorio. La dosificación utilizada fue la misma que la de los ensayos previos (Tabla 3).

La central de hormigón disponía de un silo adicional para los áridos reciclados, según se recogía en el PPTP.



Figura 9: Toma de muestras del hormigón reciclado



Figura 10: Mantenimiento de las probetas

6. Ensayos y resultados

6.1 Medida de la consistencia del hormigón fresco

Según el artículo 83 de la EHE, se ha determinado el valor de la consistencia mediante el método de ensayo del Cono de Abrams, descrito en la norma UNE-EN 12350-2:2006. Los resultados del cono en cada una de las amasadas están comprendidas entre 8 y 15 cm en los ensayos previos y entre 8 y 12 cm en los ensayos característicos. La consistencia del hormigón reciclado es fluida, cumpliendo así el requisito establecido en el PPTP.

6.2 Rotura de las probetas

La rotura de las probetas se ha realizado según el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 12390-3:2003.

Tabla 4. Resistencia del hormigón reciclado

Marca de la probeta		f _{cm} a 28 días (N/mm ²) VALOR MEDIO	RECORRIDO RELATIVO
ENSAYOS PREVIOS	AMASADA I	48,3	4,35%
	AMASADA II	48,3	5,80%
	AMASADA III	50,9	4,32%
	AMASADA IV	49,4	6,50%
VALOR MEDIO		49,24 N/mm ²	< 6,50%
ENSAYOS CARACTERÍSTICOS	AMASADA I	46,4	8,18%
	AMASADA II	41,7	9,59%
	AMASADA III	42,5	4,24%
	AMASADA IV	42,7	8,34%
	AMASADA V	44,7	6,26%
	AMASADA VI	39,9	6,51%
VALOR MEDIO		42,98 N/mm ²	<9,60%

Según el artículo 30.3 de la Instrucción EHE, los valores del recorrido relativo en cada una de las amasadas se mantienen muy por debajo del 20% con lo que queda asegurada la homogeneidad del hormigón de cada amasada.

Según el artículo 86 de la EHE el resultado de los ensayos previos se considera favorable si $f_{ck} \leq f_{cm} (1 - 1,64 \delta)$. Si no se conoce el coeficiente de variación δ (en este caso desconocido por tratarse de hormigón reciclado sin experiencia previa en la planta de hormigón) se puede tener como resultado satisfactorio si se cumple $f_{cm} \geq f_{ck} + 8$ (N/mm²)

Según el proyecto, la resistencia característica del hormigón es $f_{ck} = 35$ N/mm²

$$49,24 \geq 35 + 8 \Rightarrow 49,24 \geq 43 \Rightarrow \text{se cumple}$$

Por tanto, se considera satisfactorio el resultado de resistencia a compresión de los ensayos previos, que supera con holgura la resistencia de proyecto.

Según el artículo 87 de la EHE, para evaluar el resultado de los ensayos característicos se toman los 3 valores más bajos, en este caso:

$$x_1 = 39,2 \text{ N/mm}^2$$

$$x_2 = 41,7 \text{ N/mm}^2$$

$$x_3 = 42,5 \text{ N/mm}^2$$

El ensayo característico se considera favorable si

$$x_1 + x_2 - x_3 \geq f_{ck}$$

según el proyecto $f_{ck} = 35$ N/mm²

$$39,2 + 41,7 - 42,5 = 38,4 \geq f_{ck} \Rightarrow \text{se cumple}$$

6.3 Determinación del módulo de elasticidad

El método de ensayo utilizado para la realización de este ensayo es el que recoge la norma americana "ASTM C 469:94 –Static Modulus of Elasticity and Poisson´s Ratio of concrete in compresión", a partir del cual se ha determinado el módulo de elasticidad estático y el coeficiente de Poisson.

