

Influencia de la frecuencia en la vida a fatiga del hormigón reciclado autocompactante

Frequency influence on fatigue life of self-compacting recycled concrete

Jose A. Sainz-Aja ^{1*, a}, Isidro Carrascal ^b, Juan A. Polanco ^c, Carlos Thomas ^d, Jose A.

Casado ^e y Soraya Diego ^f

LADICIM (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria.
E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, España.

RESUMEN

En esta investigación se realizaron ensayos de fatiga en compresión en alta frecuencia (90 ± 3 Hz) y en baja frecuencia (10Hz) sobre 3 tipos de hormigón reciclado. La comparativa entre los ensayos a alta y baja frecuencia reveló una clara reducción en la vida en fatiga a alta frecuencia. Podría esperarse un aumento en la vida en fatiga a alta frecuencia, ya que, la probeta este menos tiempo sometida a cargas y por lo tanto el daño debido a la fluencia debiera ser menor. Sin embargo, se detectó que las probetas ensayadas a alta frecuencia sufren incrementos de temperatura significativos, lo que acelera el daño por fluencia y, por lo tanto, una reducción significativa en su vida en fatiga.

ABSTRACT

In this research, high frequency (90 ± 3 Hz) and low frequency (10Hz) compressive fatigue tests were carried out on 3 recycled concrete. The comparison between high and low frequency tests revealed a clear reduction in fatigue life at high frequency. An increase in fatigue life at high frequency could be expected, as the specimen is loaded for less time and therefore the damage due to creep should be less. However, it was detected that specimens tested at high frequency suffer significant temperature increases, which accelerates creep damage and, therefore, a significant reduction in their fatigue life.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reciclado, alta frecuencia, fatiga, temperatura, Locati.

KEYWORDS: Recycled concrete, high frequency, fatigue, temperature, Locati.

1. Introducción

El uso de los áridos reciclados supone un beneficio a nivel ambiental [1,2]. Reciclar hoy en día es una necesidad debido a la velocidad a la que se generan residuos es tal que, los vertederos están próximos a saturarse [3]. De manera adicional, se ha demostrado la posibilidad de obtener hormigones reciclados (RAC) con buenas propiedades tanto mecánicas como de durabilidad [4–7].

En la actualidad, el comportamiento a fatiga del hormigón no ha sido ampliamente estudiado debido, en parte, a la dificultad, coste y tiempo que exige su determinación. Algunos elementos de hormigón sometidos a este tipo de cargas son, por ejemplo, la superestructura ferroviaria, traviesas o vía en placa, los puentes tanto de ferrocarril como de tráfico rodado [8], las estructuras offshore sometidas a las cargas

variables del viento y de las mareas [8,9] y/o los aerogeneradores [10]. Tal y como afirman Skarżyński et al., hoy en día, el conocimiento sobre el efecto de las cargas cíclicas sobre el hormigón es muy limitado [10]. En la bibliografía se constatan publicaciones de autores que han analizado la respuesta del hormigón tanto a fatiga en compresión [9–13] como a fatiga a flexión [9,14]. De manera general, se sabe que la fatiga hace que las microfisuras inherentes al hormigón crezcan a cargas menores que en el caso de los ensayos estáticos, lo que puede producir el fallo del mismo antes de lo esperado [15].

Para intentar reducir en mayor medida el tiempo de caracterización, se ha analizado la influencia de aumentar la frecuencia de ensayo hasta la propia de resonancia del conjunto probeta y máquina de ensayo [16]. Frente a esta propuesta, varios autores [17–19] indican que el rango de frecuencias en las que se debe de ensayar es entre 1 y 15 Hz dado que afirman que dentro de este intervalo se reduce el efecto de la frecuencia. Se justifica fijar el mínimo en 1 Hz para evitar un aumento excesivo del efecto de la fluencia al dar lugar a ensayos de muy larga duración. Sin embargo, no se justifica el por qué se fija el máximo en 15 Hz.

En esta investigación se caracterizaron tres tipos de hormigón autocompactante reciclado frente a ensayos de fatiga a compresión. Esta caracterización se desarrolló tanto a frecuencia moderada (10 Hz) como a alta (90 Hz). Se compararon los resultados de los ensayos Locati con $2 \cdot 10^5$ ciclos por escalón a frecuencia moderada y a alta, pudiendo comprobarse que los ensayos realizados a alta frecuencia resultan notablemente más conservadores que los de frecuencia moderada.

