

Electrometalurgia y Reciclaje de Materiales

Tema 10. Casos especiales



Carlos Thomas García

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Árido reciclado en hormigón reciclado

Investigaciones llevadas a cabo en España

Estudio de la durabilidad del hormigón con árido reciclado en su aplicación como hormigón armado (1996).

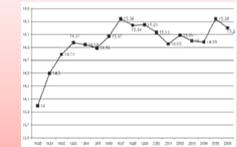
Autora: Marilda Barra.

TABLA 1. Absorción de agua y gravedad específica de tres grupos de hormigón

Designación	Absorción de agua	Referencia	Gravedad específica	Referencia
Grupo I (hormigón en argamasa)	1,64%	--	2,65	--
Grupo II (hormigón en mortero)	1,63%	3,26 (IFRAC 2000)	2,63	3,26 (IFRAC 2000)
Grupo III (hormigón en mortero)	1,63%	3,24 (Rocha 2000)	2,59	3,24 (Rocha 2000)
Grupo IV (hormigón en mortero)	1,63%	3,23 (Castaño y Fidalgo 2003)	--	--
Grupo V (hormigón en mortero)	1,63%	--	2,68	--
Grupo VI (hormigón en mortero)	0,3%	3,25 (IFRAC 2000)	2,72	3,25 (IFRAC 2000)
Grupo VII (hormigón en mortero)	0,3%	3,25 (Rocha 2000)	2,68	3,25 (Rocha 2000)
Grupo VIII (hormigón en mortero)	0,3%	3,25 (Castaño y Fidalgo 2003)	2,74	--

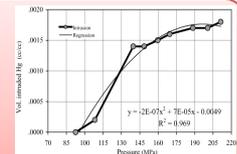
Caracterización de residuos de construcción y demoliciones de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones (2001).

Autor: José Luis Parra Alfaro.



Comportamiento tenso-deformación instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado (2001).

Autor: José Manuel Gómez Soberón.



Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante (2002).

Autora: Belén González Fonteboa.



Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición. RUE (residuos urbanos de edificación) y RAHA (residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos) (2003).

Autor: Gilbert Francisco.

Árido reciclado en hormigón reciclado

Investigaciones llevadas a cabo en España

Estudio de la durabilidad del hormigón con árido reciclado en su aplicación como hormigón armado (1996).

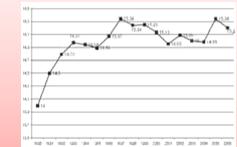
Autora: Marilda Barra.

TABLA 1. Absorción de agua y gravedad específica de tres grupos de hormigón

Designación	Absorción de agua	Referencia	Gravedad específica	Referencia
Grupo I (hormigón con árido natural)	1,64%	--	2,65	--
Grupo II (hormigón con árido reciclado)	1,63%	5,36 (IFRAC 2000) 3,24 (Rocha 2000) 3,25 (Otero y Fidalgo 2003)	2,63	2,58 (IFRAC 2000) 2,59 (Díaz, 2005)
Grupo III (hormigón con árido grueso)	1,63%	--	2,68	--
Grupo IV (hormigón con árido fino)	0,3%	3,26 (IFRAC 2000) 0,46 (Otero y Fidalgo 2003)	2,72	2,62 (IFRAC 2000) 2,68 (Díaz, 2005)
Grupo V (hormigón con árido fino)	0,3%	--	2,74	--

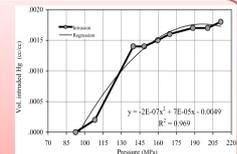
Caracterización de residuos de construcción y demoliciones de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones (2001).

Autor: José Luis Parra Alfaro.



Comportamiento tenso-deformación instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado (2001).

Autor: José Manuel Gómez Soberón.



Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante (2002).

Autora: Belén González Fonteboa.



Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición. RUE (residuos urbanos de edificación) y RAHA (residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos) (2003).

Autor: Gilbert Francisco.

Árido reciclado en hormigón reciclado

Investigaciones llevadas a cabo en España

Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural (2004).

Autora: Marta Sánchez de Juan.



Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje (2006).

Autora: Isabel Martínez Lage.



Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2010).

Autor: Proyecto GEAR.



Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas (2008).

Autor: Fernando López Gayarre.



Comportamiento de hormigones con árido cerámico reciclado: estudio físico-mecánico, microestructural y de durabilidad (2011).

Autor: César Medina Martínez.

Árido reciclado en hormigón reciclado

Investigaciones llevadas a cabo en España

Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural (2004).

Autora: Marta Sánchez de Juan.



Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje (2006).

Autora: Isabel Martínez Lage.



Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2010).

Autor: Proyecto GEAR.



Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas (2008).

Autor: Fernando López Gayarre.



Comportamiento de hormigones con árido cerámico reciclado: estudio físico-mecánico, microestructural y de durabilidad (2011).

Autor: César Medina Martínez.

Árido reciclado en hormigón reciclado

Del análisis de la literatura

Hay unanimidad en la no utilización de la fracción fina del árido reciclado.

Se han encontrado contradicciones en cuanto a cómo afecta el árido reciclado a la durabilidad.

Se han encontrado contradicciones en cuanto a cómo afecta el árido reciclado a las propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos por distintos autores no son comparables entre si.

Existe muy poca literatura sobre el comportamiento a fatiga del hormigón y ninguna sobre el hormigón reciclado.

Árido reciclado en hormigón reciclado

Del análisis de la literatura

¿Pueden resolverse las contradicciones encontradas en la bibliografía sobre la durabilidad?

¿Cómo influye realmente el árido reciclado sobre las propiedades mecánicas del hormigón?

¿Cómo se comporta el hormigón reciclado a fatiga? ¿Pueden aplicarse las técnicas que suelen aplicarse a otros materiales? ¿Pueden mejorarse éstas técnicas?

Árido reciclado en hormigón reciclado

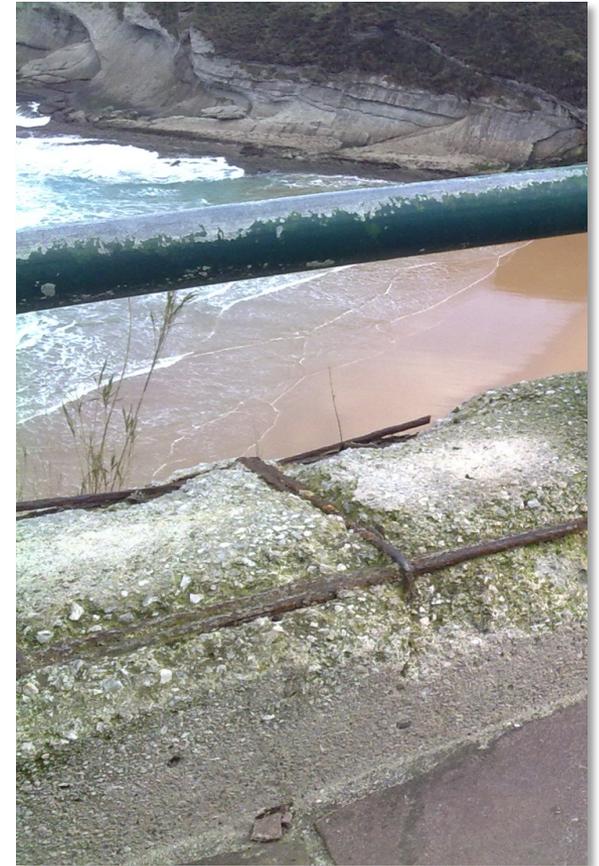
Del análisis de la literatura

¿Pueden resolverse las contradicciones encontradas en la bibliografía sobre la durabilidad?

¿Es fiable el árido reciclado para su utilización en hormigón estructural?

¿Cómo se comporta el hormigón reciclado a fatiga? ¿Pueden aplicarse las técnicas que suelen aplicarse a otros materiales? ¿Pueden mejorarse éstas técnicas?

Durabilidad

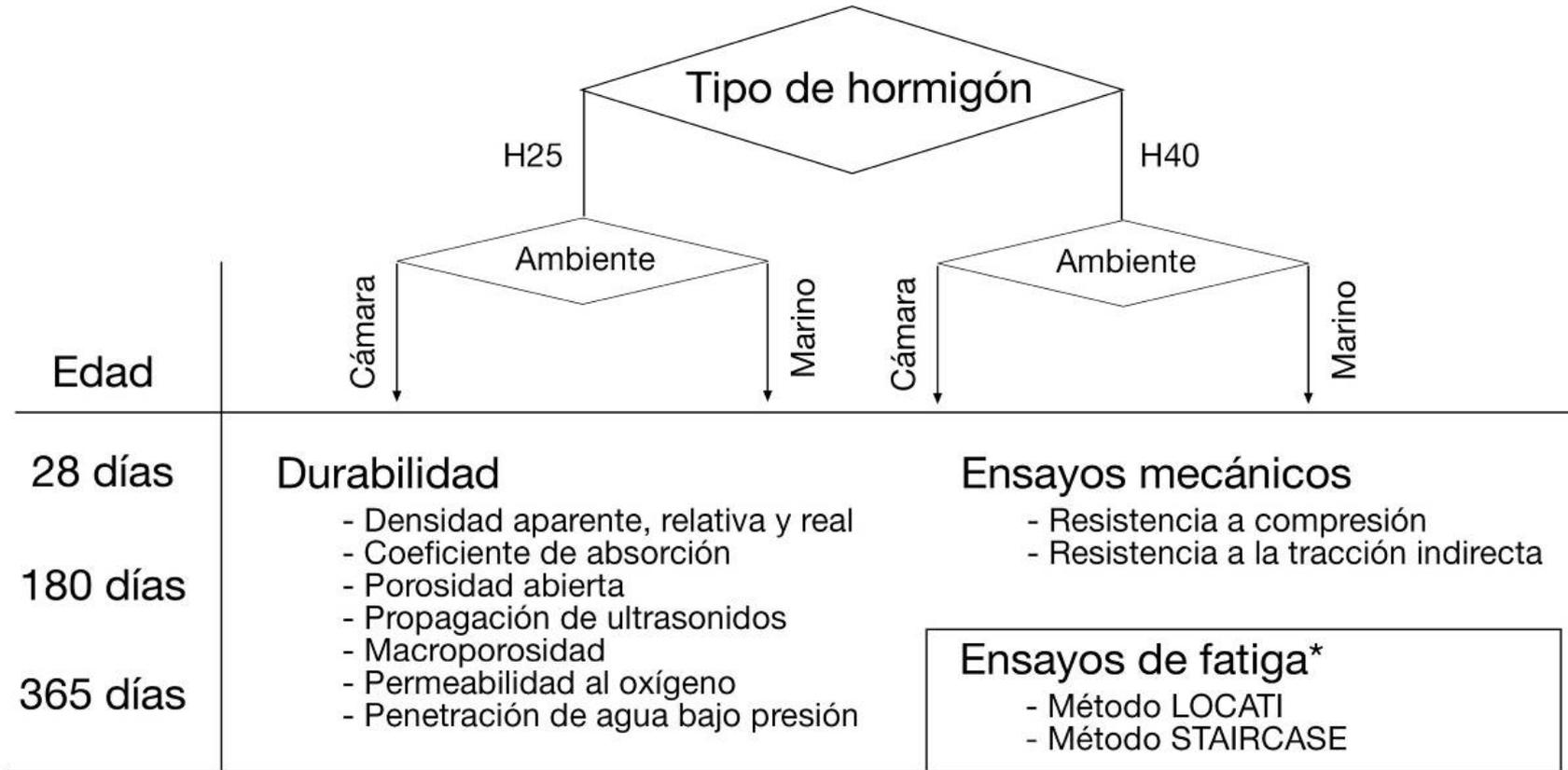


Durabilidad



Propuesta de proyecto de investigación

Objetivos planteados para cada fase: programa experimental (3 Fases y 4 grados de sust.)



* Los ensayos de fatiga se realizarán a una única edad (365 días) y un solo ambiente (cámara de humedad)

Definición de las dosificaciones

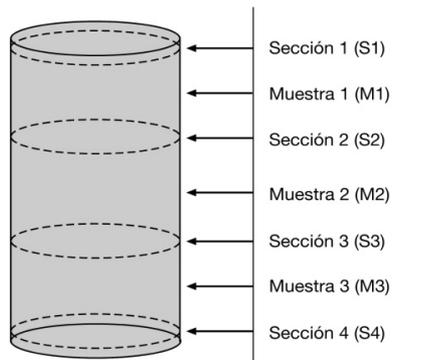
Procedimientos de amasado

PROCEDIMIENTOS DE AMASADO				
FASE	HORMIGÓN	ÁRIDOS RECICLADOS	ÁRIDOS GRUESOS NATURALES	ARENA
Primera	H-0,65	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio
	H-0,50	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio
Segunda	H-0,65AS	Saturados	Saturados	Extendida (seca)
	H-0,50AS	Saturados	Saturados	Extendida (seca)
Tercera	H-0,55ARS	Saturados	En condiciones de laboratorio	Extendida (seca)
	H-0,45ARS	Saturados	En condiciones de laboratorio	Extendida (seca)



Estimación del número de probetas necesarias

Probetas/ensayo por cada una de las 3 fases



Densidad, porosidad y absorción, se requerirán **6 muestras** cilíndricas de 100 mm de altura por 150 mm de diámetro.

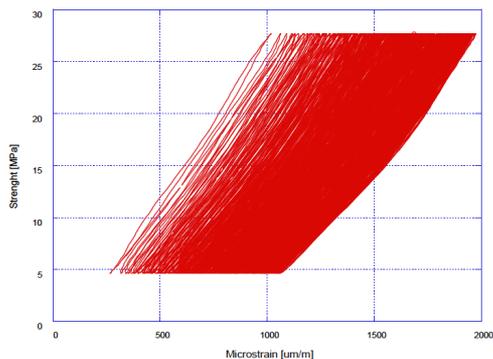
El ensayo de **permeabilidad** se realiza sobre **2 muestras** que corresponden al tercio medio de una probeta cilíndrica normalizada.

$$N_1 = 2 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} \times 2 \text{ Ambientes} \times 3 \text{ Edades} = 96 \text{ Probetas}$$



En los ensayos de **resistencia a compresión** se van a emplear un mínimo de **5 probetas** cilíndricas normalizadas.

$$N_2 = 5 \text{ P.} \times 4 \text{ D.} \times 2 \text{ C.} \times 2 \text{ A.} \times 3 \text{ E.} = 240 \text{ Probetas}$$



Para los **ensayos dinámicos** de comportamiento frente a esfuerzos de fatiga se fabricarán **12 probetas** por dosificación, edad y clase de hormigón.

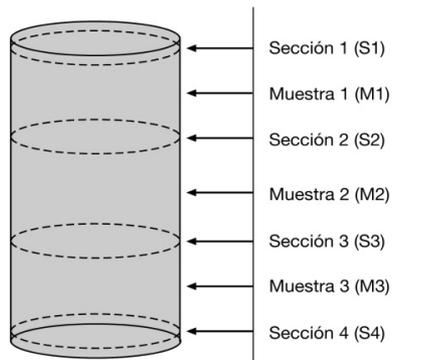
$$N_3 = 12 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} = 96$$

Total probetas 3 fases:

$$N = N_{FASE I} + N_{FASE II} + N_{FASE III} = 1296$$

Estimación del número de probetas necesarias

Probetas/ensayo por cada una de las 3 fases



Densidad, porosidad y absorción, se requerirán **6 muestras** cilíndricas de 100 mm de altura por 150 mm de diámetro.

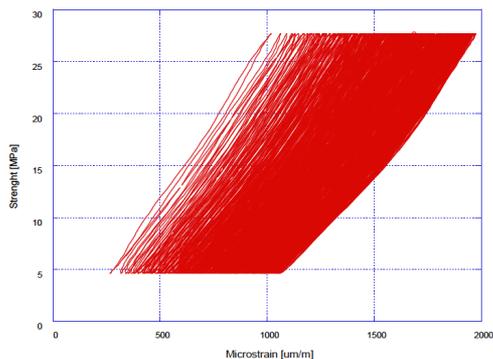
El ensayo de **permeabilidad** se realiza sobre **2 muestras** que corresponden al tercio medio de una probeta cilíndrica normalizada.

$$N_1 = 2 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} \times 2 \text{ Ambientes} \times 3 \text{ Edades} = 96 \text{ Probetas}$$



En los ensayos de **resistencia a compresión** se van a emplear un mínimo de **5 probetas** cilíndricas normalizadas.

$$N_2 = 5 \text{ P.} \times 4 \text{ D.} \times 2 \text{ C.} \times 2 \text{ A.} \times 3 \text{ E.} = 240 \text{ Probetas}$$



Para los **ensayos dinámicos** de comportamiento frente a esfuerzos de fatiga se fabricarán **12 probetas** por dosificación, edad y clase de hormigón.

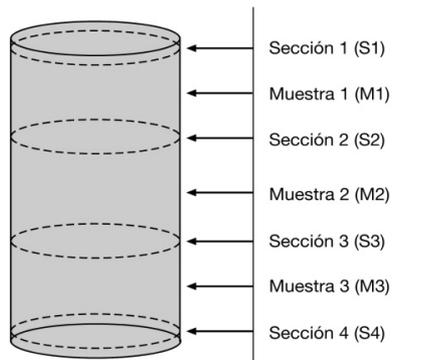
$$N_3 = 12 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} = 96$$

Total probetas 3 fases:

$$N = N_{FASE I} + N_{FASE II} + N_{FASE III} = 1296$$

Estimación del número de probetas necesarias

Probetas/ensayo por cada una de las 3 fases



Densidad, porosidad y absorción, se requerirán **6 muestras** cilíndricas de 100 mm de altura por 150 mm de diámetro.

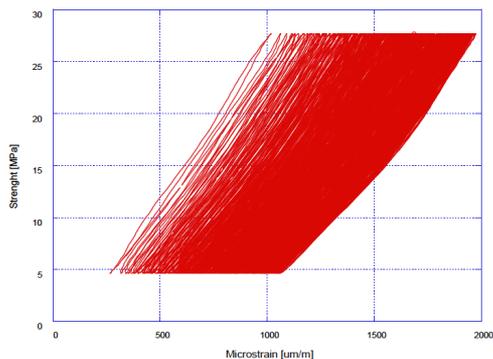
El ensayo de **permeabilidad** se realiza sobre **2 muestras** que corresponden al tercio medio de una probeta cilíndrica normalizada.

$$N_1 = 2 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} \times 2 \text{ Ambientes} \times 3 \text{ Edades} = 96 \text{ Probetas}$$



En los ensayos de **resistencia a compresión** se van a emplear un mínimo de **5 probetas** cilíndricas normalizadas.

$$N_2 = 5 P. \times 4 D. \times 2 C. \times 2 A. \times 3 E. = 240 \text{ Probetas}$$



Para los **ensayos dinámicos** de comportamiento frente a esfuerzos de fatiga se fabricarán **12 probetas** por dosificación, edad y clase de hormigón.

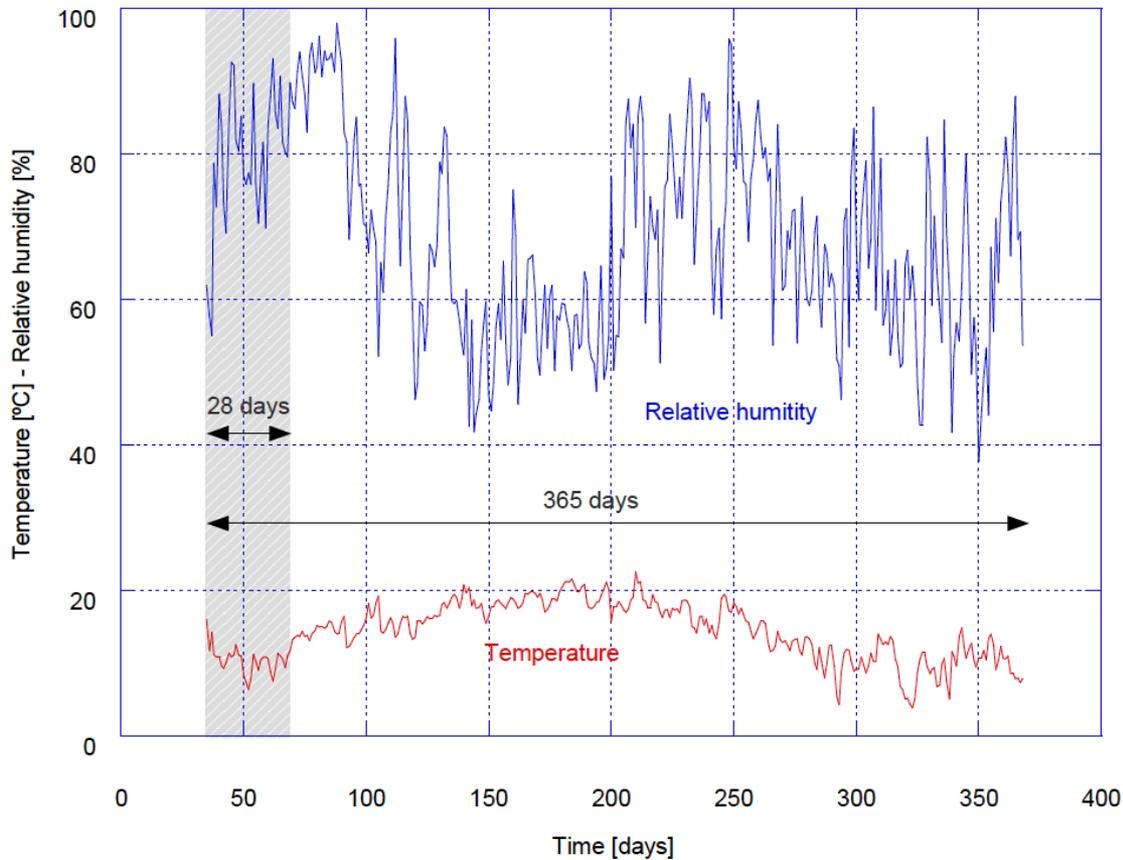
$$N_3 = 12 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} = 96$$

Total probetas 3 fases:

$$N = N_{FASE I} + N_{FASE II} + N_{FASE III} = 1296$$

**186 AMASADAS.
93 DÍAS DE AMASADO.**

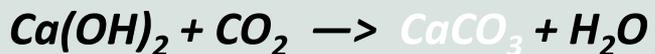
Condiciones climatológicas durante el curado en intemperie



Condiciones climáticas en la ciudad de Santander (ambiente marino), España, en el periodo de enero de 2007 a enero de 2008.

Durabilidad del hormigón reciclado

Carbonatación



Superficie interior de una probeta normalizada de hormigón, rota por tracción indirecta, a la que se ha aplicado una fina capa de fenolftaleína.

Permeabilidad al agua



Dispositivo experimental para los ensayos de penetración de agua bajo presión.

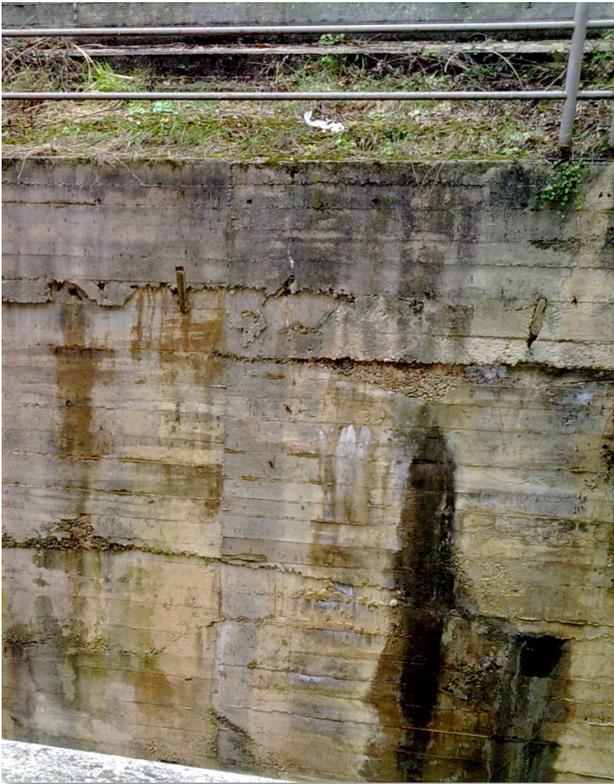


Perfil de profundización del agua en los ensayos de penetración de agua bajo presión.