Los resultados obtenidos en el ensayo se incluyen en la siguiente tabla:

Tabla 5: Módulo de elasticidad del hormigón reciclado a 28 días

Marca de la probeta		Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Coefficiente de Poisson
ENSAYOS PREVIOS	HRV2-2 (Amasada I)	39331,0	0,279
	HRV2-3 (Amasada I)	37676,6	0,261
	HRV2-12 (Amasada II)	38017,3	0,269
	HRV2-13 (Amasada II)	46645,3	0,321
VALOR MEDIO(*)		38341,6	0,269
ENSAYOS CARACTERÍSTICOS	CEMEX 3-2	32100,4	0,244
	CEMEX 3-2	32021,9	0,238
	VALOR MEDIO(*)	32061,2	0,241

(*) Valor medio descartando el resultado de la probeta HRV2-13 por superar el 20% del valor medio

El valor medio del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos característicos es un 17% inferior al obtenido en los ensayos previos realizados sobre probetas fabricadas en Laboratorio.

La valoración de resultados se hace de acuerdo con el artículo 39.6 de la EHE donde se indica que para el módulo instantáneo de deformación longitudinal secante E_j (pendiente de la secante), se adoptará $E_j = \alpha \cdot 8.500 \cdot (f_{cm,j})^{1/3}$. Al sustituir los valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos en la fórmula anterior, se obtiene un coeficiente α para la mezcla de árido natural y árido reciclado (80% y 20% respectivamente) de 0,90 para los ensayos característicos.

Los áridos gruesos naturales empleados en este estudio son áridos de machaqueo de naturaleza caliza, de densidad 2,60 g/cm³. La EHE establece para este tipo de áridos un coeficiente de corrección (α) sobre la fórmula propuesta en el EHE del mismo valor obtenido en los ensayos característicos, 0,9.

6.4 Determinación de la profundidad de penetración de agua

Los ensayos se realizaron según el procedimiento descrito por la Norma UNE 83.309 - 90 "Ensayos de hormigón. Determinación de la profundidad de penetración de agua".



Figura 11: Equipo para el ensayo de penetración de agua bajo presión



Figura 12: Profundidad de penetración de agua del hormigón reciclado HRV2-5 Y CEMEX 3-6

En la tabla que figura a continuación, se puede observar los valores obtenidos:

Tabla 6: Profundidad de penetración de agua en el hormigón reciclado

Marca de la probeta		Densidad (kg/m ³)	Prof. Máx. (mm)	Valor Medio	Prof. Med. (mm)	Valor Medio
ENSAYOS PREVIOS	HRV2-5	2.343	26,0	26	11,9	13
	HRV2-6	2.350	19,5		10,1	
	HRV2-15	2.337	24,0		13,0	
	HRV2-16	2.358	35,0		16,7	
ENSAYOS CARACTERÍSTICOS	CEMEX 3-4	2.329	29,0	29	14,7	15
	CEMEX 3-5	2.293	31,5		15,5	
	CEMEX 3-6	2.323	27,5		14,9	

De acuerdo con el artículo 85 de la EHE, la valoración del control documental del ensayo de profundidad de penetración de agua, se efectuará sobre un grupo de tres probetas de hormigón. Para estar del lado de la seguridad se van a tomar las tres probetas en las que la penetración de agua ha sido mayor.

Según los nuevos criterios establecidos en la EHE, el hormigón ensayado deberá cumplir simultáneamente las siguientes condiciones (en ambientes IIIc y Qc):

- las profundidades máximas de penetración $Z_m = (Z_1 + Z_2 + Z_3) / 3 \leq 30 \text{ mm}$
- las profundidades medias de penetración $T_m = (T_1 + T_2 + T_3) / 3 \leq 20 \text{ mm}$

Sustituyendo por los valores obtenidos en el ensayo:

Z_m (ensayos previos) = 28,3

T_m (ensayos previos) = 13,9

Z_m (ensayos característicos) = 29

T_m (ensayos característicos) = 15

Se cumplen en ambos casos las dos prescripciones, siendo por lo tanto, válido el ensayo de penetración de agua, incluso en una clase de exposición IIb en la que la EHE no exige su comprobación.

6.5 Determinación de la retracción

El ensayo de retracción se hace de acuerdo con la norma UNE 83.318:94 "Ensayos de Hormigón. Determinación de los cambios de longitud" (Figura 13).

La retracción obtenida experimentalmente es ligeramente superior a la estimada con las fórmulas anteriores de la EHE, obteniendo en término medio un incremento a los 180 días del 13% (Figura 14).