2. Materiales y métodos

2.1 Áridos

Los áridos reciclados utilizados para la fabricación de los hormigones caracterizados se obtuvieron de la trituración de balasto (RA-B) y traviesas fuera de uso (RA-S). Tras la trituración de estos materiales se obtuvieron 3 fracciones granulométricas de cada uno de estos residuos, véase Tabla 1. En la Figura 1 se puede ver la granulometría de las 6 fracciones granulométricas. De manera adicional, en la Tabla 1 se pueden ver los resultados de densidad relativa de las gravillas, las densidades reales de las arenas. También se determinó el índice de lajas de las dos gravillas, obteniendo un valor de un 14 [%] en el caso del RA-B-CA y de un 5 [%] para el caso RA-S-CA.

Tabla 1. Propiedades de los áridos.

Código	Descripción	Tamaño (mm)	Densidad (g/cm ³)
RA-B-CA	Árido grueso balasto	5-12	2.5
RA-S-CA	Árido grueso traviesa	5-12	2.3
RA-B-LS	Arena gruesa balasto	2-5	2.7
RA-S-LS	Arena gruesa traviesa	2-5	2.4
RA-B-FS	Arena fina balasto	0-2	2.8
RA-S-FS	Arena fina traviesa	0-2	2.5

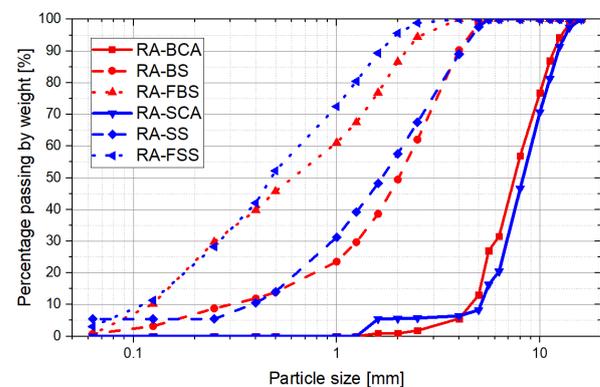


Figura 1. Curvas granulométricas de los áridos.

2.2 Cemento

Se utilizó un cemento tipo CEM IV (V) 32.5 N según la norma EN 197-1 [20], proporcionado por cementos Alfa [21], con una densidad de 2.85 g/cm³ determinada según la norma UNE 80103 [22] y una superficie específica Blaine de 3885 cm²/g obtenida según la norma EN 196-6 [23].

2.3 Dosificación

Con los áridos reciclados provenientes de elementos de vía fuera de uso se dosificaron 3 hormigones reciclados autocompactantes, el primero, exclusivamente con RA-B, denominado RC-B, el segundo exclusivamente con RA-S, denominado RC-S, y por último, un tercer hormigón con ambos tipos de áridos en la proporción en la que se encuentran estos residuos en vía abalastada, denominado RC-M. En la Tabla 2 se pueden ver las 3 dosificaciones.

Tabla 2. Dosificación.

Material	RC-B	RC-S	RC-M
Agua	225	200	221
Cemento	500	500	500
Aditivo SP	10	10	10
RA-FBS	790	-	677
RA-BS	320	-	274
RA-BCA	522	-	447
RA-FSS	-	690	98
RA-SS	-	283	40
RA-SCA	-	587	83

Cabe destacar que, las dosificaciones se realizaron definiendo como criterios de dosificación que los 3 hormigones autocompactantes tuviesen un comportamiento en estado fresco similar, por lo que, al tener los RA-B-CA una geometría notoriamente más lajosa que los RA-S-CA, fue preciso aumentar la cantidad de agua para lograr la misma trabajabilidad [24].

2.3 Propiedades mecánicas

Se determinó la resistencia a compresión según las normas EN 12390-3 y EN 13290-3/AC [25,26] utilizando probetas cúbicas de 100 mm de lado a las edades de 1, 2, 3, 5, 7, 28, 90 y 180 días. El módulo elástico estabilizado se determinó según la norma EN 12390-13 [27] utilizando probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 100 de diámetro a las edades de 7, 28, 90 y 180 días.

2.3 Ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga tanto a frecuencia moderada (10 Hz), como a muy alta frecuencia (90 Hz), se realizaron utilizando en todos los ensayos probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, cuando dichas probetas tenían una edad superior a los 90 días, esto fue así para garantizar que las propiedades del hormigón hubiesen alcanzado un estado estacionario. En todos los ensayos realizados, se registró a lo largo del ensayo tanto la carga aplicada a la probeta como la evolución de las deformaciones sufridas por las probetas. La deformación se registró por medio de 2 galgas extensométricas adheridas a las probetas en dos generatrices diametralmente opuestas, considerando la media de los valores proporcionados por ambas galgas como el valor de deformación de la probeta. En los ensayos a alta frecuencia se registró, de manera adicional, la frecuencia a la que se encontraba el sistema, dado que, al ser la frecuencia resonante del sistema, evolucionará con las variaciones de rigidez del mismo.