Carbonatación (UNE 83993-1:2009)

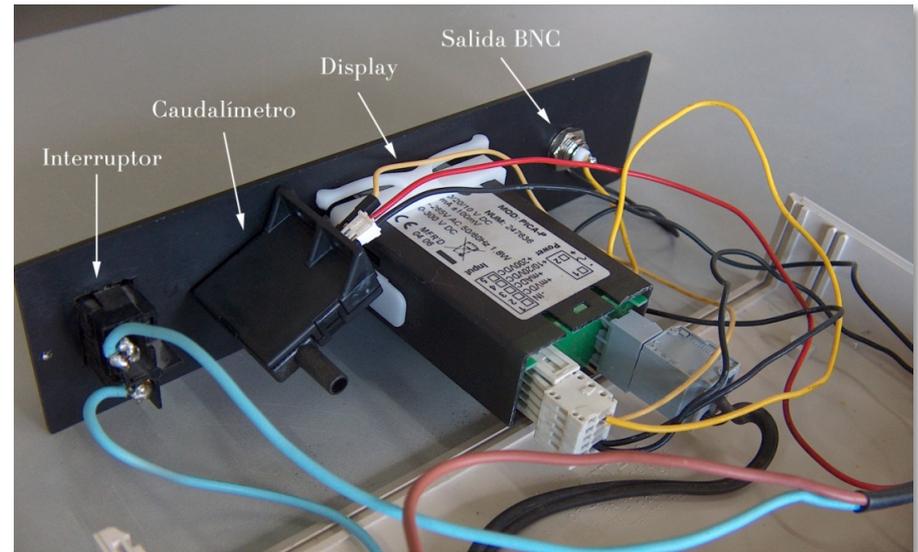
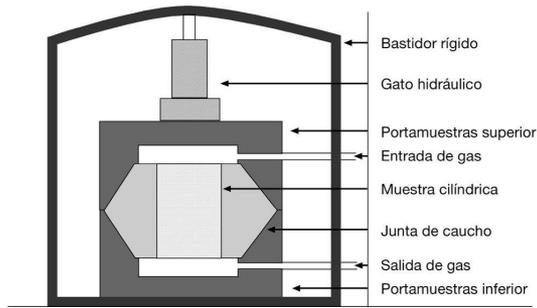


Profundidad de penetración de agua bajo presión (UNE-EN 12390-8:2009) en el hormigón reciclado



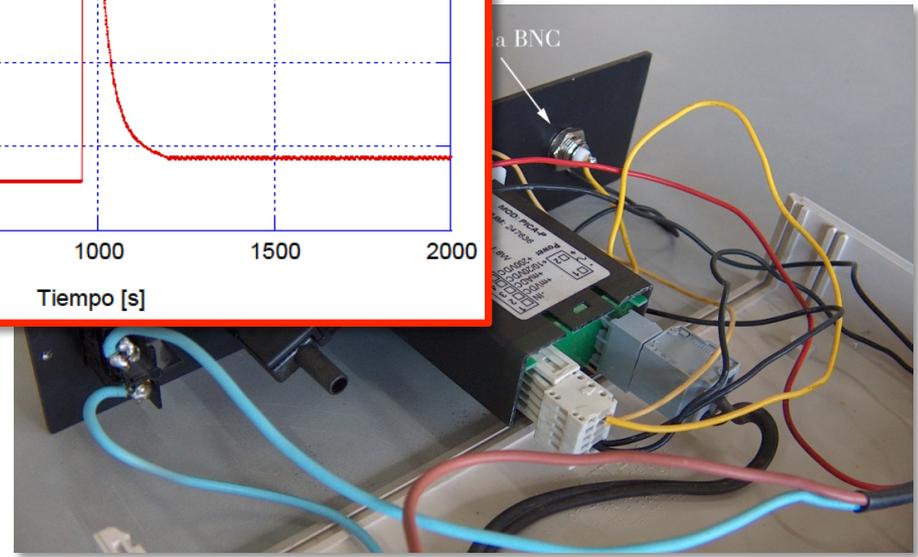
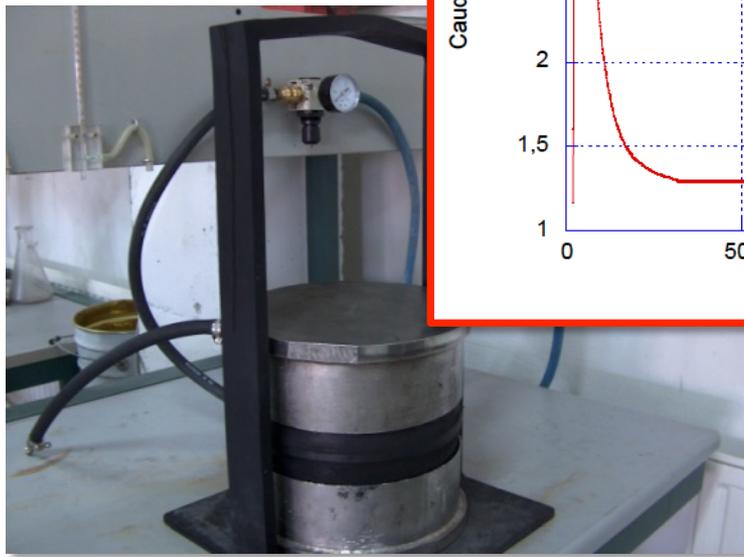
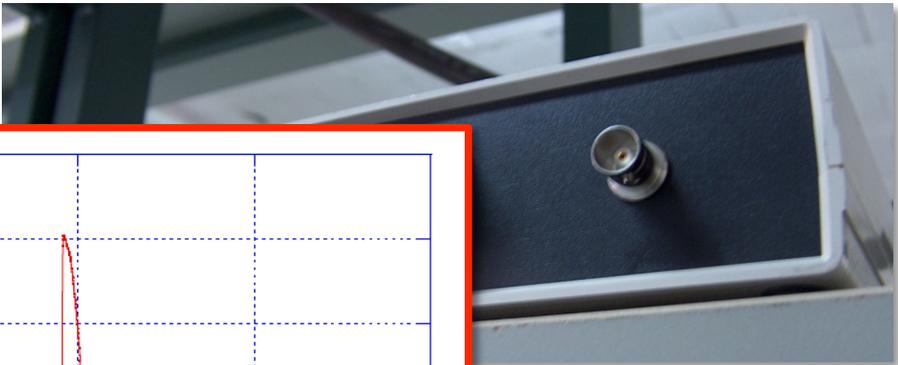
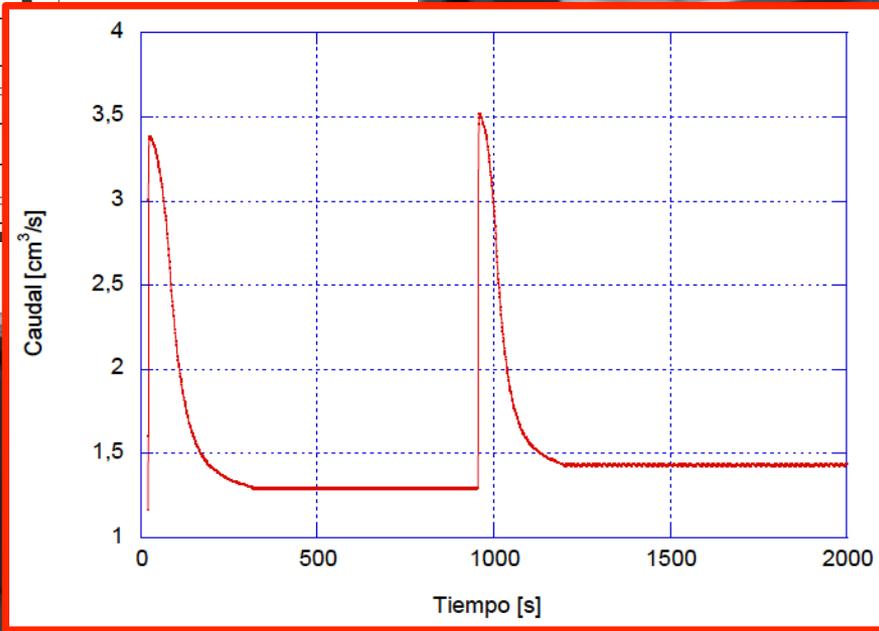
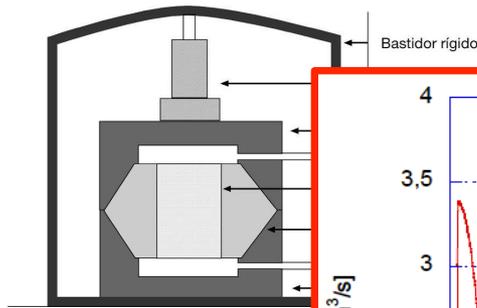
Durabilidad del hormigón reciclado

Coefficiente de permeabilidad al oxígeno



Durabilidad del hormigón reciclado

Coefficiente de permeabilidad al oxígeno



Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Resistencia a compresión



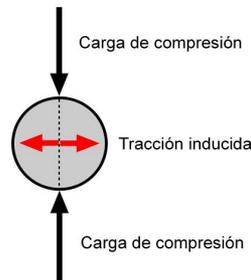
Probetas normalizadas de hormigón refrentadas (arriba) y ensayada a compresión (izquierda).

Módulo de elasticidad



Fotografía de una probeta instrumentada con galgas extensométricas y colocada entre los platos de la prensa para el ensayo.

Resistencia a la tracción indirecta



Esquema de fuerzas (izquierda) y tercio de probeta cilíndrica ensayada (derecha) a tracción indirecta.

Propiedades del hormigón fresco

Cálculo de la relación agua/cemento efectiva

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

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

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



$\left\{ \frac{w}{c} \right\}_{ef.}^i$: es la relación agua/cemento efectiva de la fase i : I; II y III.

w : es la cantidad de agua empleada en la dosificación sin cuantificar la humedad.

P_i^{CL} : es el peso en condiciones de laboratorio del árido i : grava (**G**); gravilla (**g**) y árido reciclado (**AR**).

P_i^{SAT} : es el peso del árido i tras la condición de presaturación: árido grueso (**AG**) y árido reciclado (**AR**).

A_i : es la absorción total del árido i : grava (**G**); gravilla (**g**) y árido reciclado (**AR**).

Propiedades del hormigón fresco

Cálculo de la relación agua/cemento efectiva

Árido reciclado seco: reducción en la cantidad de agua.

Árido grueso presaturado: no hay efecto negativo del árido reciclado.

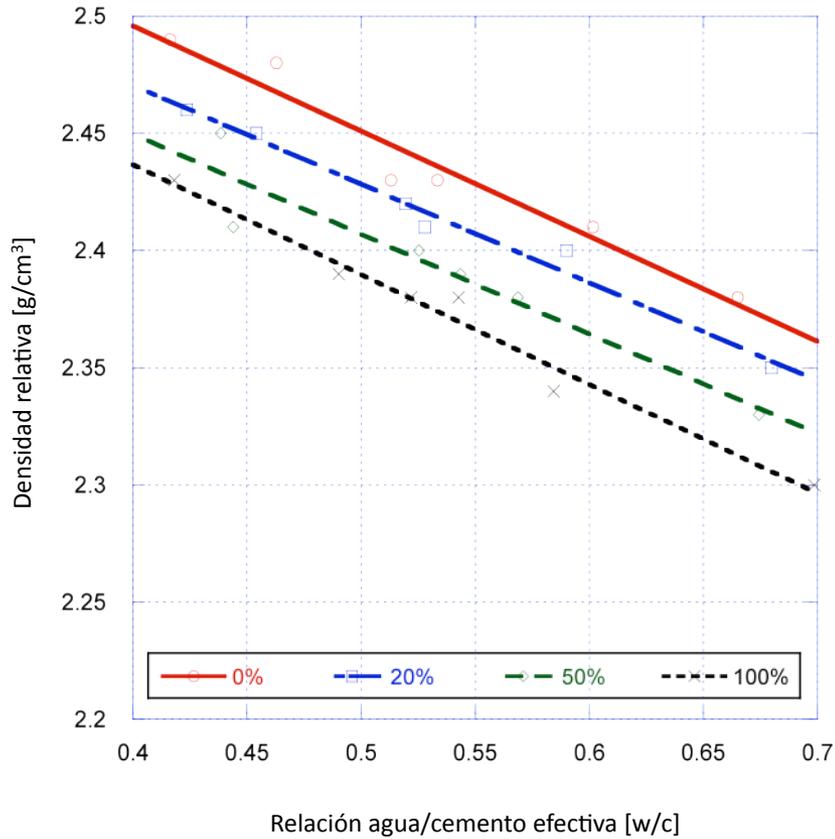
Árido reciclado presaturado: aumento de la cantidad de agua.

**Se recomienda presaturar el árido reciclado,
¡¡¡teniendo precaución en el cálculo de la relación agua/cemento efectiva!!!**

A_i : es la absorción total del árido i : grava (G); gravilla (g) y árido reciclado (AR).

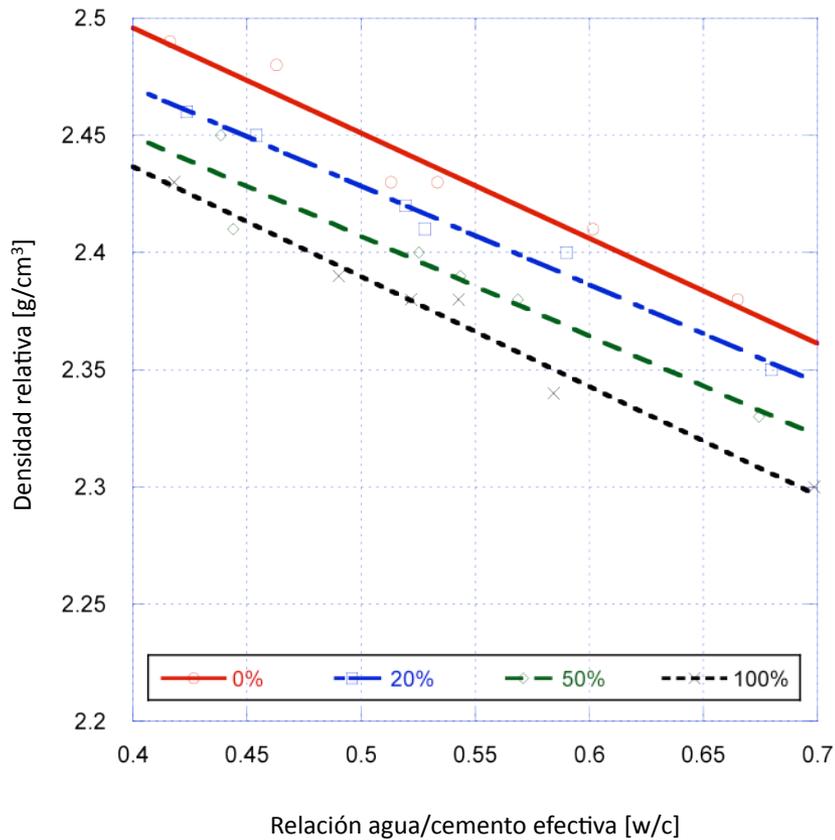
Propiedades físicas del hormigón reciclado

Densidad relativa



Propiedades físicas del hormigón reciclado

Densidad relativa

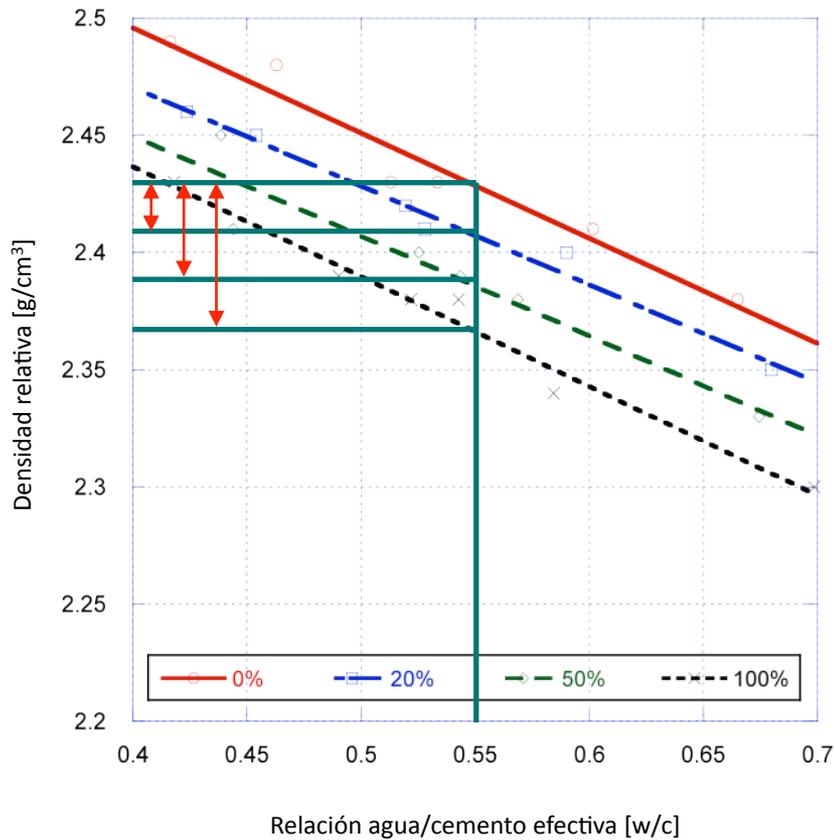


Pasados 28 días la evolución es pequeña.



Propiedades físicas del hormigón reciclado

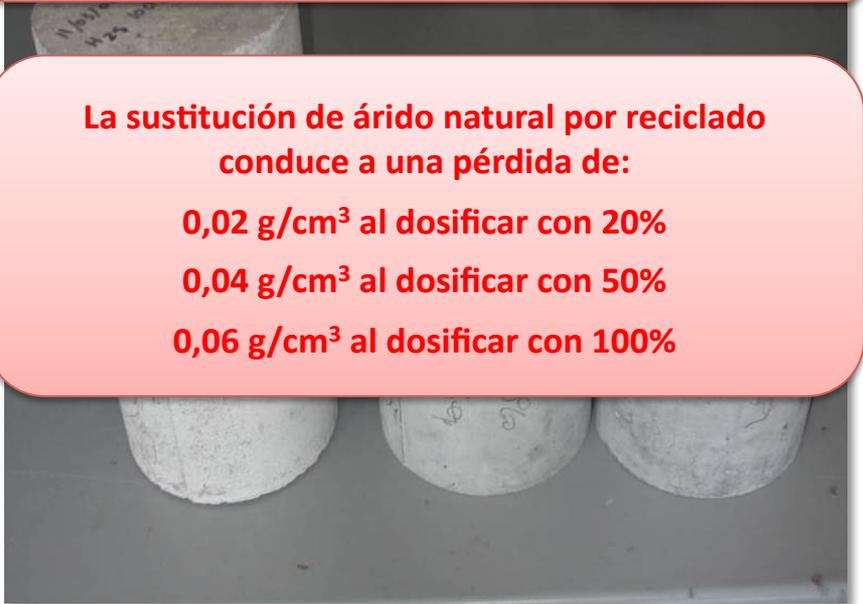
Densidad relativa



Pasados 28 días la evolución es pequeña.

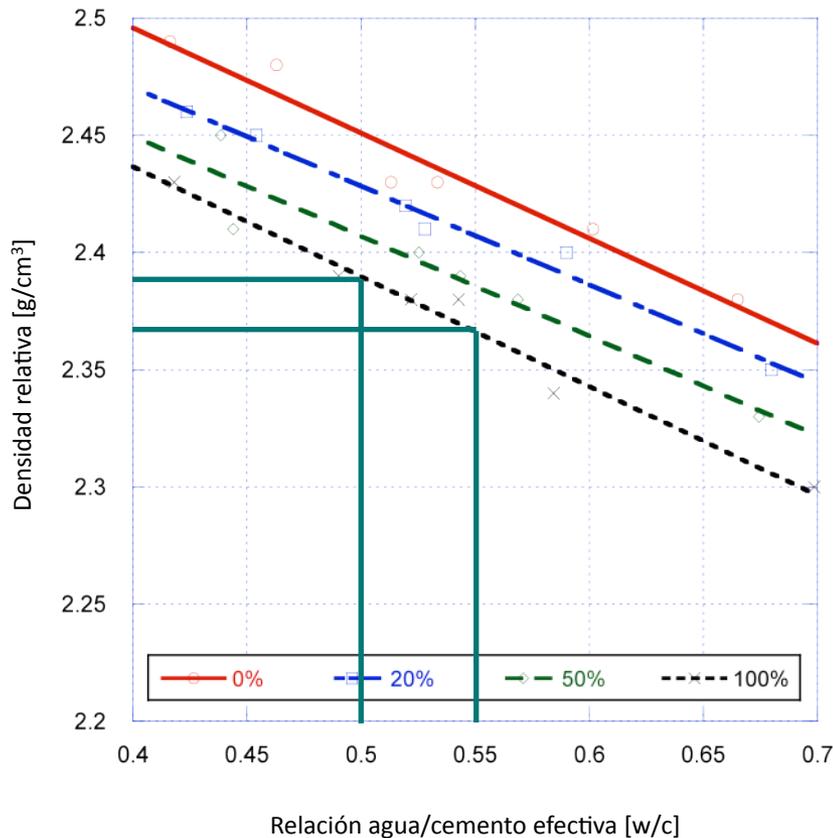
La sustitución de árido natural por reciclado conduce a una pérdida de:

- 0,02 g/cm³ al dosificar con 20%**
- 0,04 g/cm³ al dosificar con 50%**
- 0,06 g/cm³ al dosificar con 100%**



Propiedades físicas del hormigón reciclado

Densidad relativa



Pasados 28 días la evolución es pequeña.

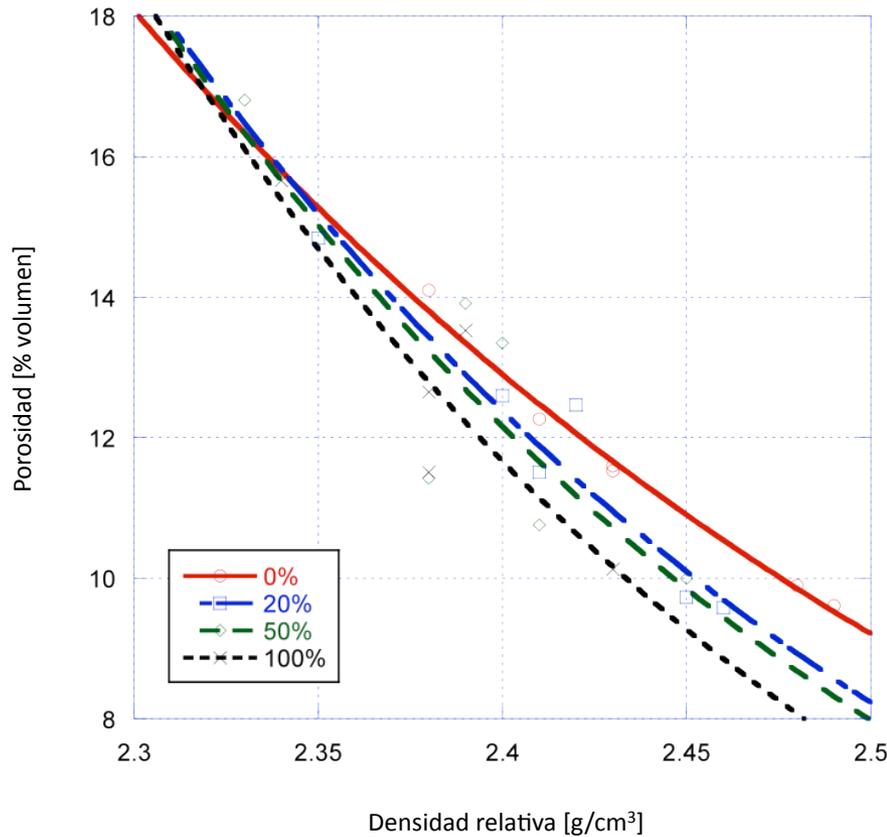
La sustitución de árido natural por reciclado conduce a una pérdida de:

- 0,02 g/cm³ al dosificar con 20%**
- 0,04 g/cm³ al dosificar con 50%**
- 0,06 g/cm³ al dosificar con 100%**

Variaciones en la relación agua/cemento de 0,1 suponen cambios de 0,05 g/cm³.