Figura 13: Equipo para el ensayo de retracción

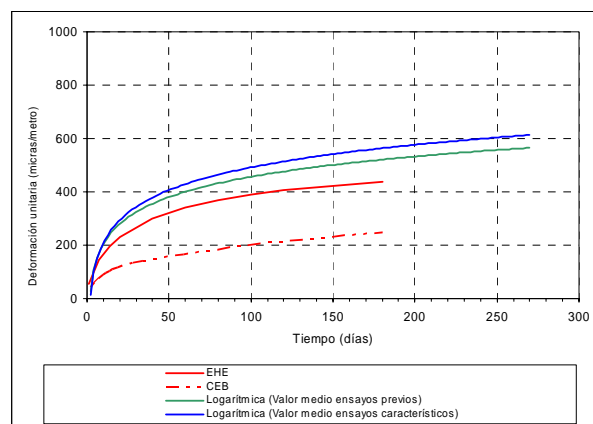


Figura 14: Retracción media del hormigón reciclado estimada según EHE (ensayos previos y característicos)

Según los trabajos realizados en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, en el que se recopilaban más de 200 datos procedentes de diferentes estudios bibliográficos, para hormigones con la misma resistencia se deben aplicar unos coeficientes de corrección para poder estimar la retracción del hormigón reciclado a partir de la retracción

estimada en un hormigón convencional, que en el caso de una sustitución del 20% corresponden a 1,18, valor que prácticamente coincide con los obtenidos en los ensayos.

6.6 Determinación de la profundidad de carbonatación

La determinación de la profundidad, máxima y media, de carbonatación se ha realizado según el método de ensayo descrito en la Norma UNE – EN 13295:2004, determinando medidas hasta los 90 días.

Mientras que en los ensayos previos a esta edad se observó que aunque el frente de carbonatación había avanzado unos milímetros, la profundidad no era suficiente como para poder realizar ninguna medida, la velocidad de carbonatación obtenida en los ensayos característicos (Figuras 15 y 16) fue de 0,47 mm/días^{1/2} para los valores medios y de 0,95 mm/año^{1/2} para los valores máximos.

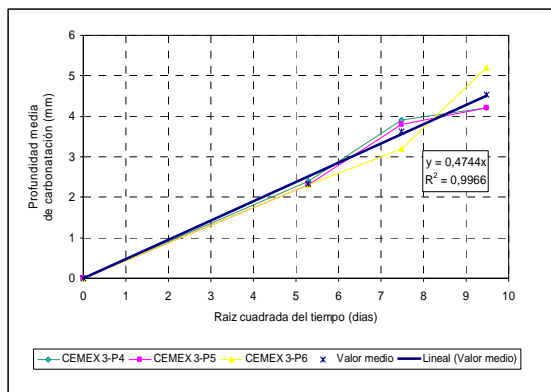


Figura 15: Velocidad media de carbonatación (ensayos característicos)

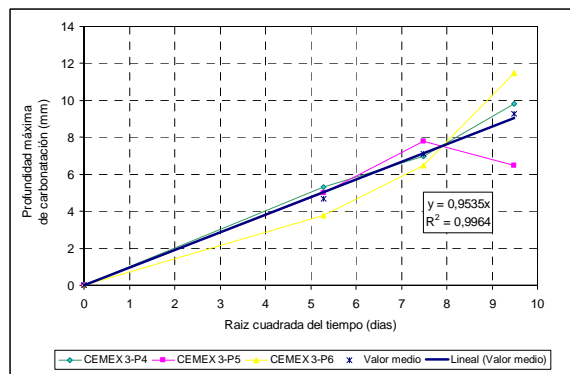


Figura 16: Velocidad máxima de carbonatación (ensayos característicos)

A partir de estos resultados podemos concluir que el comportamiento del hormigón reciclado con un 20% de árido reciclado presenta un comportamiento frente a la carbonatación adecuado, similar al de un hormigón convencional.

7. Planificación de los ensayos de ejecución

Durante la ejecución del tramo del tablero en el que se utilizará hormigón reciclado (que está prevista para septiembre de 2008), se realizarán también ensayos de ejecución mediante el control estadístico del hormigón.