La caracterización en fatiga a frecuencia moderada se realizó mediante el método Locati [28,29]. La metodología Locati consiste en aplicar escalones crecientes de cargas senoidales, manteniendo constante la relación $\sigma_{max}/\sigma_{min} = 0.1$, durante un número constante de ciclos, en este caso $2 \cdot 10^5$ ciclos, Figura 2. Estos ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica de 1000 kN de capacidad máxima, véase Figura 3.

El criterio seguido para determinar el límite a fatiga mediante este tipo de ensayos fue el seguido por Thomas en su Tesis Doctoral [30], que obtuvo el rango tensional límite a fatiga como el 80% del rango tensional del escalón en el que se produce la rotura. Siendo el rango tensional la diferencia entre la tensión máxima y mínima $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, a este método se le denominó Método-1.

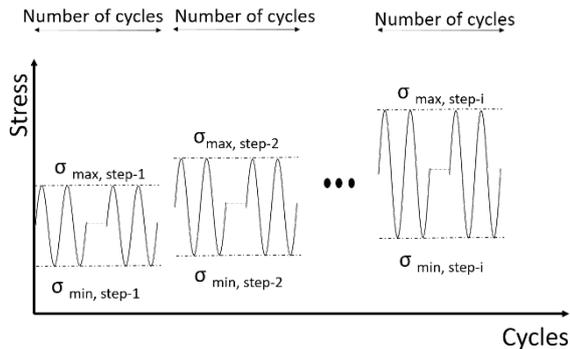


Figura 2. Ensayo Locati.

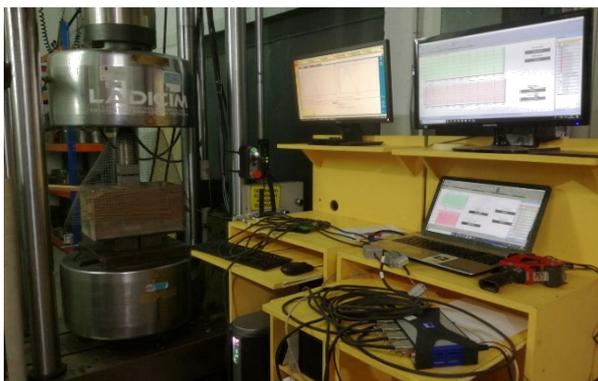


Figura 3. Ensayo a baja frecuencia.

Para analizar si un incremento en la frecuencia tiene influencia sobre los resultados a fatiga del hormigón, se realizaron ensayos bajo cargas idénticas a frecuencia moderada y muy alta frecuencia. Se utilizó una máquina de 400 kN de capacidad que realiza los ensayos de fatiga a la frecuencia de resonancia del conjunto de ensayo, es decir, el binomio probeta y máquina. Esta frecuencia de resonancia se encontró en todos los casos en el intervalo 90 ± 5 Hz, véase Figura 4. En este caso, de manera adicional a analizar los resultados siguiendo el procedimiento seguido por Thomas en su Tesis Doctoral [30], se decidió definir como criterio adicional de fallo, definir como rango tensional del límite a durabilidad como el rango tensional del escalón previo a que se produzca una caída

en la frecuencia de resonancia, a este método se le denominó Método-2, véase Figura 5.

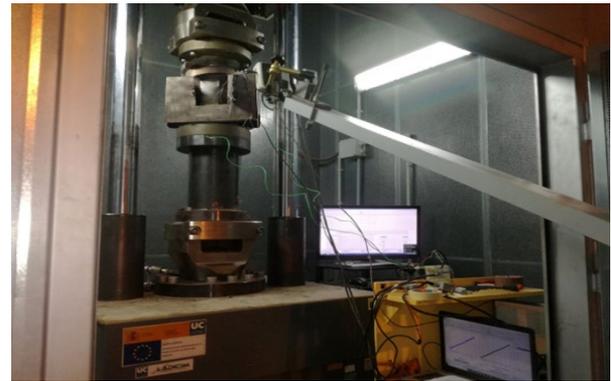


Figura 4. Ensayo a alta frecuencia.