Propiedades físicas del hormigón reciclado

Porosidad accesible frente a la densidad

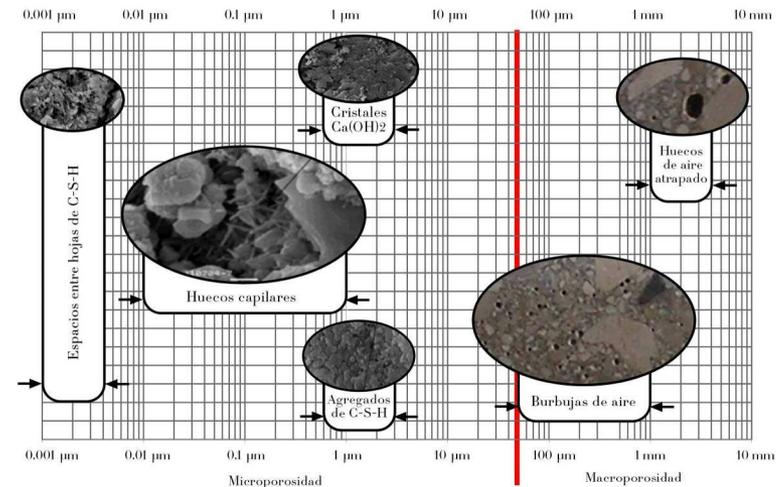


$P = 4.2 \times 10^4 * e^{(-3.4d)}$ $R^2 = 0.99$

$P = 2.2 \times 10^5 * e^{(-4.1d)}$ $R^2 = 0.92$

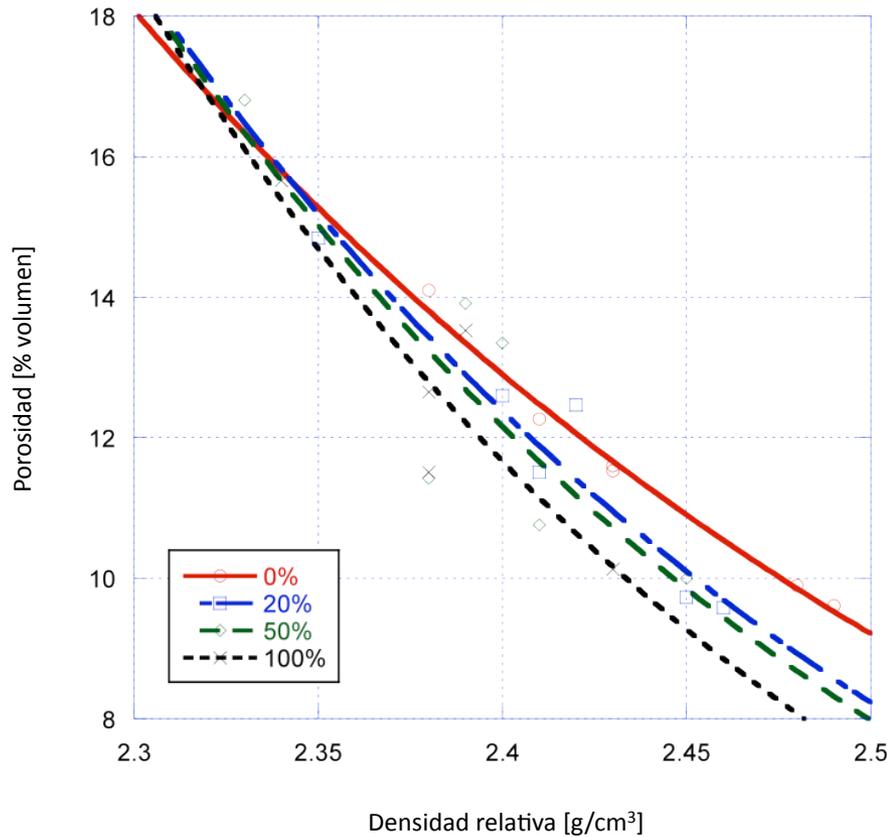
$P = 3 \times 10^5 * e^{(-4.2d)}$ $R^2 = 0.77$

$P = 7.3 \times 10^5 * e^{(-4.6d)}$ $R^2 = 0.92$

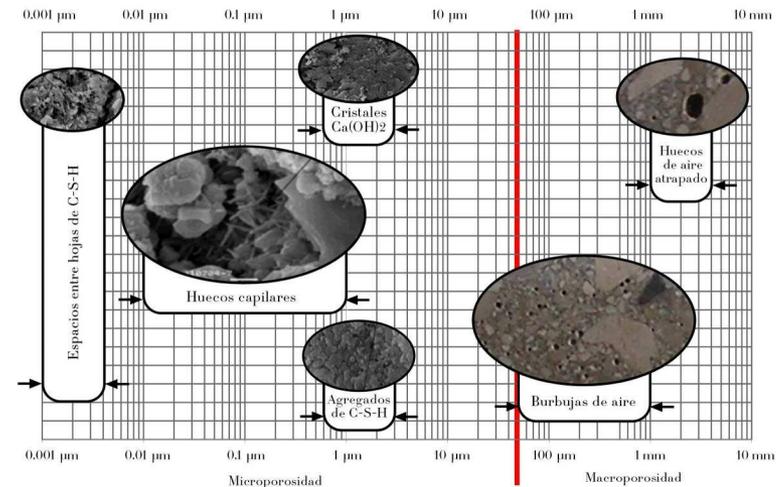


Propiedades físicas del hormigón reciclado

Porosidad accesible frente a la densidad

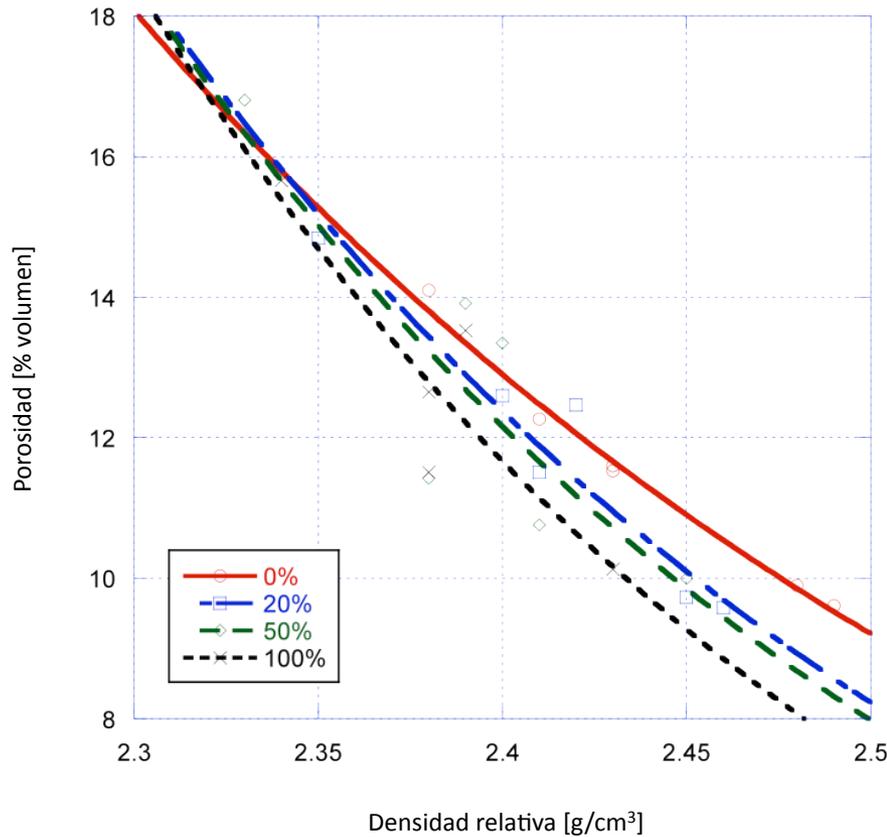


Relación de tipo exponencial entre la porosidad accesible y la densidad del hormigón.



Propiedades físicas del hormigón reciclado

Porosidad accesible frente a la densidad



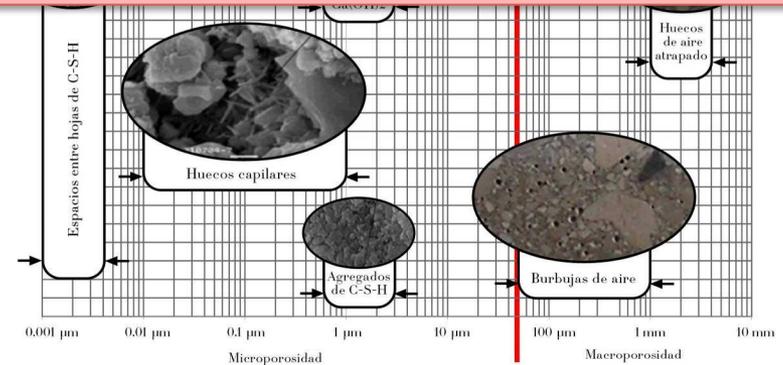
Relación de tipo exponencial entre la porosidad accesible y la densidad del hormigón.

— P = $2.2 \times 10^5 \cdot e^{(-4.1d)}$ R² = 0.92

- - P = $3 \times 10^5 \cdot e^{(-4.2d)}$ R² = 0.77

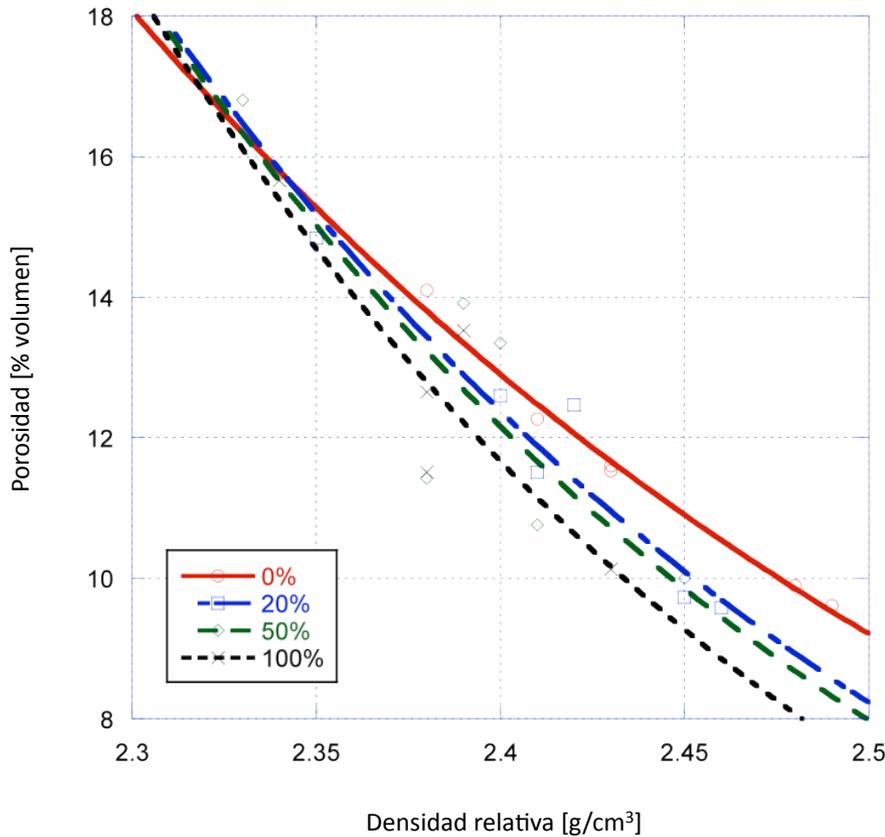
- - - P = $7.3 \times 10^5 \cdot e^{(-4.6d)}$ R² = 0.92

Las curvas tienden a confluir cuando la porosidad se sitúa por encima del 18%.



Propiedades físicas del hormigón reciclado

Porosidad accesible frente a la densidad



Relación de tipo exponencial entre la porosidad accesible y la densidad del hormigón.

$P = 2.2 \times 10^5 * e^{(-4.1d)}$ $R^2 = 0.92$

$P = 3 \times 10^5 * e^{(-4.2d)}$ $R^2 = 0.77$

$P = 7.3 \times 10^5 * e^{(-4.6d)}$ $R^2 = 0.92$

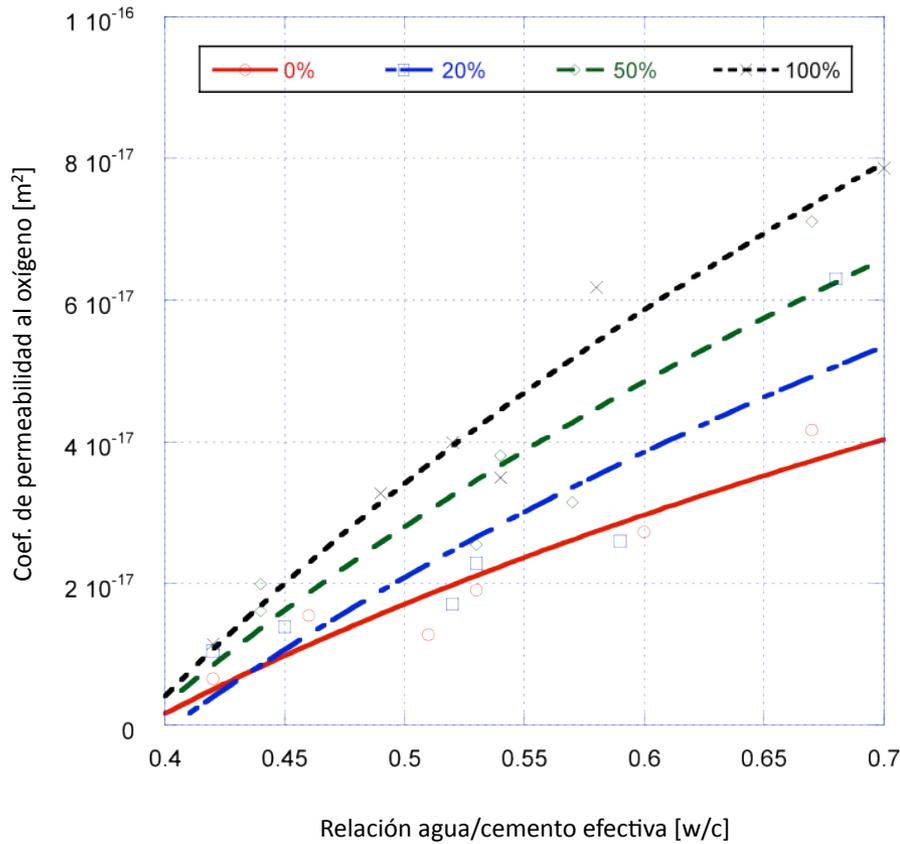
Las curvas tienden a confluir cuando la porosidad se sitúa por encima del 18%.

La influencia del árido reciclado es poca cuando la porosidad del hormigón es alta o la densidad baja.



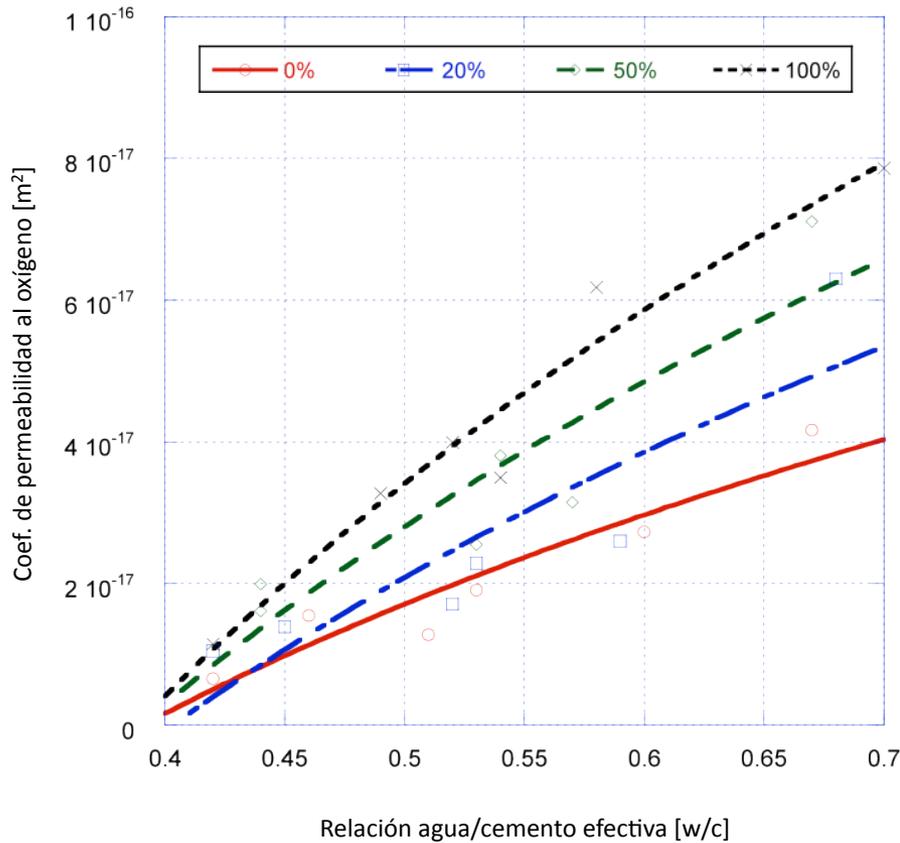
Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno



Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno

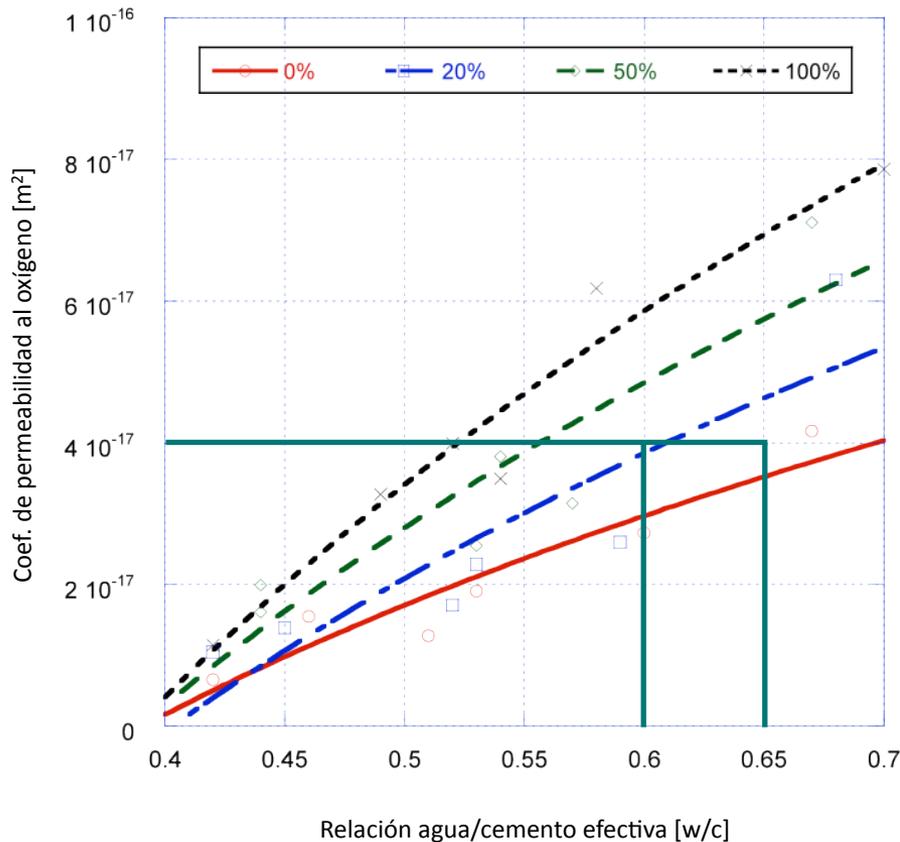


Tendencias logarítmicas siendo más permeable el hormigón reciclado.



Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno



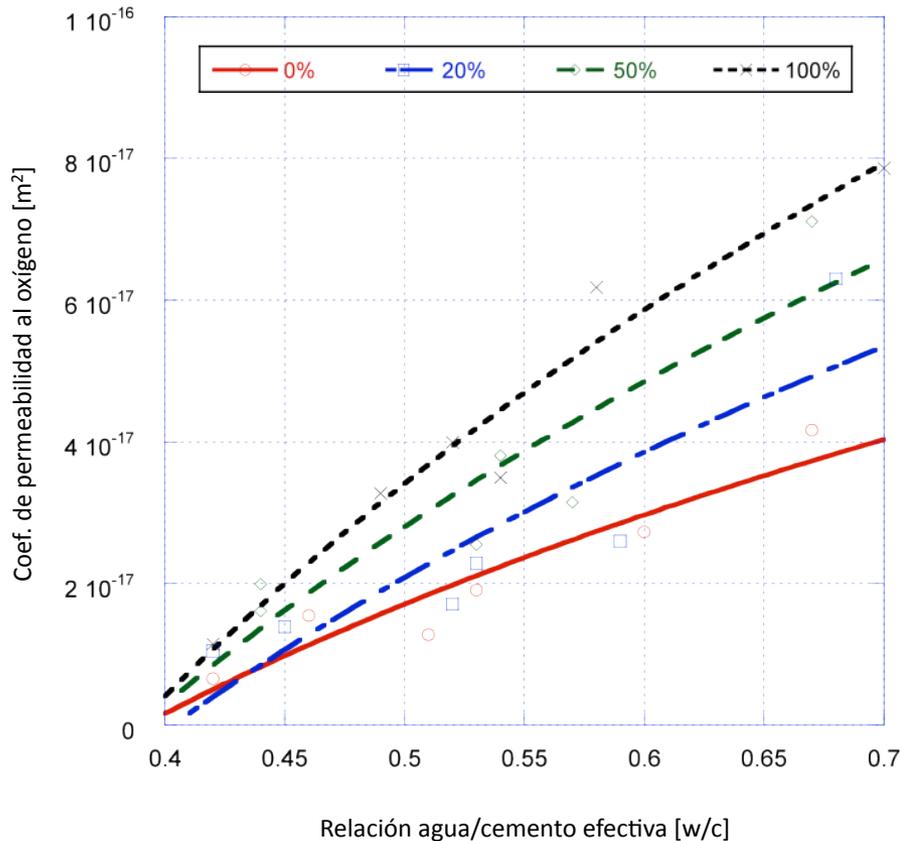
Tendencias logarítmicas siendo más permeable el hormigón reciclado.

Una incorporación de un 20% de árido reciclado y una reducción de 0,05 en la relación agua/cemento proporciona la misma permeabilidad que el hormigón de control de 0,65.



Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno



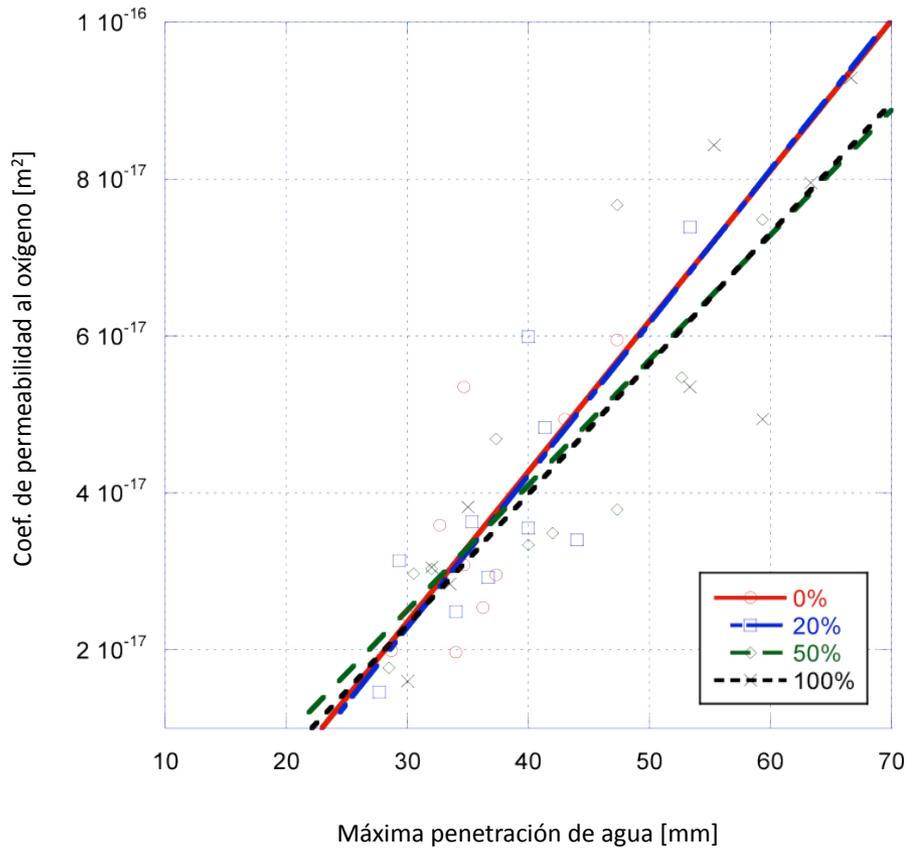
Tendencias logarítmicas siendo más permeable el hormigón reciclado.