7.1 Control de los componentes del hormigón

Según lo recogido en el PPTP del proyecto, al comienzo de la obra se deberá realizar la caracterización de cada uno de los componentes del hormigón reciclado. Los ensayos se realizarán sobre los lotes recogidos en la Tabla 7. El control del agua y los aditivos se realizará a un solo lote al principio de la obra. Se realizarán los ensayos que prescribe la EHE para cada uno de los materiales.

Tabla 7: Definición de los lotes para de control de los componentes del hormigón

	Cantidad de material	Volumen de la tolva	Número de lotes
Arena	515 t	210	3
Árido grueso natural 6/12 mm	167 t	70	3
Árido grueso natural 12/20 mm	326 t	150	3
Árido reciclado	99 t	70	2

7.2 Control de la calidad del hormigón

Se realizará un control estadístico del hormigón, dividiendo la obra en 8 lotes de 50 m³. Esto coincide con lo recogido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto. En este caso, el control se realizará determinando la resistencia de 6 amasadas por lote.

Se realizarán los siguientes ensayos que prescribe la EHE:

- Temperatura del hormigón

- Consistencia
- Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas curadas en condiciones normalizadas
- Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas curadas en obra en las mismas condiciones de la obra
- Módulo de elasticidad
- Penetración de agua sobre probetas curadas en obra en las mismas condiciones de la obra.
- Carbonatación
- Retracción-fluencia

8. Conclusiones

- La nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) recoge en su Anejo 15 "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados" requisitos que garantizan una calidad mínima del árido reciclado. Cumpliendo los requisitos de este Anejo, se puede conseguir un hormigón reciclado estructural similar a uno convencional en todas sus propiedades.
- Los métodos de dosificación habitualmente utilizados por las plantas de hormigón para hormigón convencional son válidos para la fabricación de hormigones reciclados con hasta un 20% de árido reciclado.
- Tanto en los ensayos previos como los ensayos característicos, se han obtenido unos resultados favorables, cumpliendo en ambos casos, los requisitos establecidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto (PPTP) y lo exigido por la EHE.
 - o A pesar de la mayor absorción que presentan los áridos reciclados, se pueden obtener hormigones con consistencia fluida sin necesidad de presaturar los áridos, utilizando el mismo contenido de aditivo que habitualmente se utiliza para un hormigón convencional.
 - o Los valores de resistencia a compresión han superado la resistencia de proyecto (35 N/mm²), obteniéndose además un recorrido relativo en cada una de las amasadas ensayadas (tanto en los ensayos previos como en los característicos) inferior a lo que establece la EHE (20%).
 - o Al relacionar los valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad, se obtiene un coeficiente α de 0,9, el mismo que establece la EHE para árido calizo.
 - o La retracción obtenida en el hormigón reciclado es ligeramente superior a la estimada con las fórmulas de la EHE, obteniendo en término medio un incremento a los 180 días del 13%.
 - o Las profundidades máximas y medias obtenidas en el ensayo de penetración de agua cumplen los criterios establecidos en la EHE, pudiéndose emplear incluso en los ambientes más agresivos IIIc y Qc(Zm \leq 30 mm y Tm \leq 20 mm).
 - o El comportamiento del hormigón reciclado con un 20% de árido reciclado presenta un comportamiento frente a la carbonatación adecuado, similar al de un hormigón convencional.
- La metodología llevada a cabo y los requisitos del PPTP pueden servir de orientación en futuras aplicaciones del hormigón reciclado estructural.

9. Referencias

- [1] ALAEJOS, P.; DOMINGO, A.; LÁZARO, C.; MONLEON, S.; SÁNCHEZ, M., "Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia). III CONGRESO DE ACHE de Puentes y Estructuras. Las Estructuras del Siglo XXI. Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Zaragoza 14 al 17 de noviembre de 2005.
- [2] SANCHEZ, M.; ALAEJOS, P.; "Estudio sobre las propiedades del árido reciclado: "Utilización en hormigón estructural". ISBN: 978-84-7790-435-9. Editorial: CEDEX. 2006.

10. Agradecimientos

Se agradece el interés por el tema planteado y el apoyo ofrecido de diferentes instituciones, en especial de la Diputación Provincial de Valencia y la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente. Del mismo modo, agradecemos a VIAS Y CONSTRUCCIÓN S.A.; HORMICEMEX y TEC.REC. Tecnología y Reciclado, S.R.L. su colaboración en el proyecto.