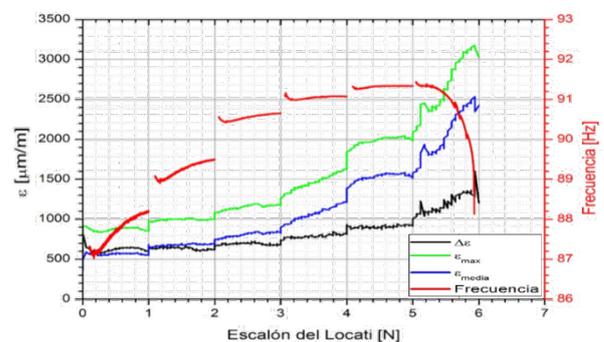


Figura 5. Parámetros registrados durante los ensayos a alta frecuencia.

Para poder comparar de la manera más directa posible los resultados obtenidos, se decidió fijar los escalones de carga a partir de la resistencia a compresión de cada material. Para ello, se definió el valor de la tensión máxima de cada escalón como un coeficiente (k) multiplicado por la resistencia a compresión en el momento de comenzar los ensayos de fatiga, es decir, a los 90 días de cada uno de los hormigones y, se fijó el ratio tensional $\sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ en 0.1. En la Tabla 3, se puede ver un ejemplo, el caso del RC-B, de los valores tensionales utilizados en cada uno de los escalones de carga aplicados.

Tabla 3. Situación tensional de cada escalón del Locati para el RC-B.

N	K	σ_{Max} [MPa]	σ_{Min} [MPa]	Rango [MPa]
1	0.30	17.8	1.8	16.0
2	0.35	20.8	2.1	18.7
3	0.40	23.8	2.4	21.4
4	0.45	26.7	2.7	24.0
5	0.50	29.7	3.0	26.7
6	0.55	32.7	3.3	29.4
7	0.60	35.7	3.6	32.1
8	0.65	38.6	3.9	34.7
9	0.70	41.6	4.2	37.4

3. Resultados y discusión

3.1 Resistencia a compresión y módulo elástico

En la Figura 6 se puede observar la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo, por su parte, en la Figura 7 se puede ver la evolución del módulo elástico en función del tiempo de los distintos hormigones.

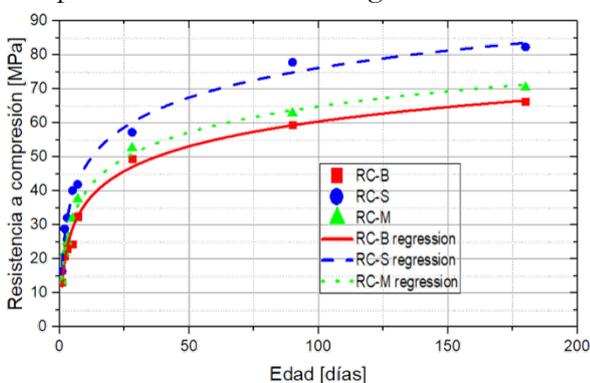


Figura 6. Resistencia a compresión.

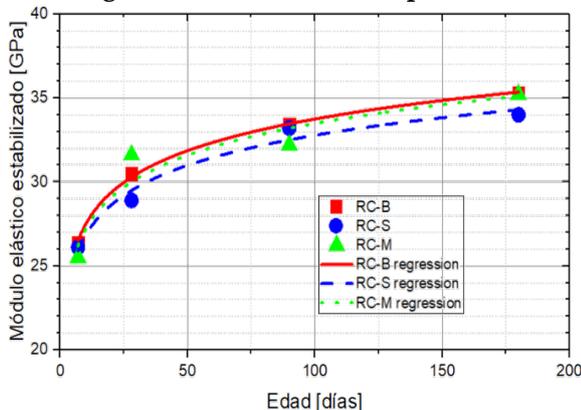


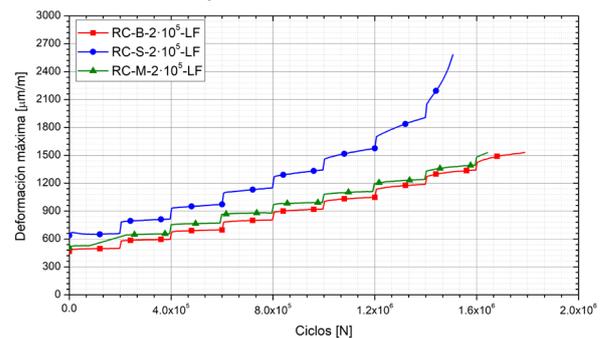
Figura 7. Módulo elástico.