Una incorporación de un 20% de árido reciclado y una reducción de 0,05 en la relación agua/cemento proporciona la misma permeabilidad que el hormigón de control de 0,65.

El efecto negativo del árido reciclado es menor para hormigones con bajas relaciones agua/cemento.

Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno frente a la permeabilidad al agua



$$y = -3.4e-17 + 1.9e-18x \quad R^2 = 0.57$$

$$y = -3.5e-17 + 1.9e-18x \quad R^2 = 0.69$$

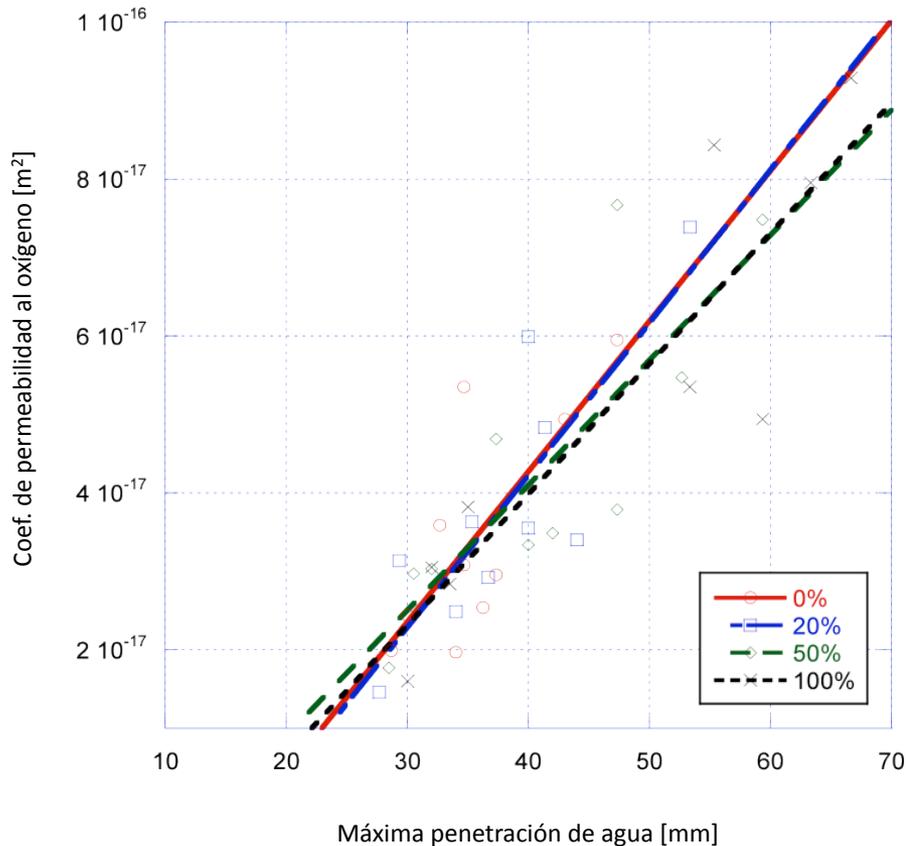
$$y = -2.3e-17 + 1.6e-18x \quad R^2 = 0.67$$

$$y = -2.7e-17 + 1.7e-18x \quad R^2 = 0.81$$



Durabilidad del hormigón reciclado

Permeabilidad al oxígeno frente a la permeabilidad al agua



$$y = -3.4e-17 + 1.9e-18x \quad R^2 = 0.57$$

$$y = -3.5e-17 + 1.9e-18x \quad R^2 = 0.69$$

$$y = -2.3e-17 + 1.6e-18x \quad R^2 = 0.67$$

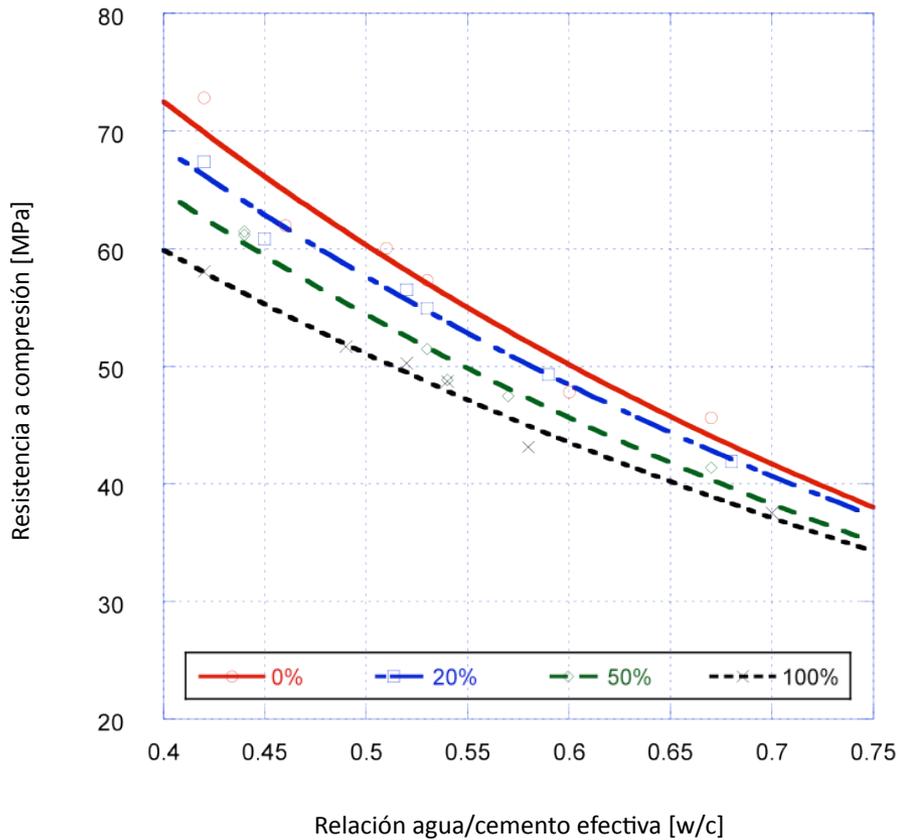
$$y = -2.7e-17 + 1.7e-18x \quad R^2 = 0.81$$

Los dos parámetros de permeabilidad estudiados reflejan de manera similar la circulación de un fluido a través de la red capilar del hormigón.



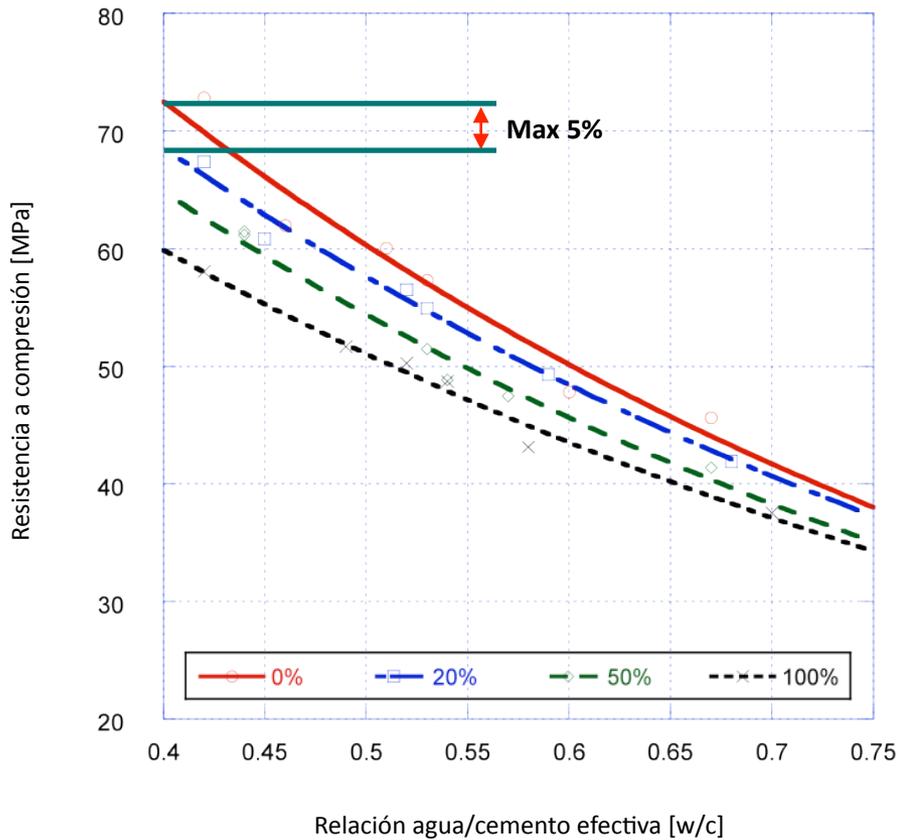
Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Resistencia a compresión



Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Resistencia a compresión

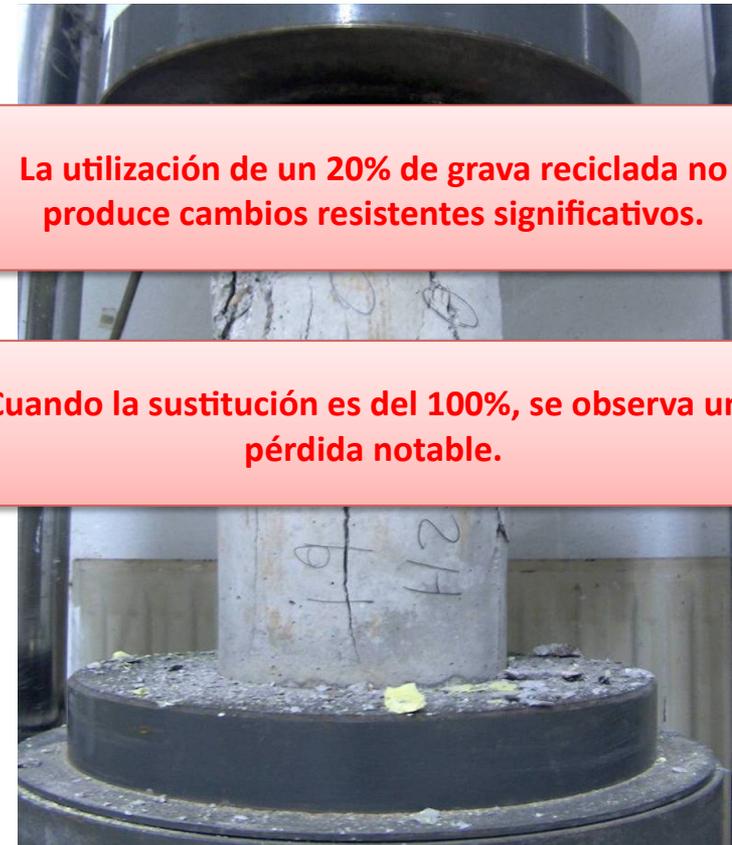
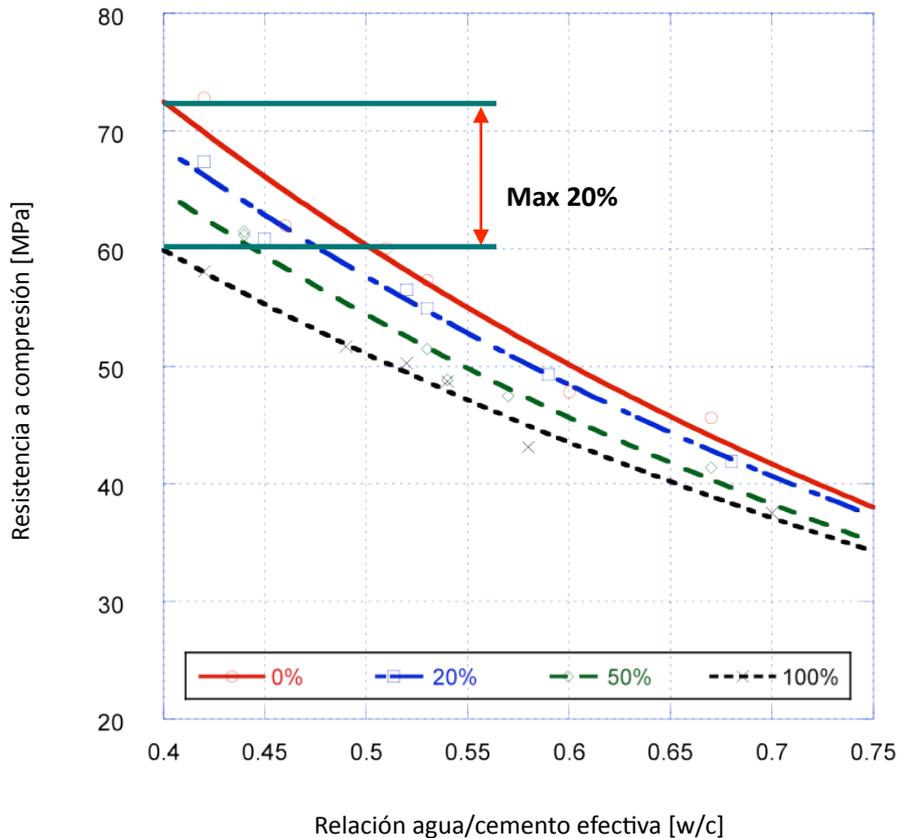


La utilización de un 20% de grava reciclada no produce cambios resistentes significativos.



Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Resistencia a compresión

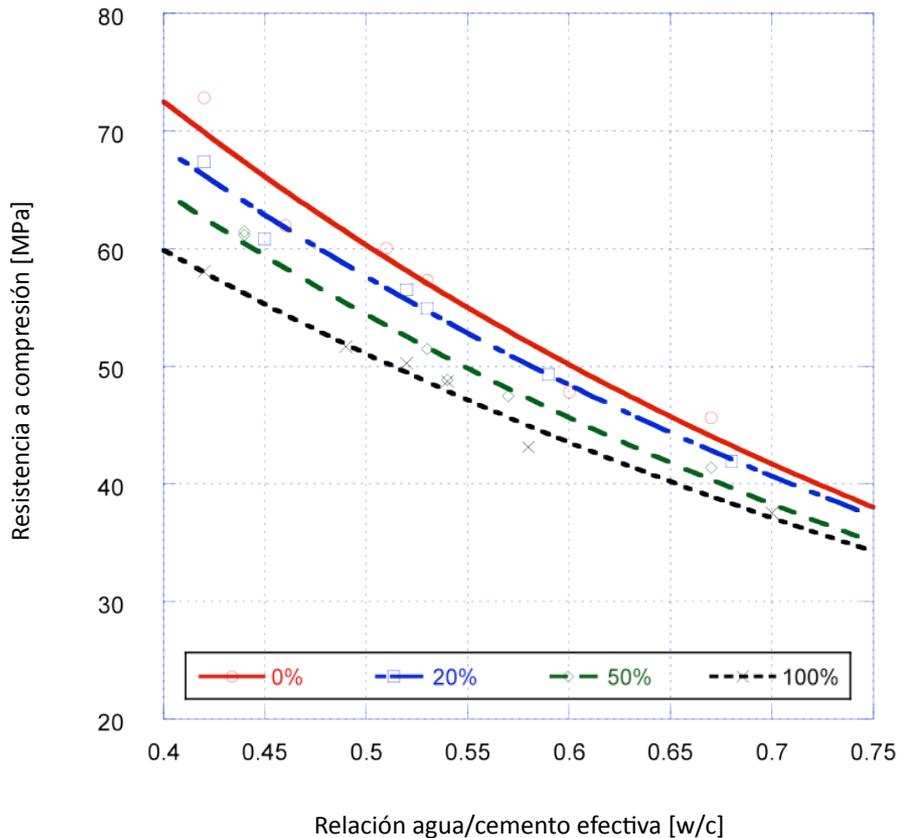


La utilización de un 20% de grava reciclada no produce cambios resistentes significativos.

Cuando la sustitución es del 100%, se observa una pérdida notable.

Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Resistencia a compresión



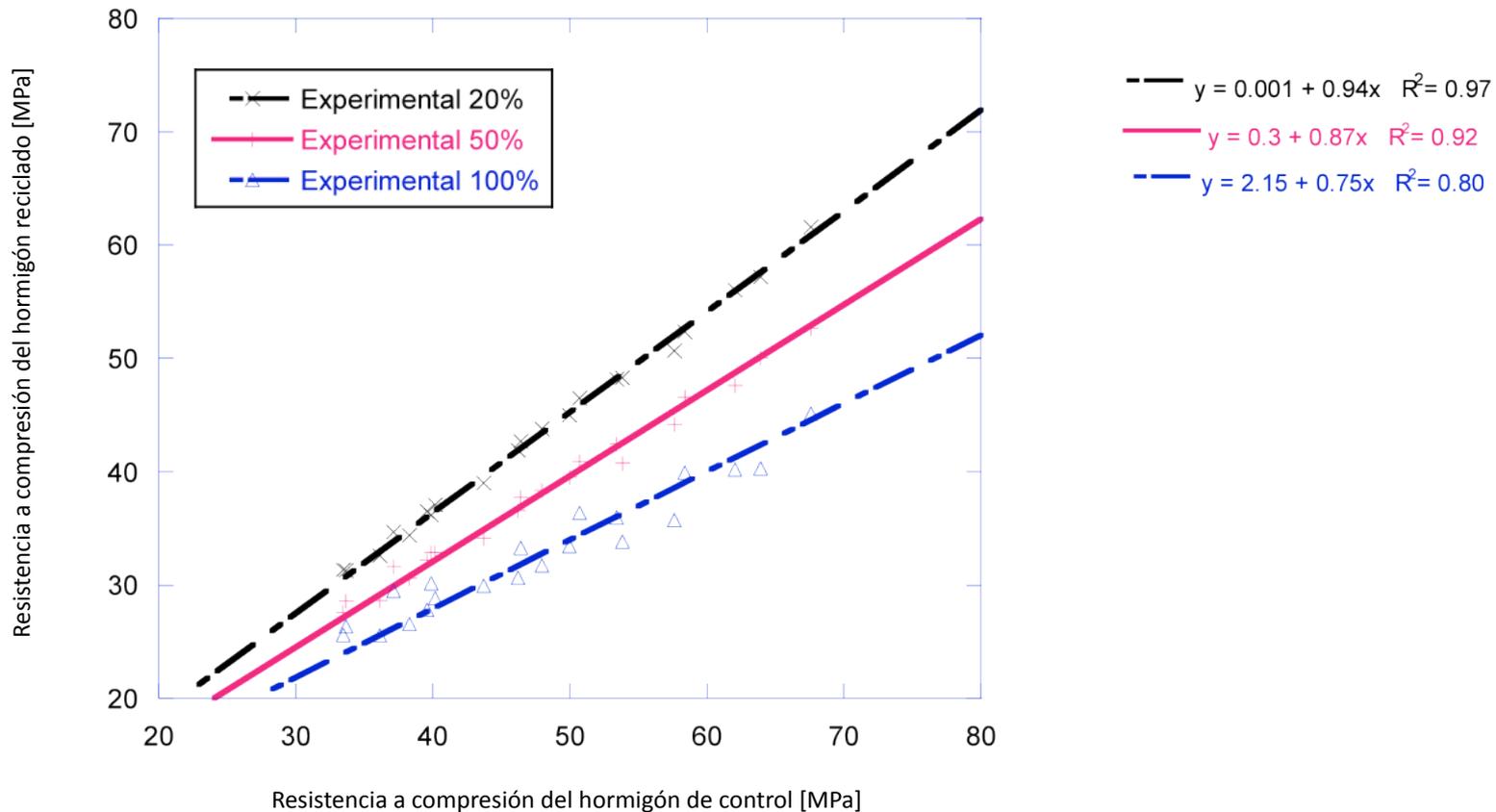
La utilización de un 20% de grava reciclada no produce cambios resistentes significativos.

Cuando la sustitución es del 100%, se observa una pérdida notable.

Para garantizar iguales niveles resistentes, es necesario reducir la relación agua/cemento en 0,05.

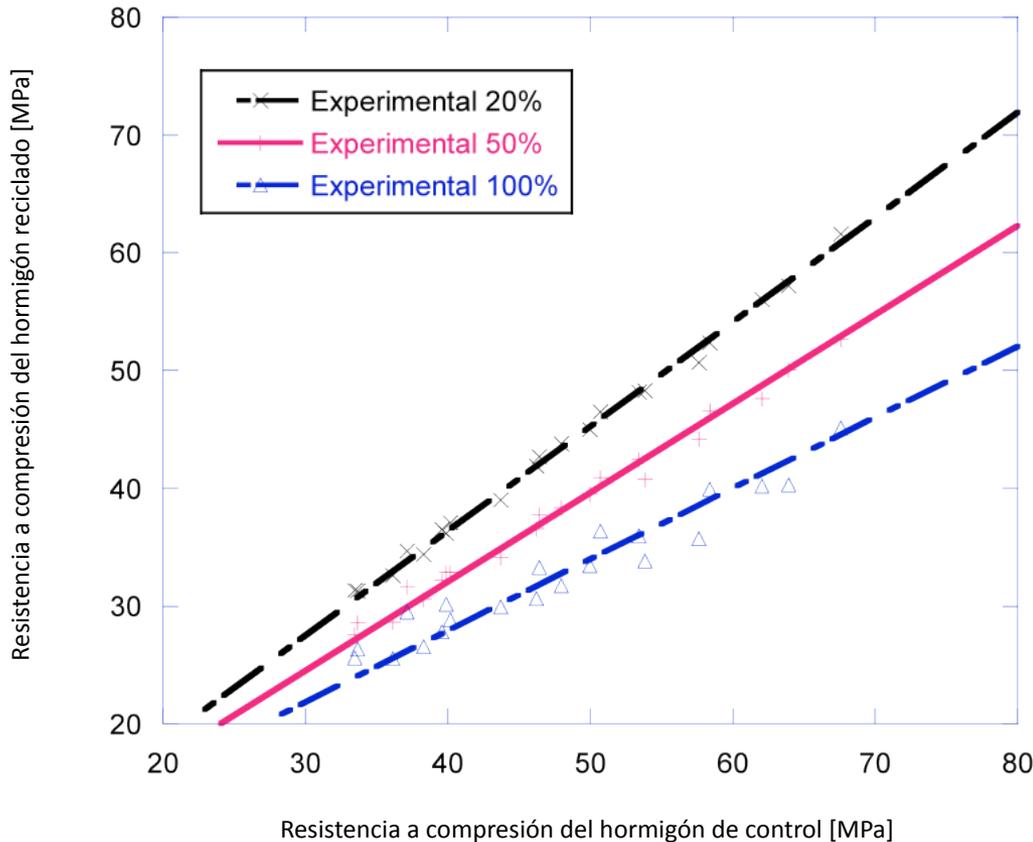
Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión



Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

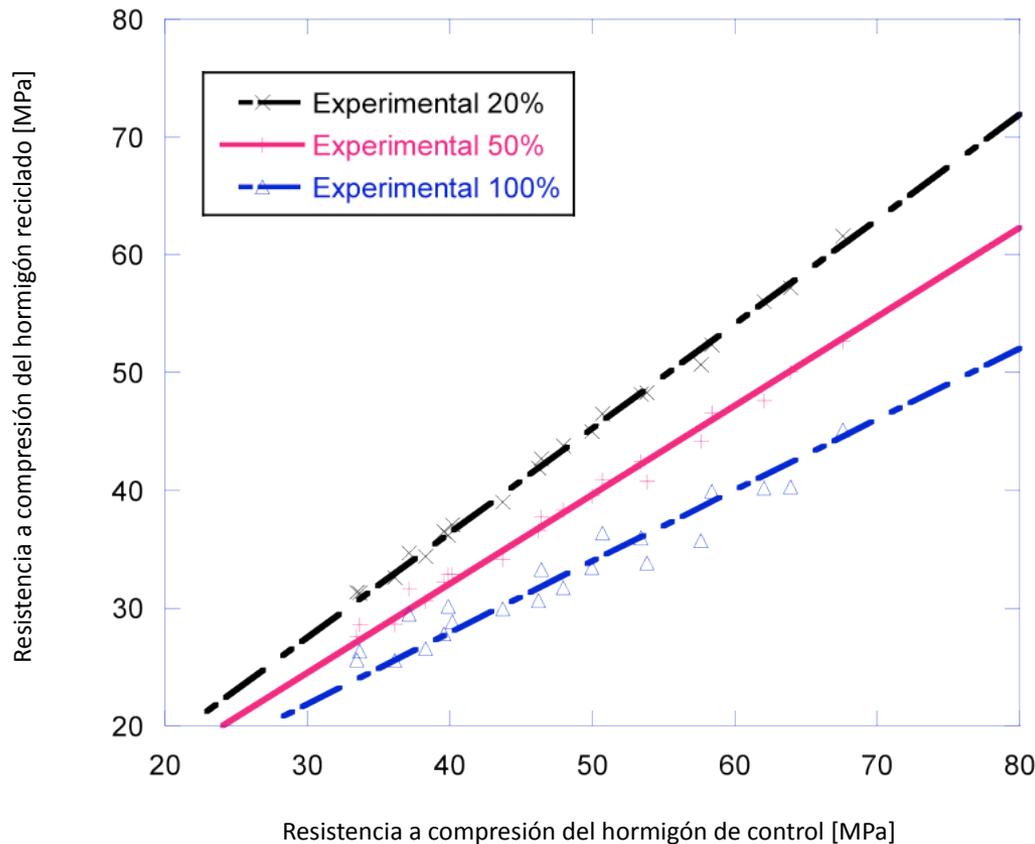
Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión



Ajuste lineal de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados (F_{RC}) frente a la resistencia del hormigón de control (F_{CC}) correspondiente.

Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión



Ajuste lineal de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados (F_{RC}) frente a la resistencia del hormigón de control (F_{CC}) correspondiente.

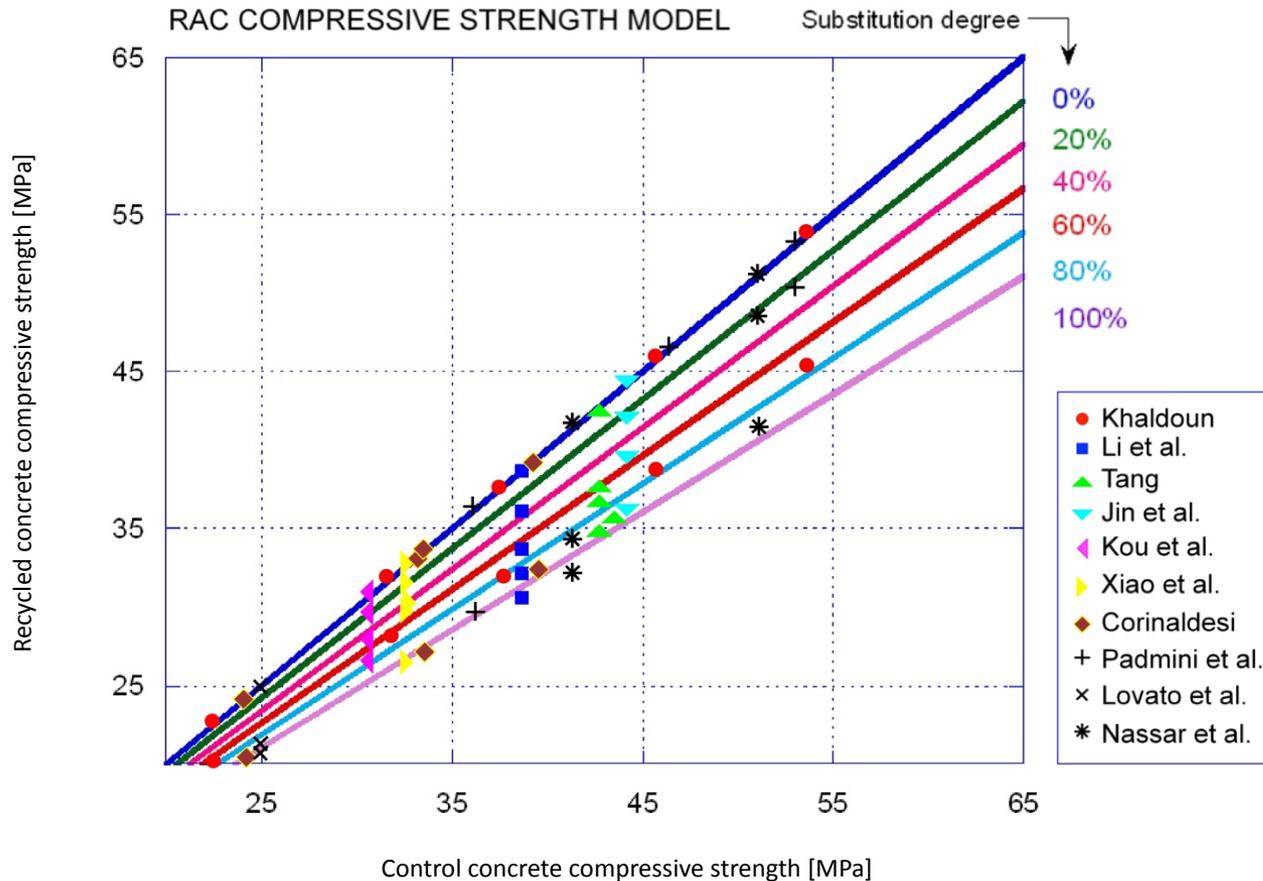
Puede relacionarse la pendiente de ajuste con el grado de incorporación:

MODELO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

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

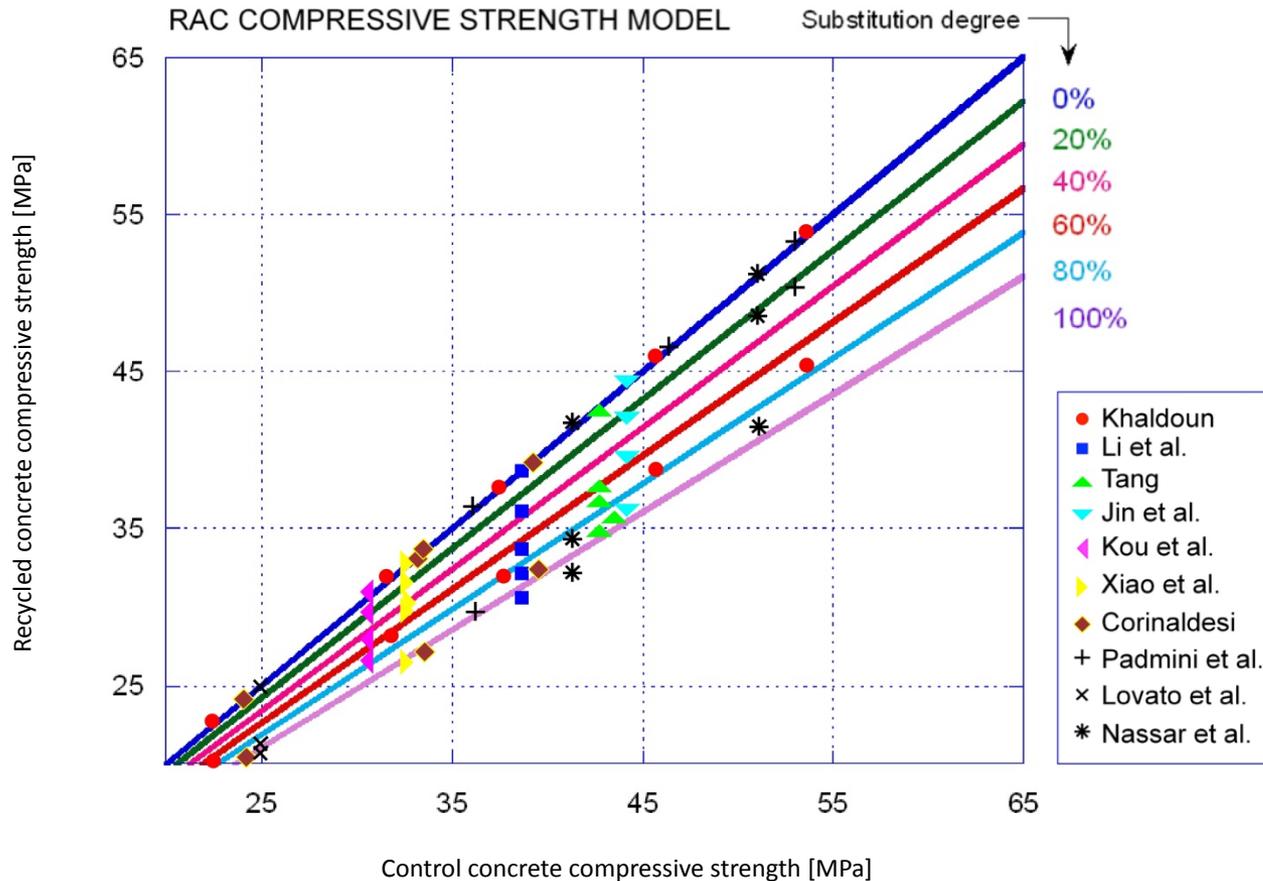
Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión



Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión



Los valores encontrados en la bibliografía se ajustan al modelo.

Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

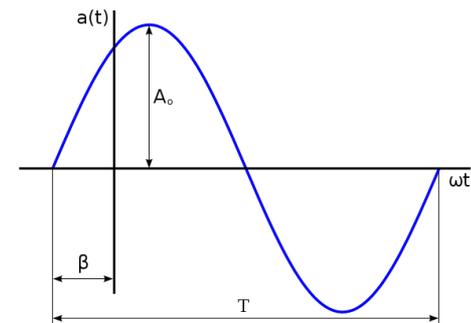
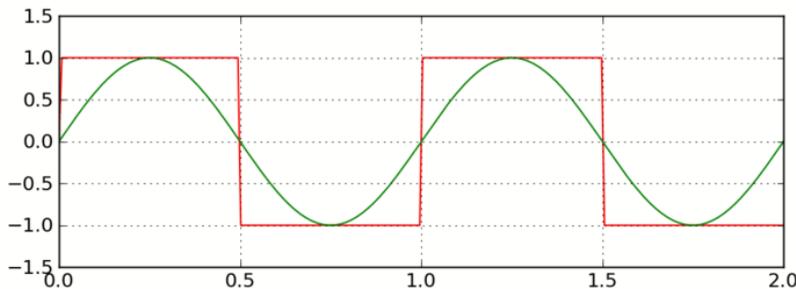
Influencia del grado de sustitución sobre la resistencia a compresión

El límite a fatiga de cualquier material se define como el esfuerzo umbral por debajo del cual no tiene lugar ningún tipo de fallo debido a la acumulación de daños originados por un número de ciclos lo suficientemente grande como para poder considerar “vida infinita”.

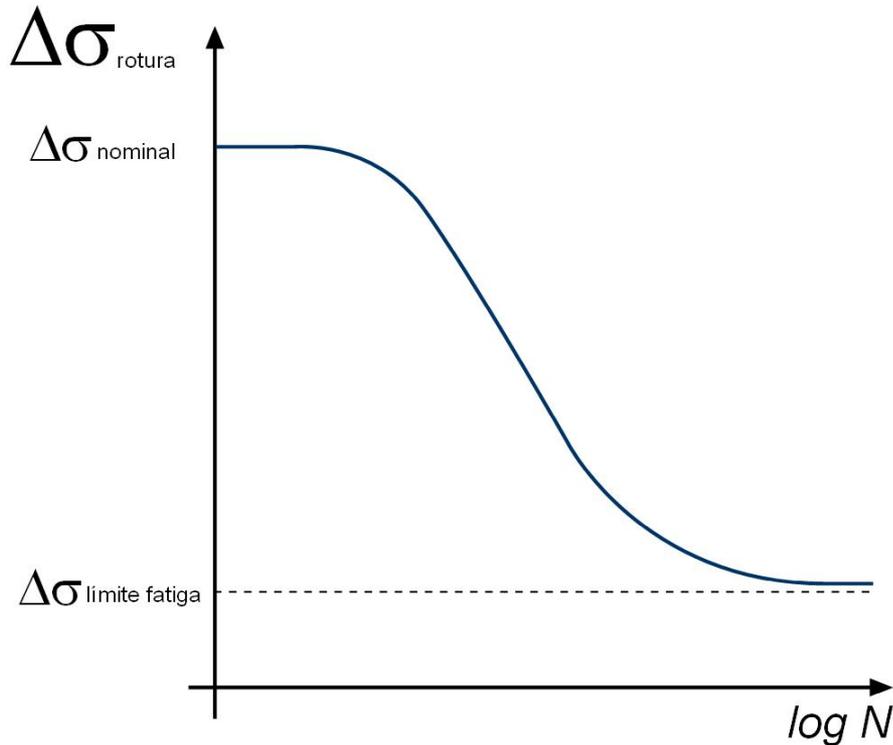
Se recomienda llevar a cabo todos los ensayos de fatiga sobre hormigón en *control de carga*.

σ_i y σ_j son límite inferior y límite superior del intervalo de carga para el cual se somete el material a fatiga.

Tipo de onda: sinusoidal, cuadrada, trapezoidal, triangular, etc.



Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado



Intervalo de carga frente al número de ciclos –WÖHLER–

Para un número pequeño de ciclos, intervalo de resistencia nominal.

Al aumentar el número de ciclos el intervalo de carga se reduce.

Se alcanza el límite a fatiga cuando el intervalo de cargas es lo suficientemente pequeño como para que el material posea, bajo estas condiciones, vida infinita.

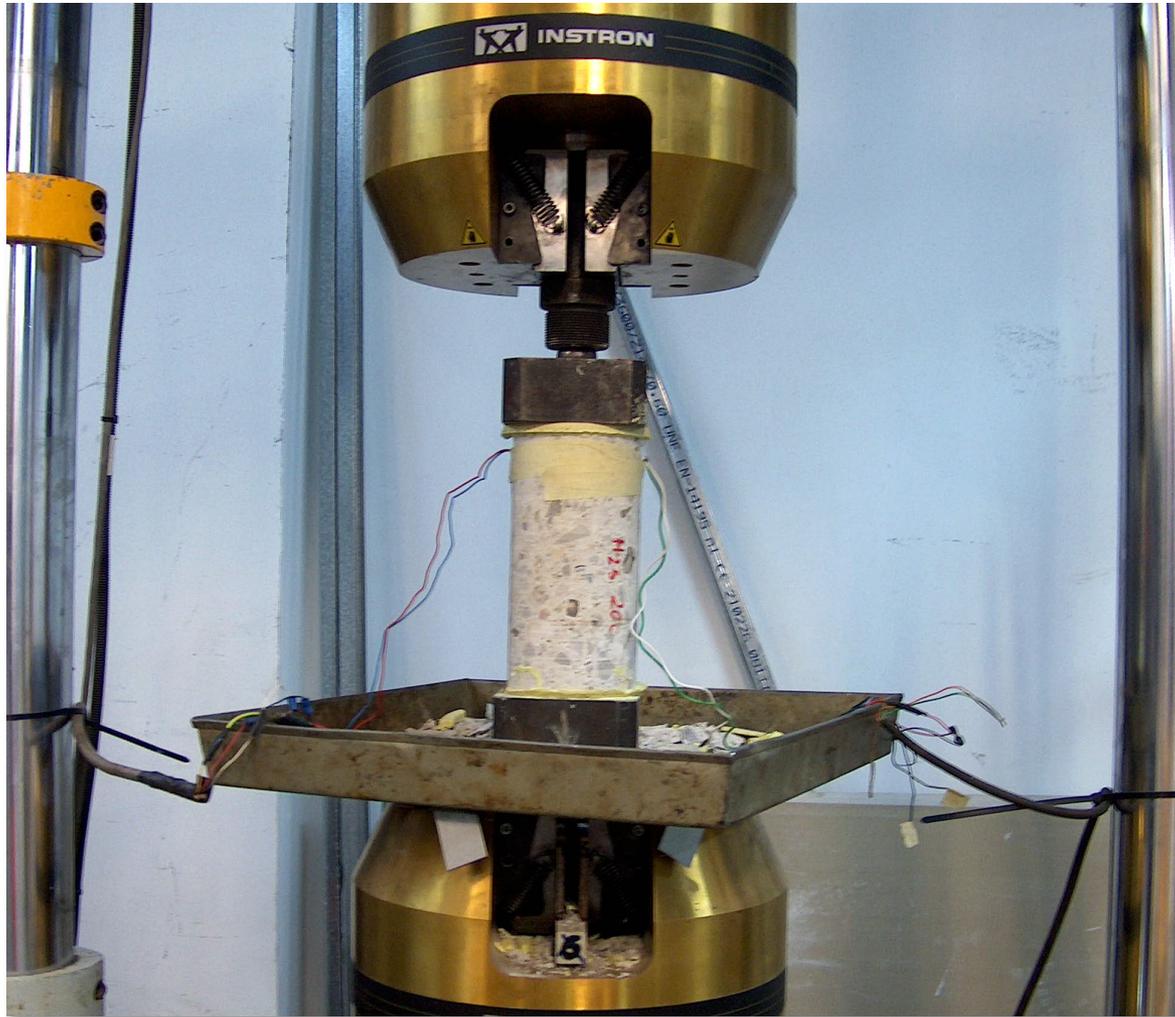
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

En materiales rígidos, como es el caso del hormigón, se puede suponer que el límite de fatiga se encuentra en el escalón de rotura del método Locati, ya que la acumulación de ciclos por debajo del límite a fatiga no deterioran el material ni reducen las prestaciones de éste.

La deformación que se produce es mínima y el calor acumulado durante la fatiga se transmite al medio más rápidamente de lo que se acumula.





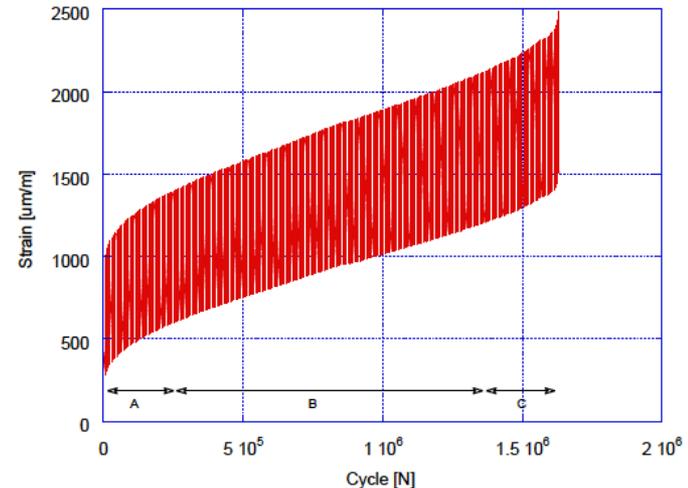




Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

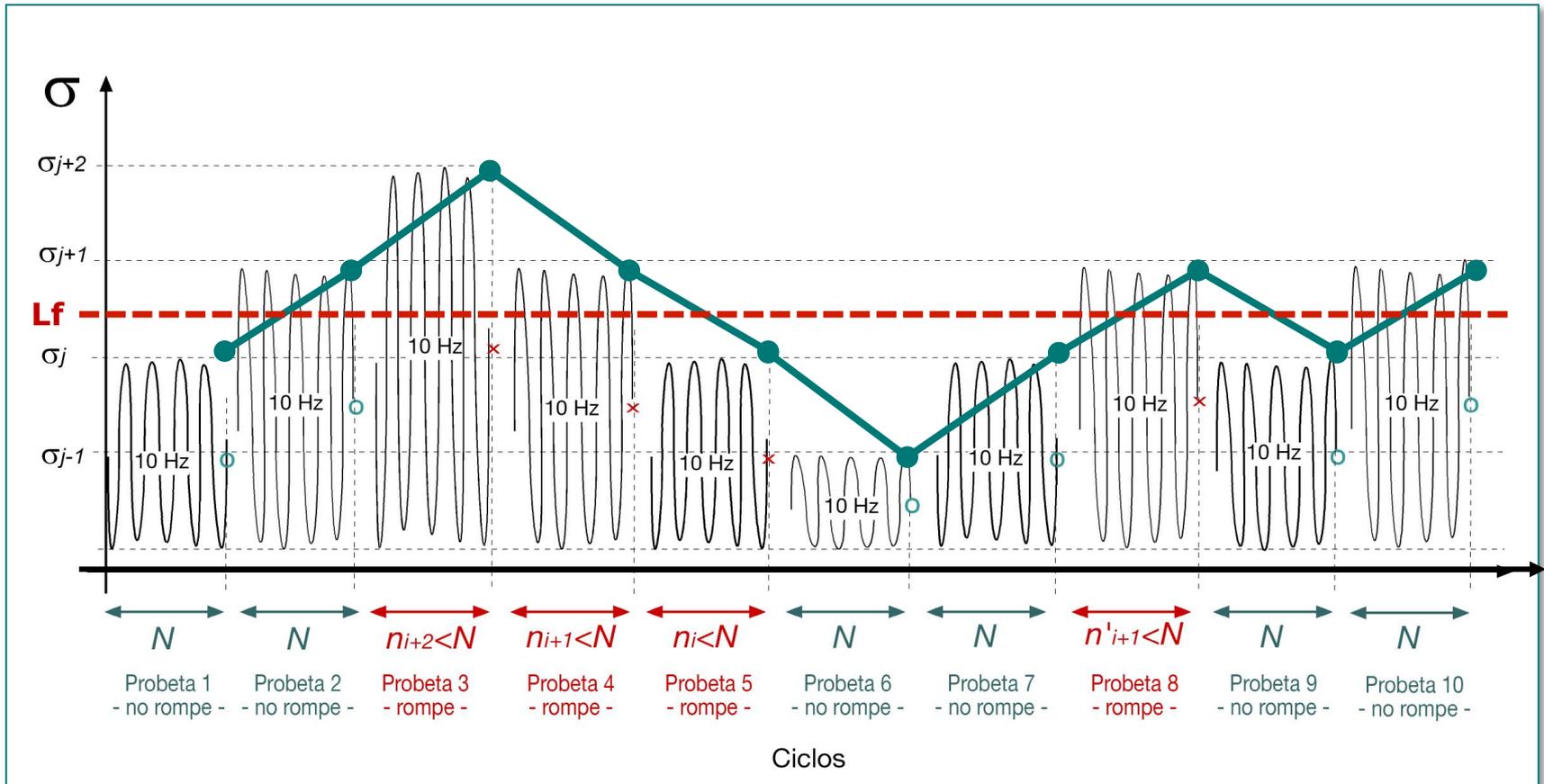
Método Staircase

- 10 probetas por dosificación.
- Niveles tensionales constantes por ensayo.
- Vida infinita: $N = 2 \cdot 10^6$ ciclos.
- Ensayo hasta rotura (n) o hasta N .
- Tensión mínima igual para todos los ensayos, 5 MPa.
- Tensión máxima del primer ensayo aprox. 50% R_c .
- Tensión máxima del segundo ensayo dependiente del primero.



Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

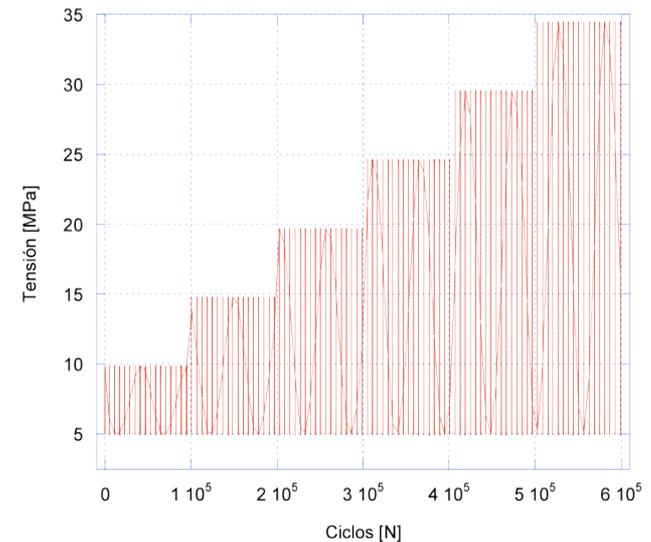
Método Staircase: Ejemplo



Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Única probeta por amasada.
- Nivel tensional mínimo constante.
- Ensayo hasta rotura.
- Nivel tensional máximo variable.
- Permite determinar de forma aproximada un intervalo de tensiones donde se sitúa el límite a fatiga.
- Se parte de la aplicación de trenes de ondas de carga con una amplitud constante durante un número determinado de ciclos: 105.
- Se incrementa el límite superior de carga en una cantidad preestablecida y conservando el resto de parámetros.



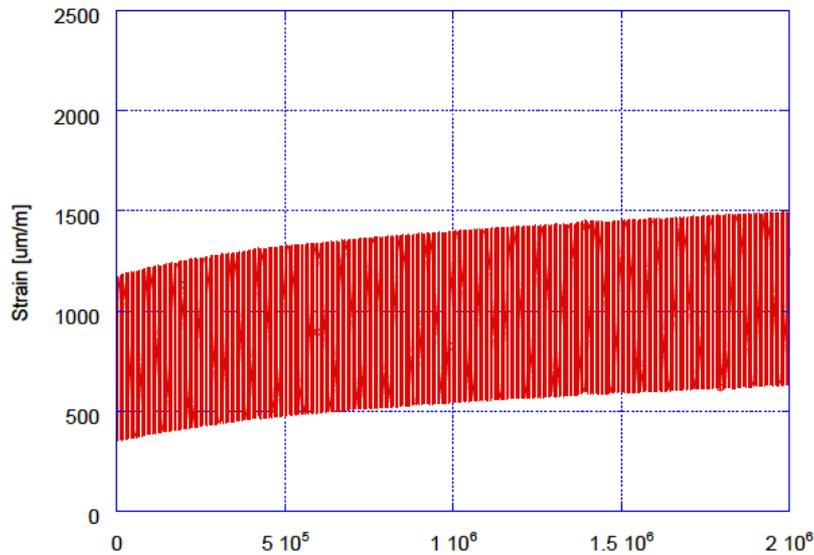


Fuente: www.ladicim.unican.es.

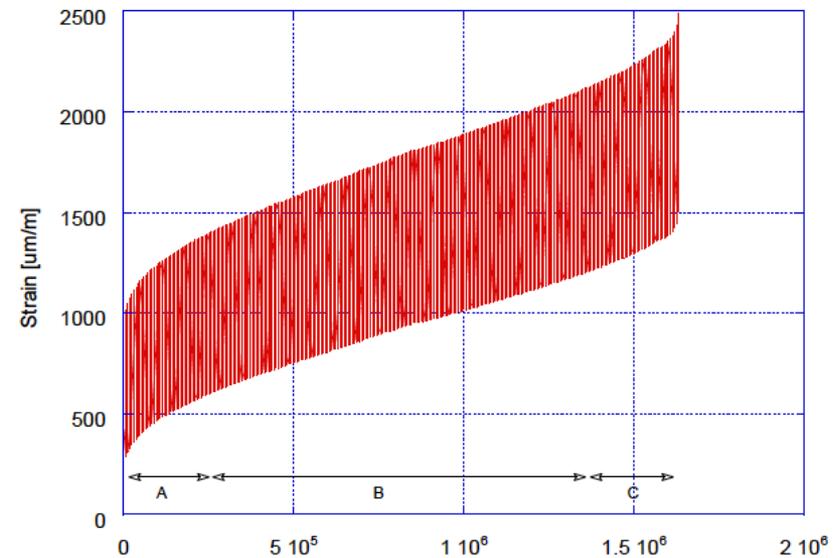
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas.



Strain versus cycles of a concrete specimen that exceeds $2 \cdot 10^6$ cycles.

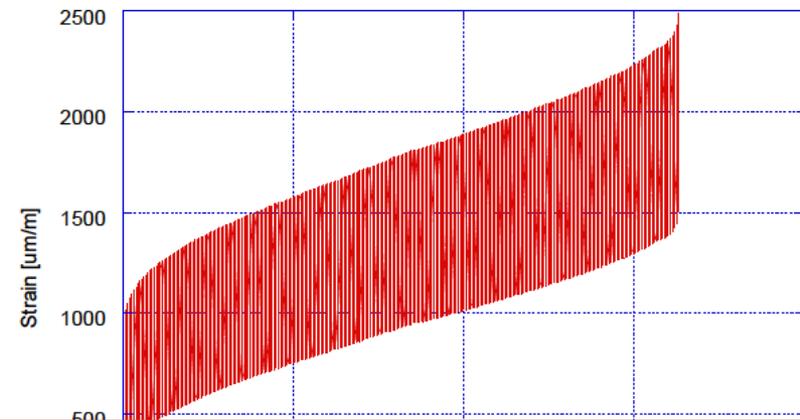
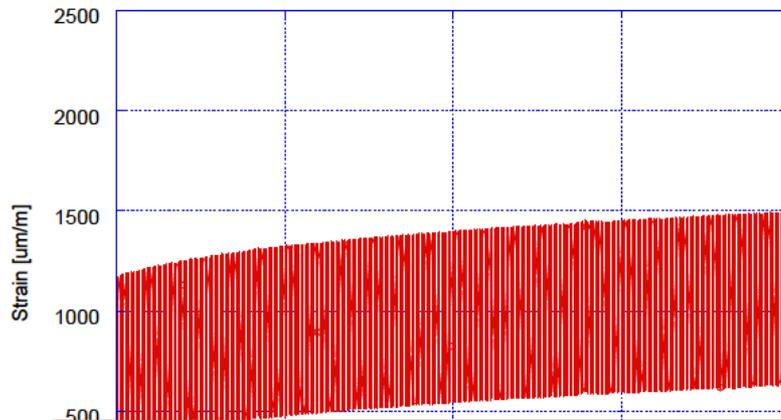


Strain versus cycles of a concrete specimen with failure before the $2 \cdot 10^6$ cycles.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas.



Se observan 2 tipos distintos de evolución de la deformación según si la probeta es capaz de superar o no los 2 millones de ciclos.

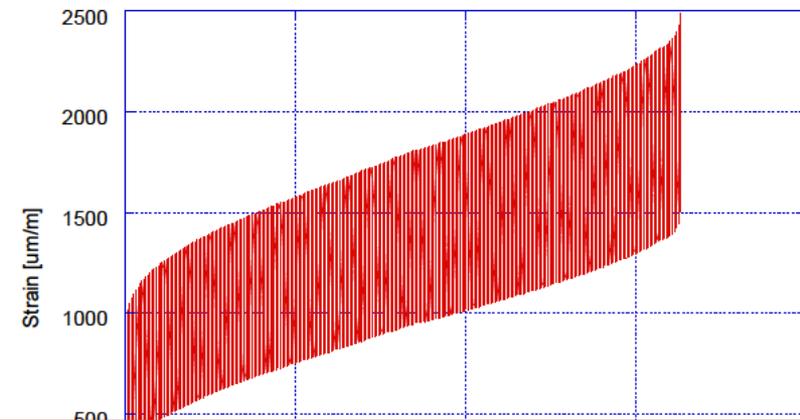
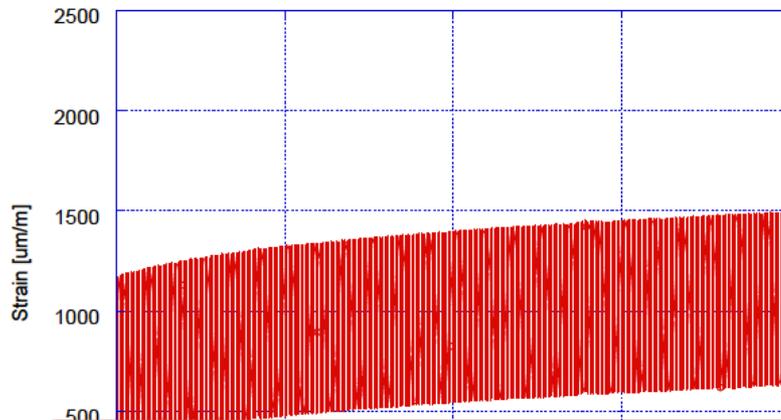
Strain versus cycles of a concrete specimen that exceeds $2 \cdot 10^6$ cycles.

Strain versus cycles of a concrete specimen with failure before the $2 \cdot 10^6$ cycles.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas.



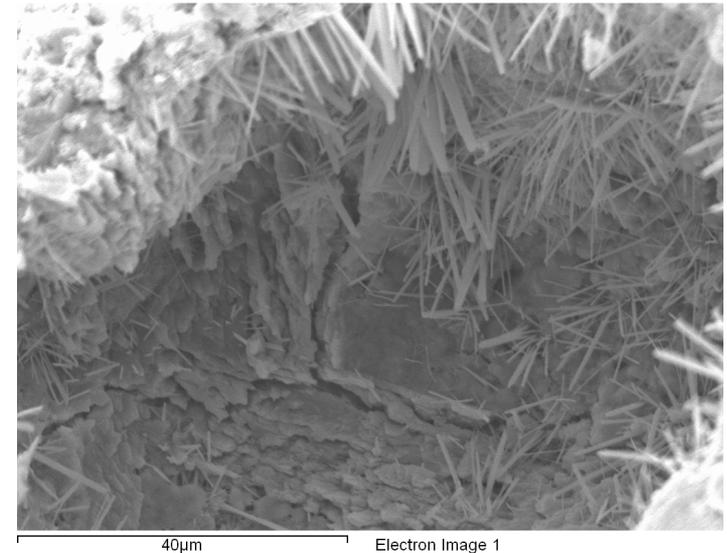
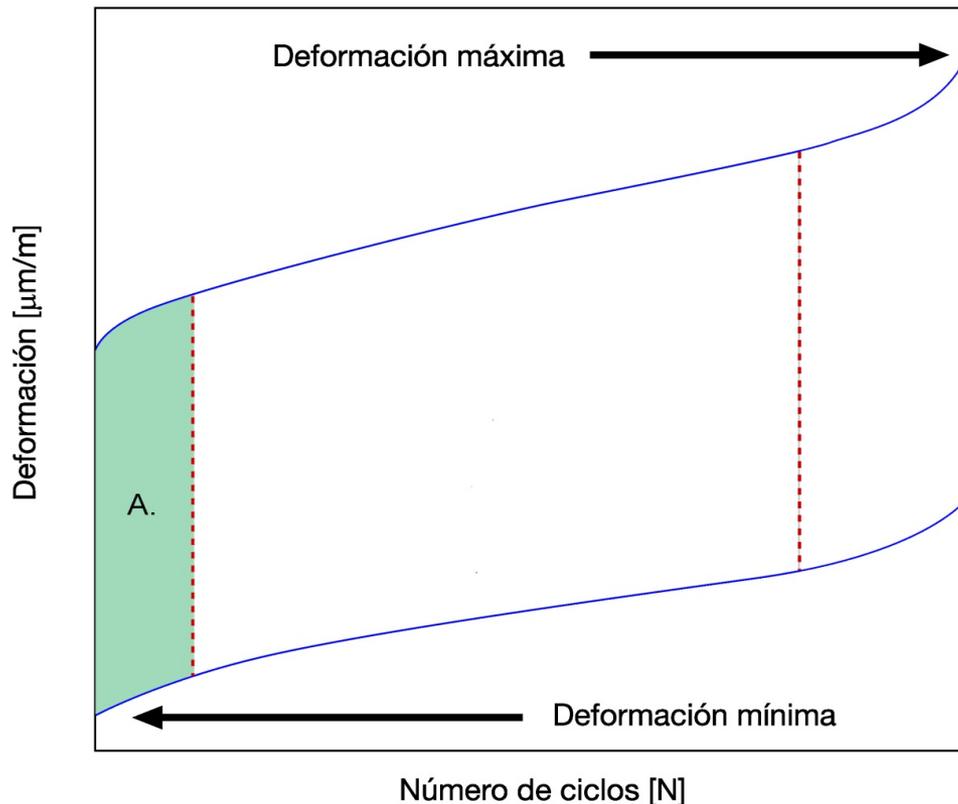
Se observan 2 tipos distintos de evolución de la deformación según si la probeta es capaz de superar o no los 2 millones de ciclos.

El aumento de la deformación máxima es mayor que el de la deformación mínima: disminución de la rigidez.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas: **etapa A.**

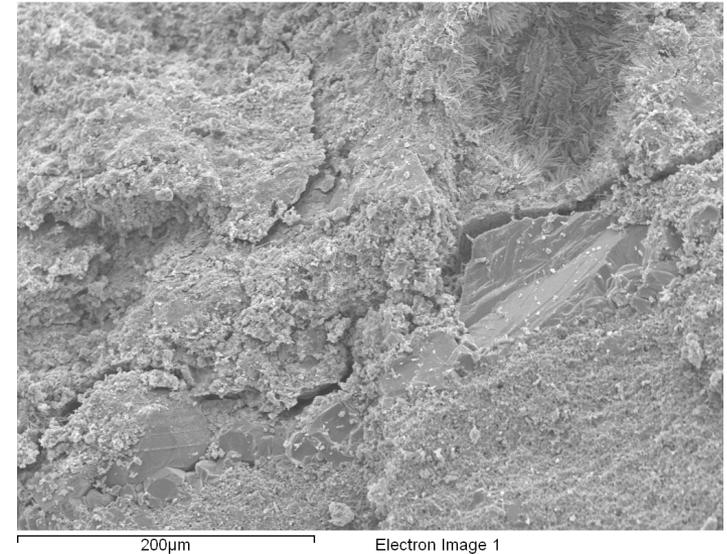
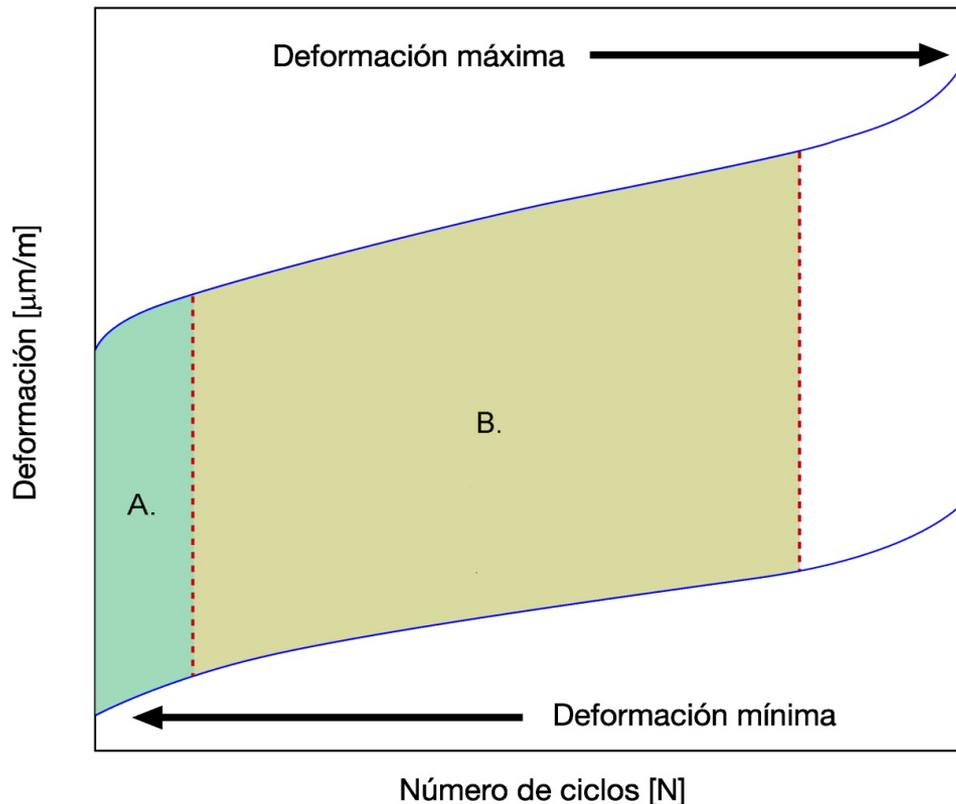


La primera de las etapas, A, corresponde a la formación inicial de las fisuras. Caracterizada por un aumento logarítmico atenuado de la deformación máxima y mínima, siendo ligeramente mayor la velocidad de aumento de la máxima.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas: **etapa B.**

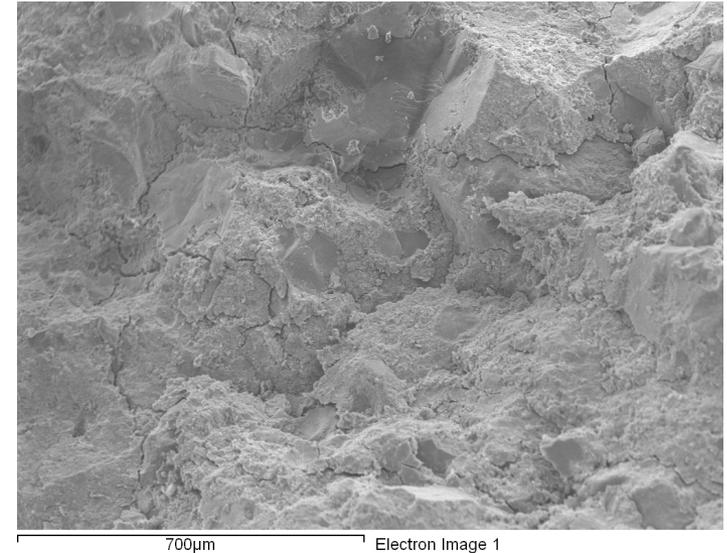
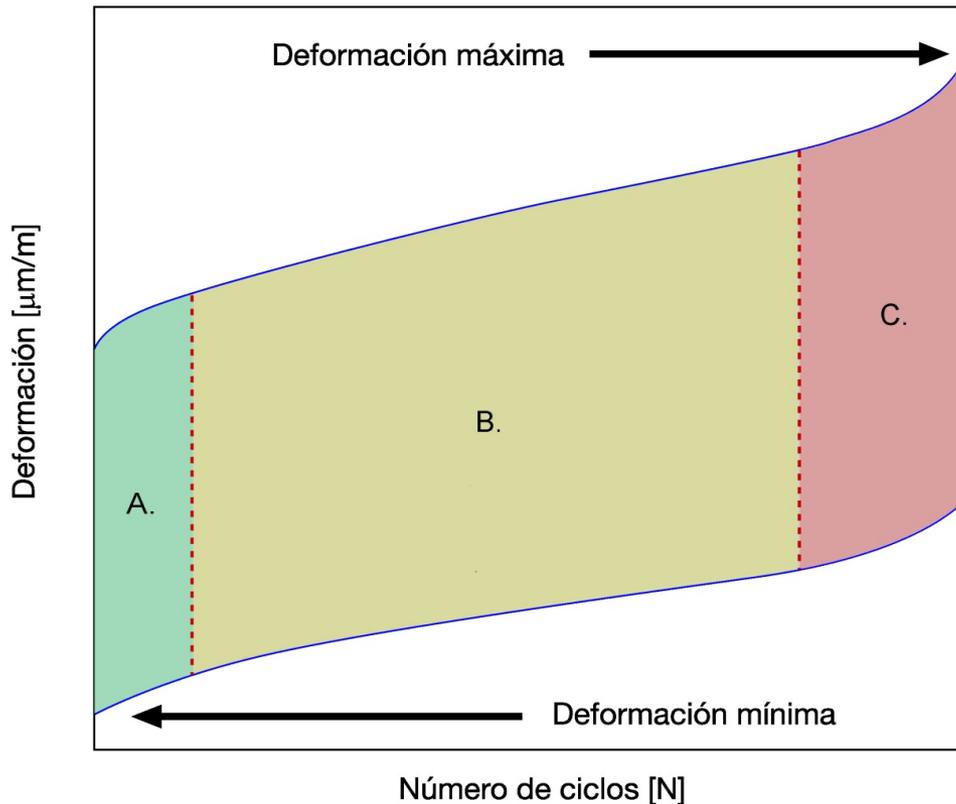


El segundo tramo, B, se asocia con la estabilización de las fisuras formadas en la primera de las etapas manifestado en un crecimiento de las mismas. Se observa un aumento de deformación prácticamente lineal hasta la tercera de las etapas.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Comportamiento frente a cargas cíclicas: **etapa C.**

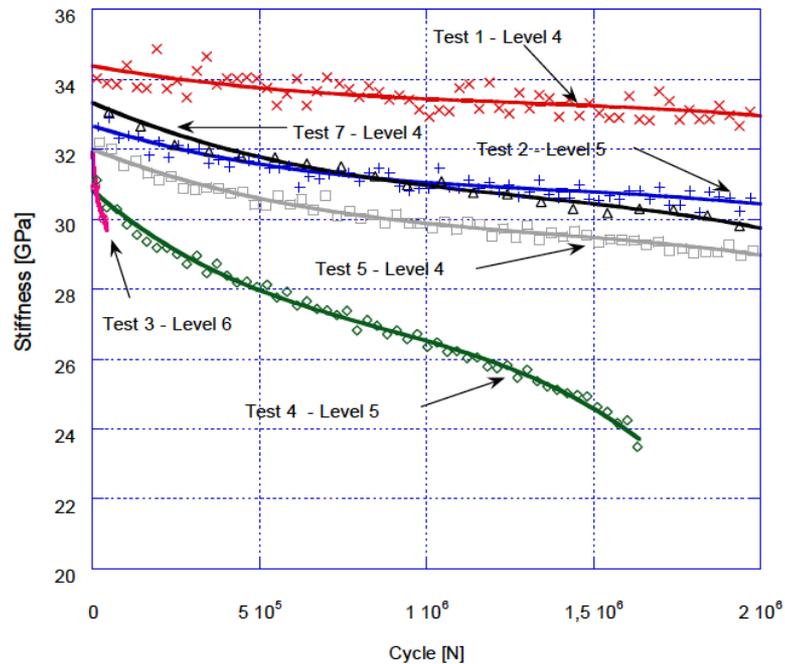


En la etapa C, de interconexión de fisuras y colapso, el aumento de la deformación, a diferencia de las fases anteriores A y B, es de tipo exponencial: la pérdida acelerada de rigidez va acompañada de una mayor separación entre las envolventes

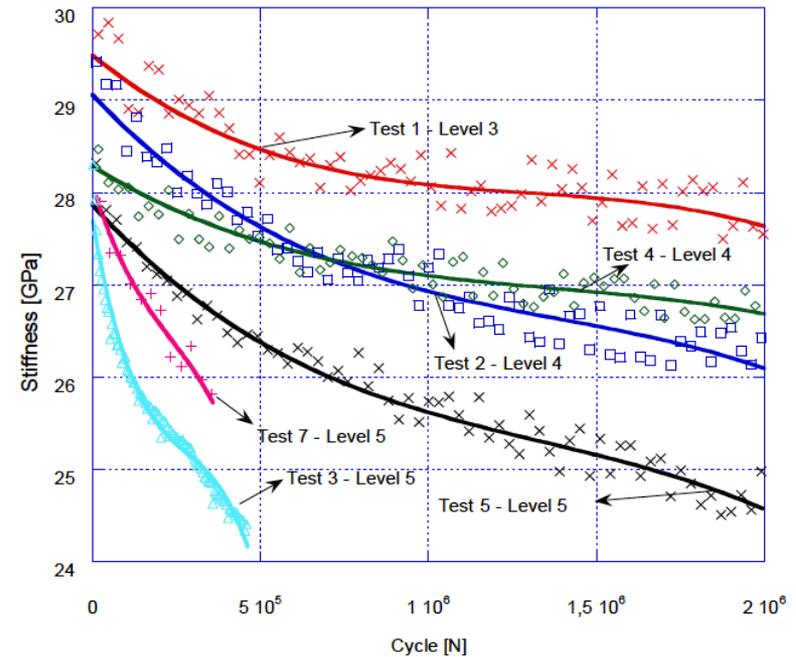
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Evolución de la rigidez.



Stiffness loss versus number of cycles of the H-0,65AS-0% concrete.

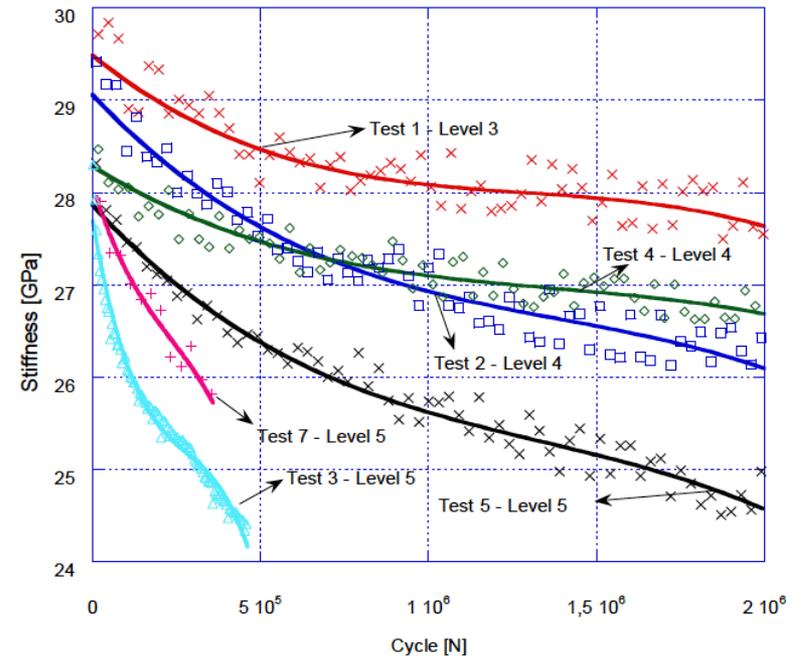
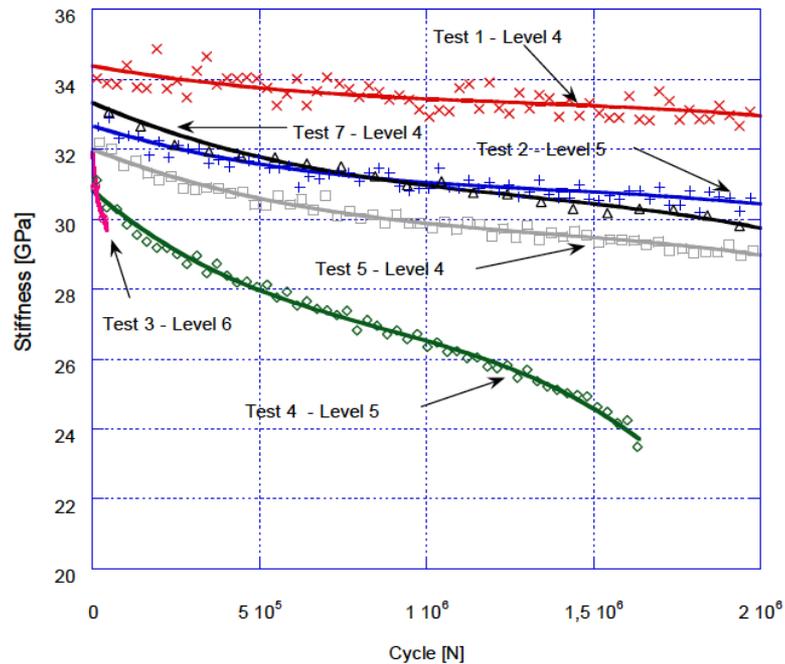


Stiffness loss versus number of cycles of the H-0,45ARS-100% concrete.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

- Evolución de la rigidez.

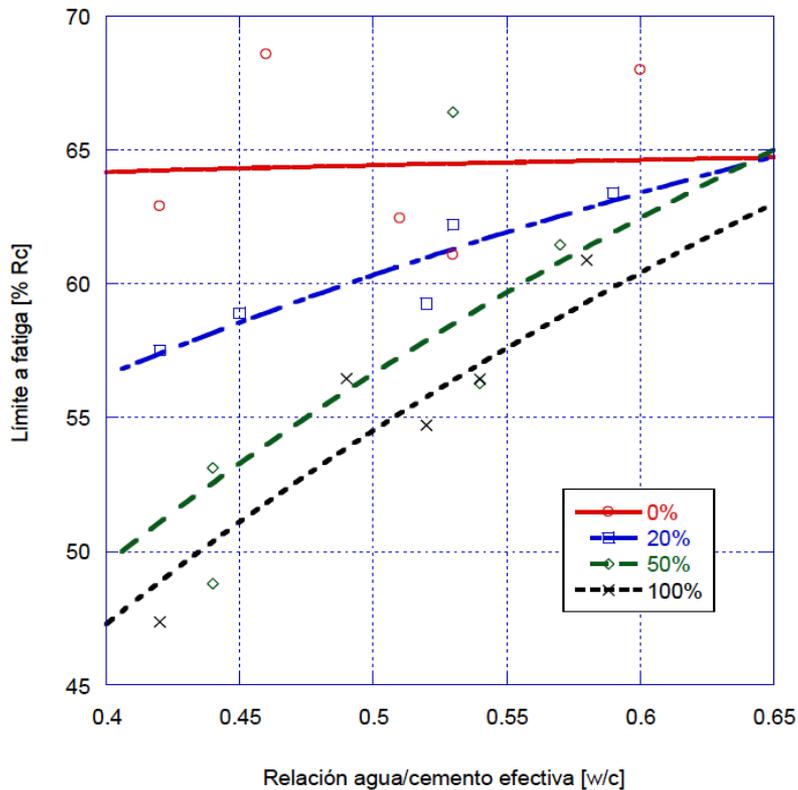


Se observa una pérdida de rigidez y se distinguen 3 etapas (A, B y C) cuando tiene lugar la rotura.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

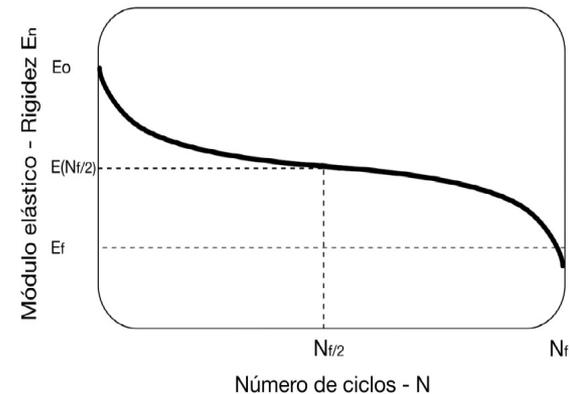
Método Staircase

- Límite a fatiga.



El límite a fatiga respecto de la resistencia a compresión se sitúa:

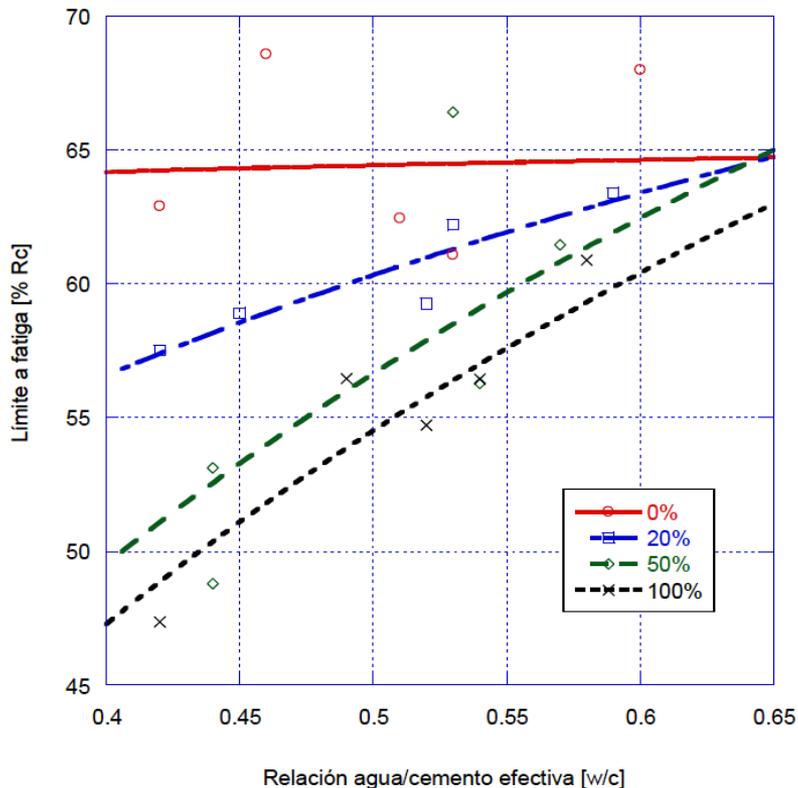
- En torno al 65% para el H-0%
- Entre 65% y 55% para el H-20%
- Entre 65% y 50% para el H-50%
- Entre 65% y 45% para el H-100%



Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Staircase

• Límite a fatiga.



El límite a fatiga respecto de la resistencia a compresión se sitúa:

- En torno al 65% para el H-0%
- Entre 65% y 55% para el H-20%
- Entre 65% y 50% para el H-50%
- Entre 65% y 45% para el H-100%

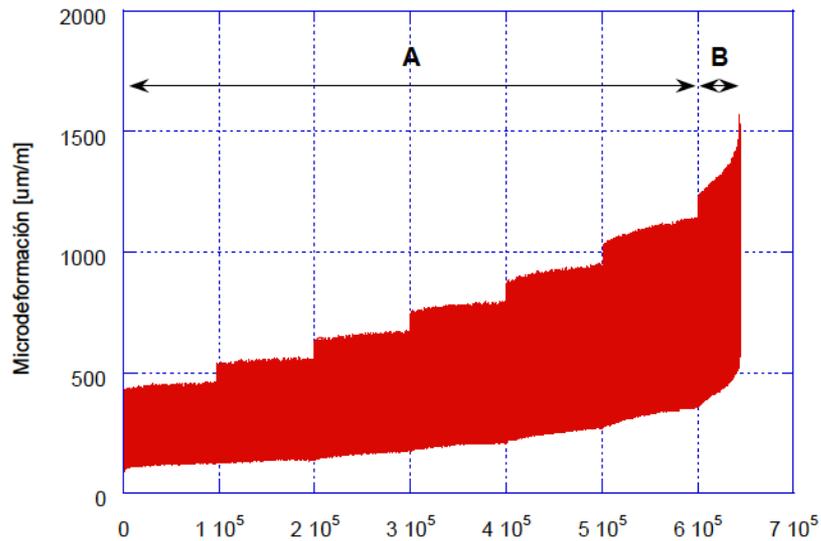
Para relaciones agua/cemento bajas, inferiores a 0,5, se observa una fuerte disminución del límite de fatiga, mayor cuanto menor es el porcentaje de árido reciclado utilizado.

z
Número de ciclos - N
N_{i/2} N_r

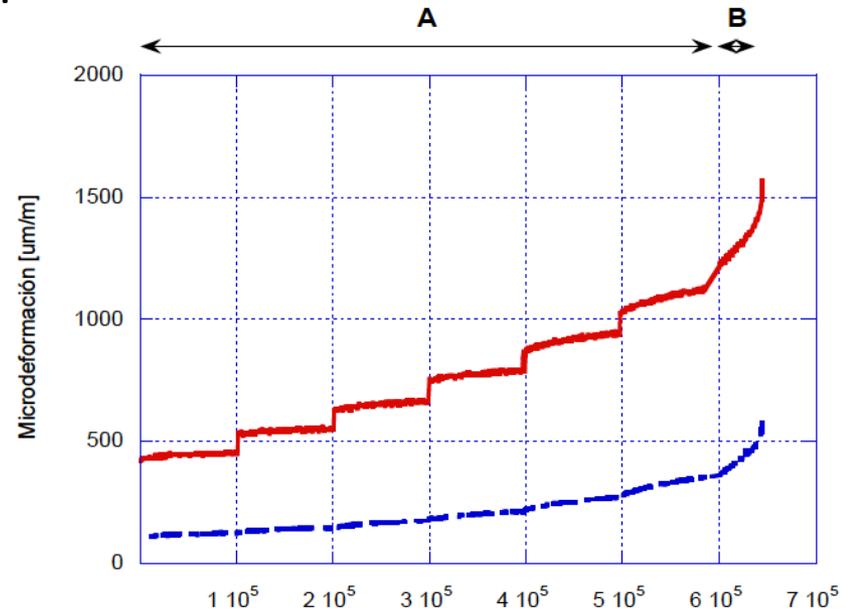
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Comportamiento frente a cargas cíclicas.



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



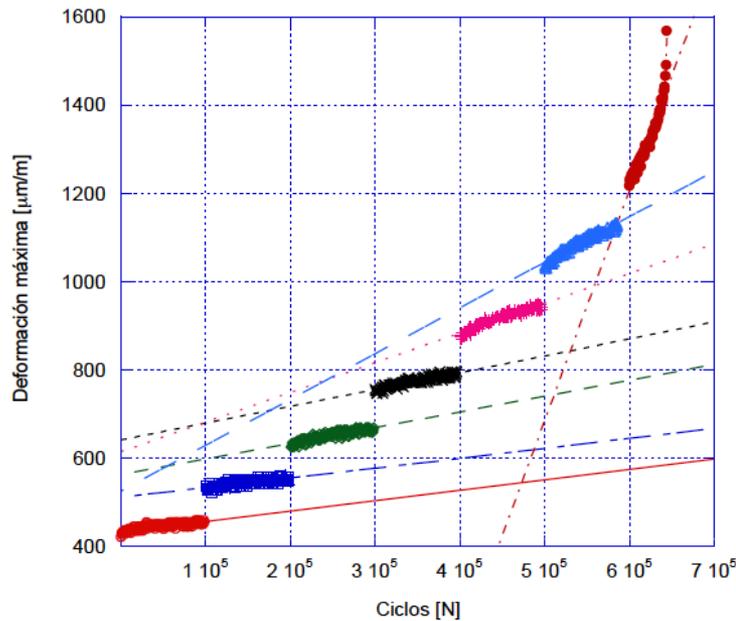
Deformaciones máxima y mínima de todos los escalones de un ensayo LOCATI.

Se observa un aumento de la deformación y se distinguen 2 etapas: A (todos los escalones salvo el último) y B (último escalón).

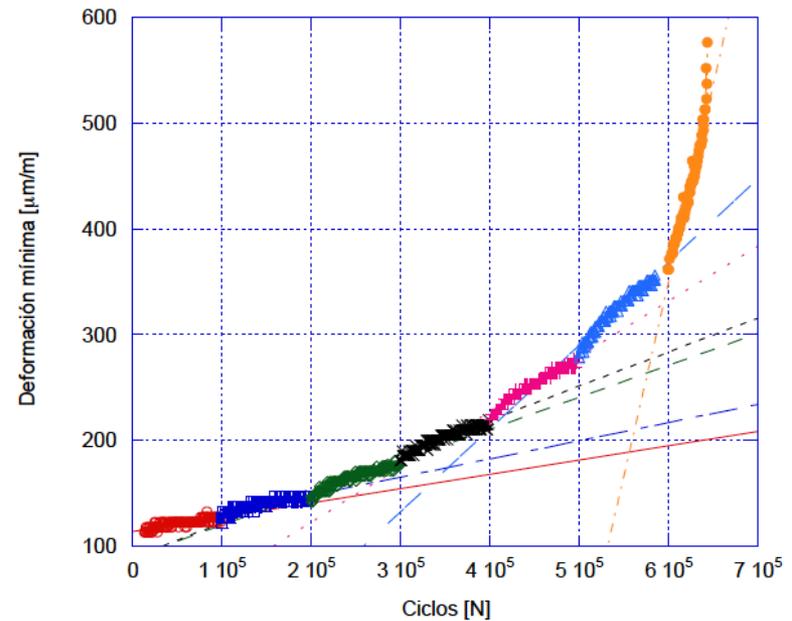
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.



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

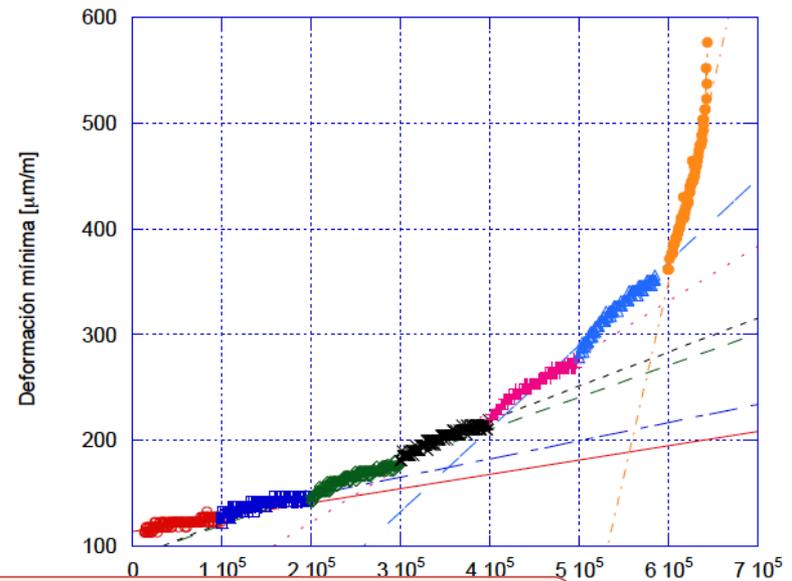
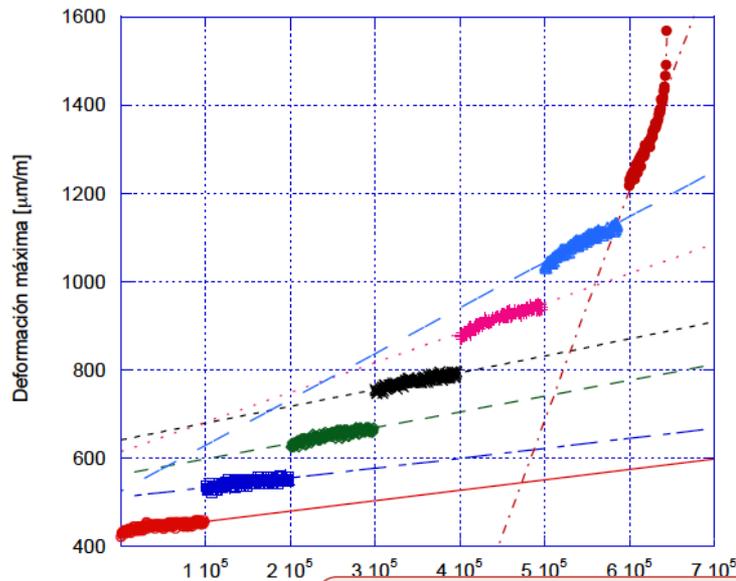


Tramos de deformación mínima frente al número de ciclos y su ajuste lineal.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.



La velocidad de deformación máxima es mayor que la mínima.

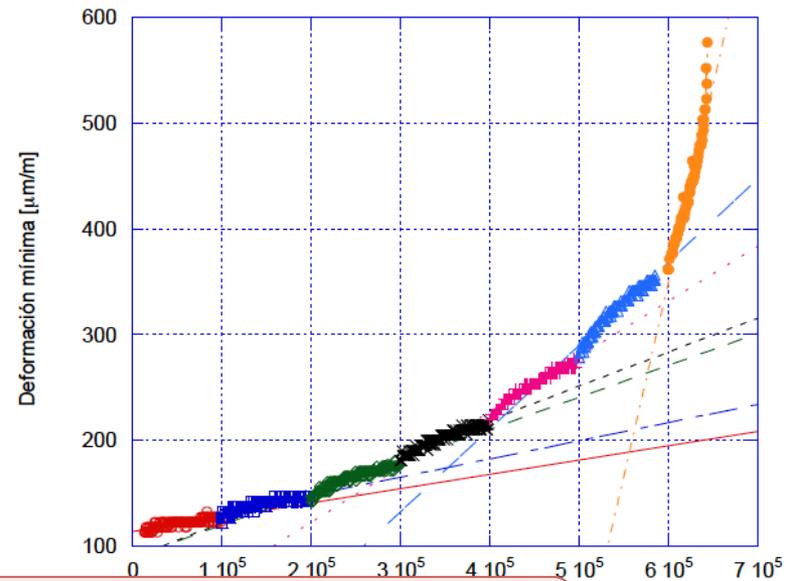
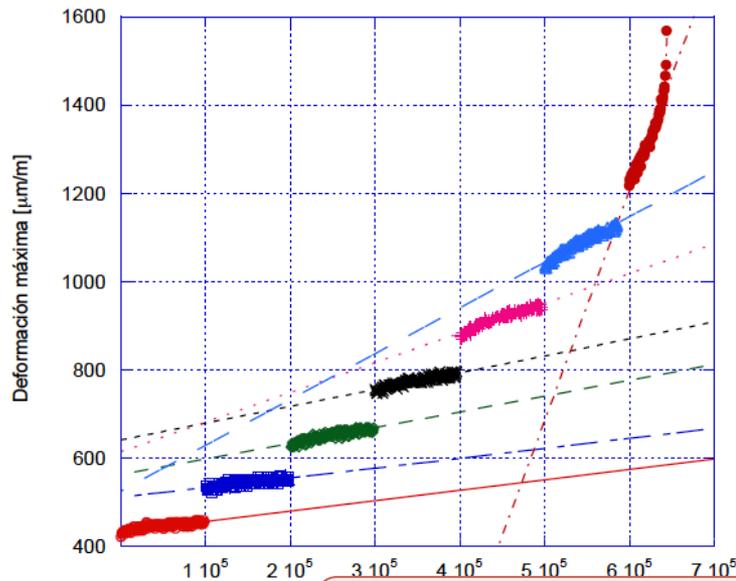
Tramos de deformación máx

de ciclos y su ajuste lineal.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.



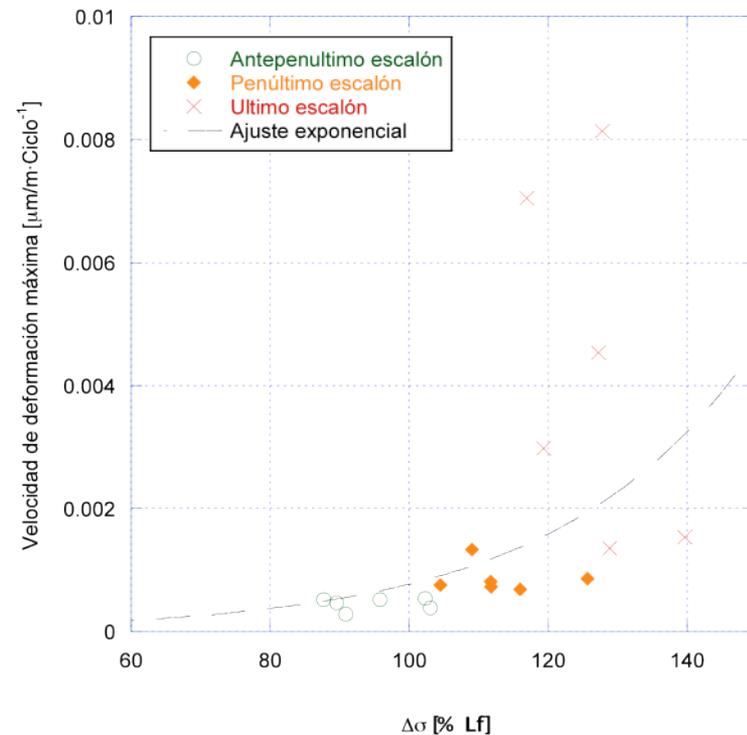
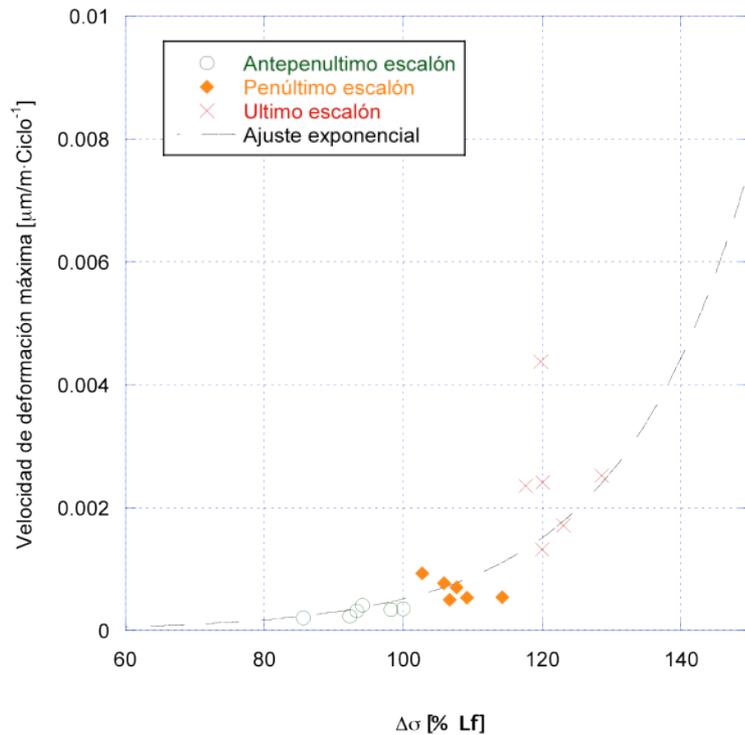
La velocidad de deformación máxima es mayor que la mínima.

La velocidad de deformación aumenta hasta el colapso del material.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.

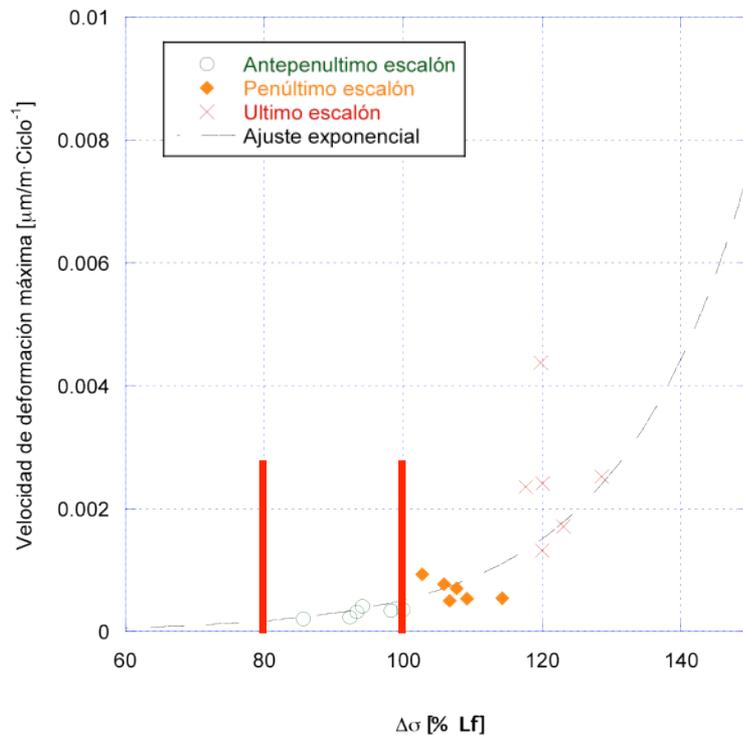


Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 0% y 20% de incorporación.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.

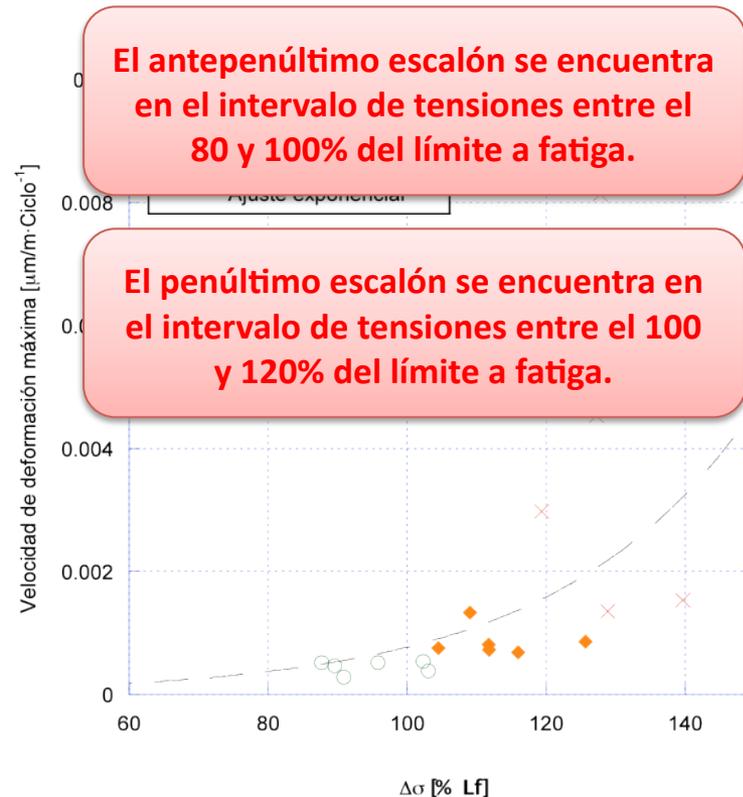
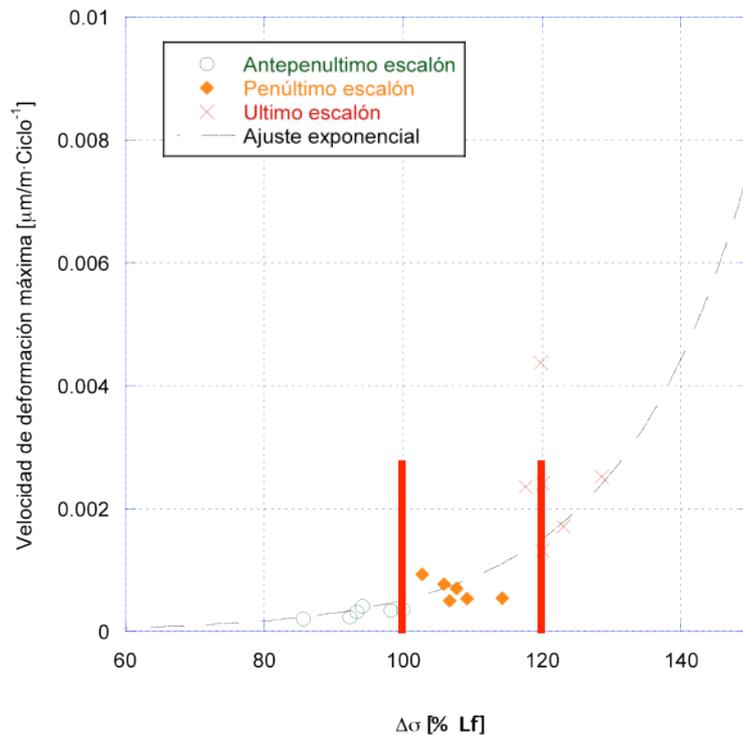


Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 0% y 20% de incorporación.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.

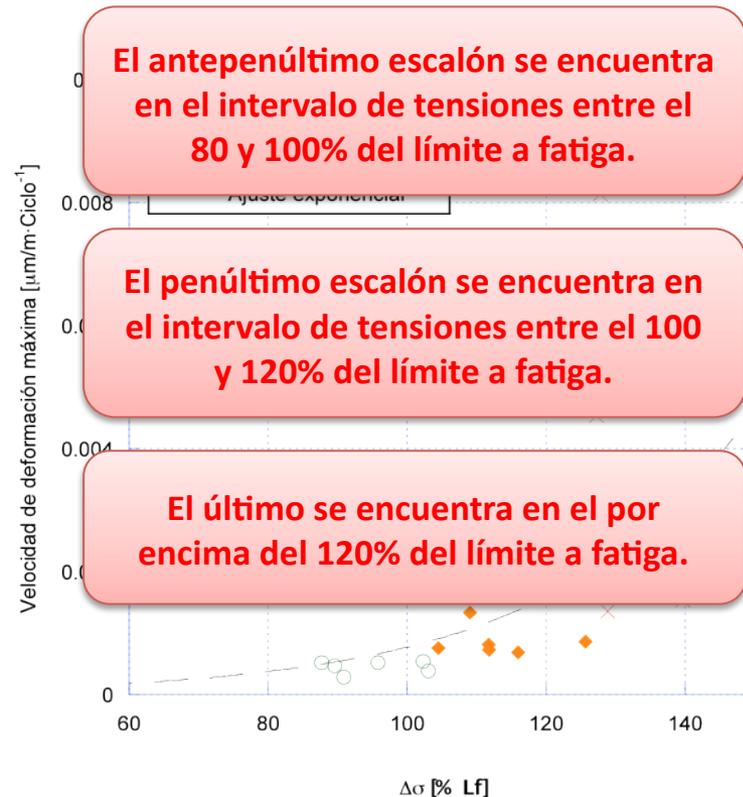
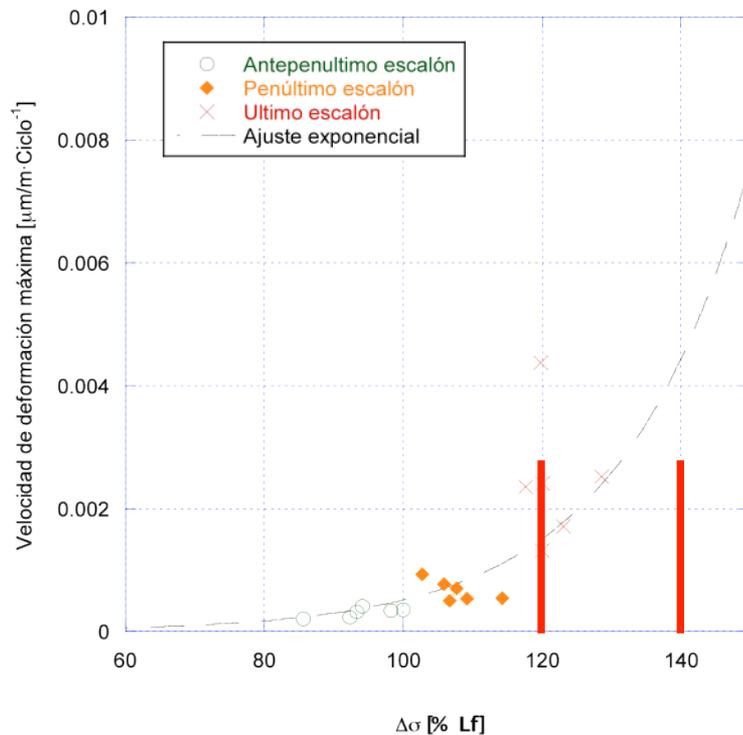


Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 0% y 20% de incorporación.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

- Deformación por fatiga Locati.

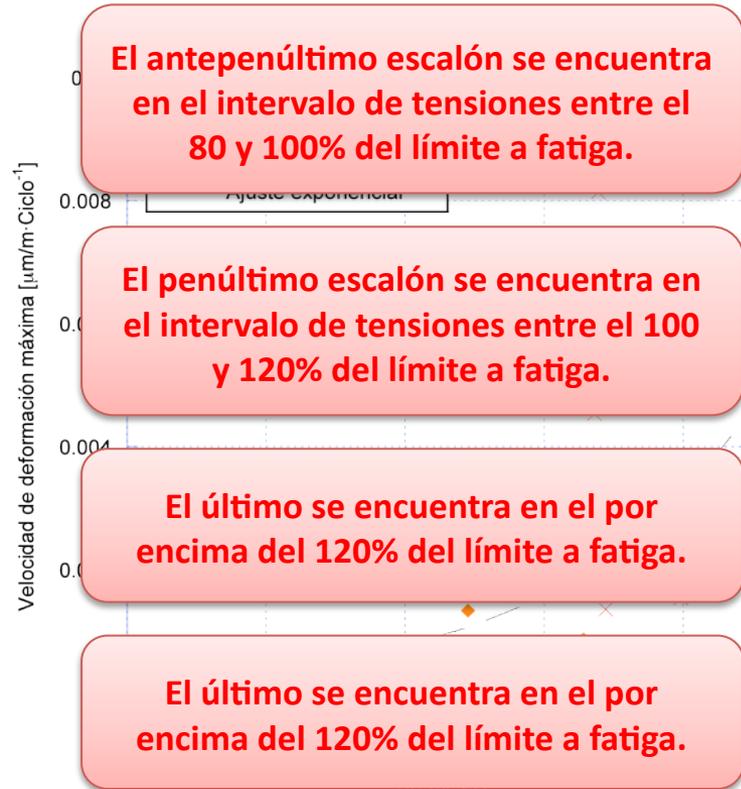
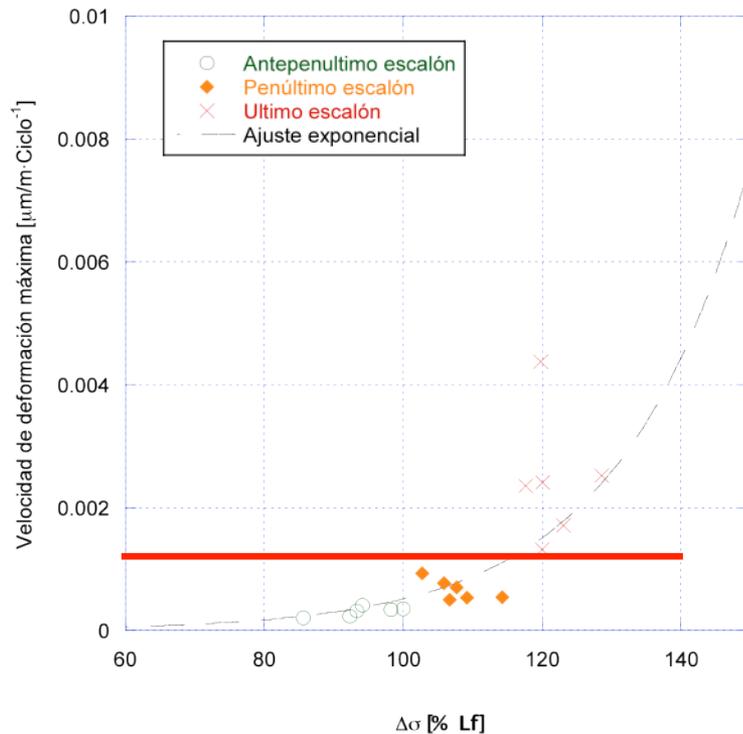


Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 0% y 20% de incorporación.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Método Locati

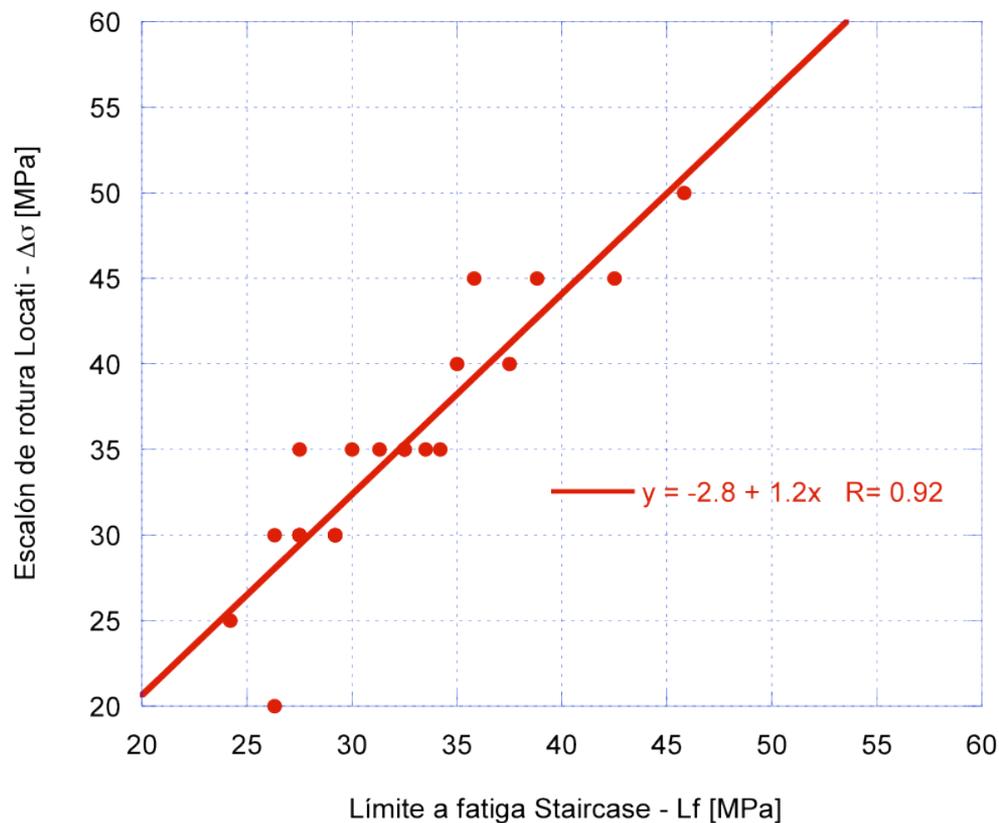
- Deformación por fatiga Locati.



Velocidad de deformación frente a la tensión del escalón, en referencia al límite a fatiga, de los hormigones con 0% y 20% de incorporación.

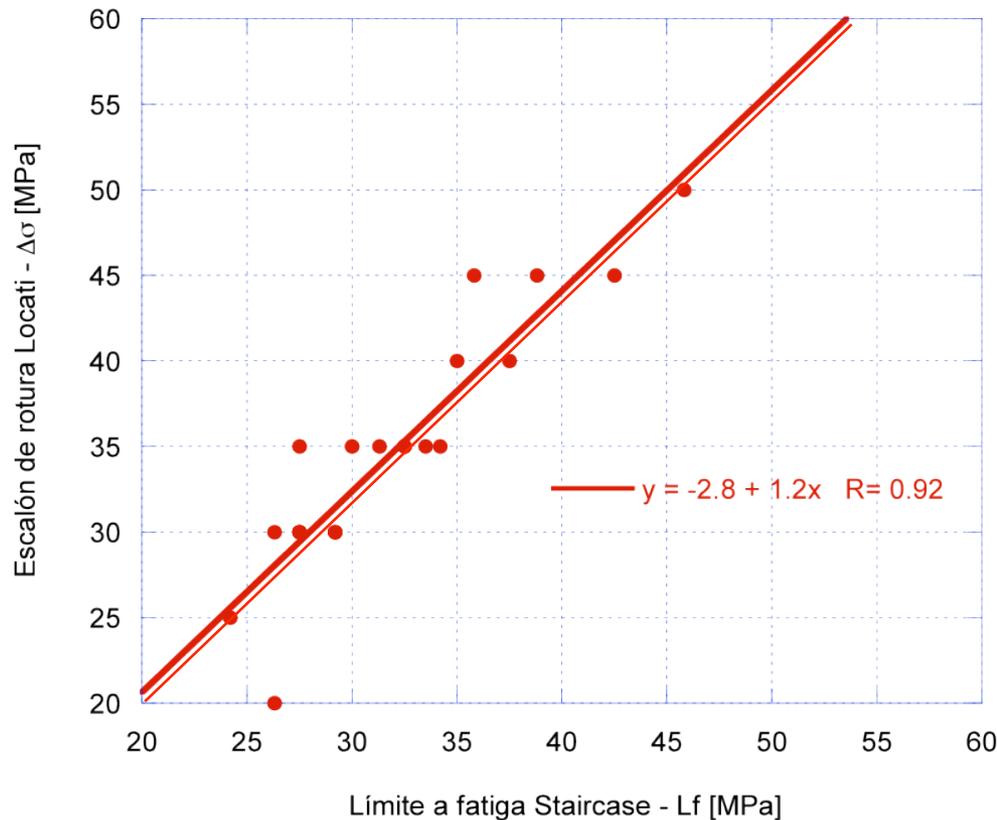
Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Relación entre los métodos Locati y Staircase



Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

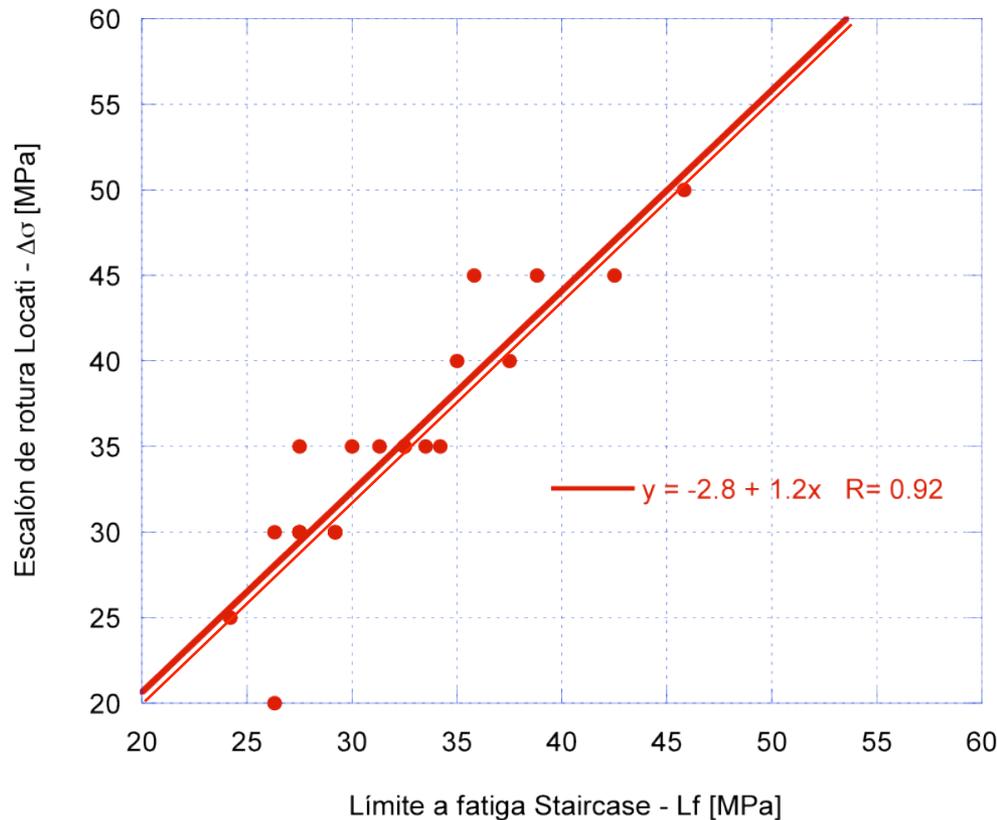
Relación entre los métodos Locati y Staircase



Se observa una relación lineal entre la tensión del escalón de rotura LOCATI y el límite a fatiga STAIRCASE.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Relación entre los métodos Locati y Staircase

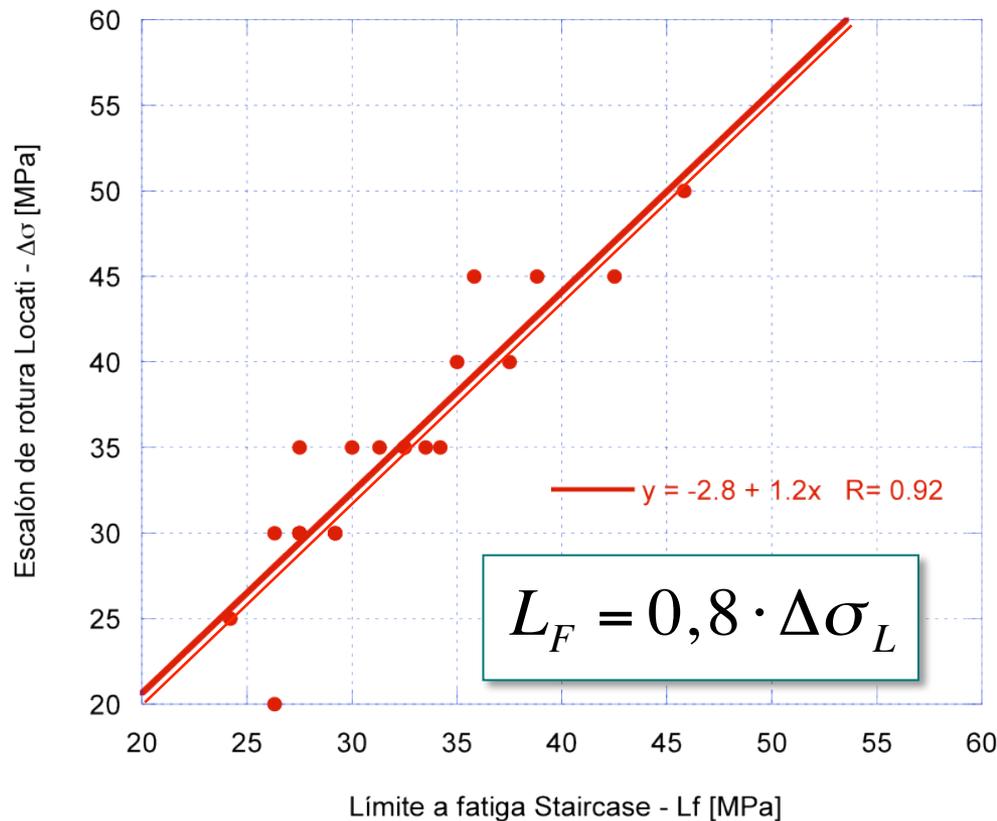


Se observa una relación lineal entre la tensión del escalón de rotura LOCATI y el límite a fatiga STAIRCASE.

El escalón de rotura del ensayo LOCATI se sitúa en torno al 80% del límite a fatiga STAIRCASE.

Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Relación entre los métodos Locati y Staircase



Se observa una relación lineal entre la tensión del escalón de rotura LOCATI y el límite a fatiga STAIRCASE.

El escalón de rotura del ensayo LOCATI se sitúa en torno al 80% del límite a fatiga STAIRCASE.

El límite a fatiga puede ser aproximado mediante la técnica LOCATI.

Consideraciones finales

El árido reciclado de hormigón es viable para la fabricación de hormigón.

Hormigones de alta calidad amortiguan el efecto negativo que el árido reciclado ejerce sobre la durabilidad del hormigón.

El árido reciclado afecta en mayor cuantía, disminuyendo la resistencia, sobre las propiedades mecánicas cuanto más resistente sea el hormigón de referencia.