Se puede observar la gran influencia de la relación w/c en la resistencia a compresión del RC-S. Por su parte, el RC-B es el hormigón en el que se obtienen las menores resistencias a compresión, el RC-M se encuentra en un punto intermedio entre los otros dos hormigones.

En el caso del Young's modulus, si bien la pasta RC-S es de mejor calidad que el del RC-B, la notablemente menor rigidez del mortero adherido a los áridos naturales que conforman los RA-S, hacen que el módulo elástico del RC-S sea menor que el del RC-B. Al igual que en el caso de la resistencia a compresión, en todos los casos el RC-M se encuentra entre los hormigones RC-B y RC-S.

3.2 Influencia de la frecuencia en la vida en fatiga

En la Figura 8 se puede ver un ejemplo de la envolvente de la deformación máxima registrada durante los ensayos Locati a frecuencia de 10 Hz.



En la Figura 8 se puede apreciar, en primer lugar, que el RC-B es el que más escalones es capaz de resistir, lo que implica que, es el material que tiene un mayor ratio límite de durabilidad / resistencia a compresión, siendo el RC-S el que menos y encontrándose el RC-M en una situación intermedia entre los otros dos materiales. Estos resultados concuerdan con los resultados de otros autores que, aseguran que la presencia de mortero adherido en el RA reduce este coeficiente [11,12,32]. También se puede apreciar que los valores de deformación que sufren las probetas es menor en el caso del RC-B, cabe destacar que, al tratarse cada uno de los escalones de un porcentaje fijo frente a la carga de rotura de cada material, no son valores

comparables directamente entre sí al ser valores tensionales distintos.

En la Tabla 4 se puede ver un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos a frecuencia moderada realizados tomando como criterio, para definir el rango tensional correspondiente, la endurancia del hormigón el 80% del rango tensional aplicado en el último escalón del ensayo Locati, criterio propuesto por Thomas en su tesis doctoral [31].

Tabla 4. Límite a fatiga a frecuencia moderada.

Material	$\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	fL (MPa)	IC (%)
RC-B	38.75	31.0	52.2
RC-S	45.5	36.4	46.8
RC-M	39.6	31.7	50.4

Del análisis de estos resultados se puede apreciar que, el material que mayor rango tensional es capaz de resistir es el RC-S, siendo el que menos el RC-B y encontrándose en todo momento el RC-M en un valor intermedio. De igual manera, es posible determinar que, si bien el RC-S es el que mayores valores de rango tensional es capaz de soportar, es el que menor IC presenta. Esta pérdida respecto de su resistencia a compresión se achaca a la presencia de mortero adherido al árido. En cualquier caso, estos valores de límite a fatiga / resistencia a compresión se encuentran dentro del rango habitual para hormigones al concordar con valores encontrados en la bibliografía [11,12].

En la Figura 9 se puede ver un ejemplo de la envolvente de la deformación máxima sufrida por una probeta de cada material durante ensayos Locati a la frecuencia de resonancia del conjunto maquina probeta.

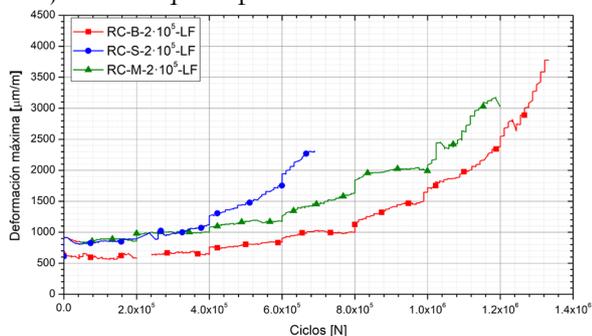


Figura 9. Deformación máxima registrada durante los ensayos Locati a alta frecuencia.

En la Tabla 5 y Tabla 6 se pueden ver los resultados obtenidos de los ensayos Locati con 2·10⁵ ciclos por escalón a muy alta frecuencia utilizando los dos criterios planteados previamente.

Tabla 5. Límite a fatiga a alta frecuencia método 1.

Material	$\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	fL (MPa)	IC (%)
RC-B	32.09	25.67	43.19
RC-S	31.51	25.21	32.40
RC-M	31.10	24.88	39.60

Tabla 6. Límite a fatiga a alta frecuencia método 2.

Material	$\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	fL (MPa)	IC (%)
RC-B	32.09	26.74	44.93
RC-S	31.51	28.01	35.99
RC-M	31.10	28.27	45.04

Del análisis de los resultados de la **Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** se puede determinar que, como se había deducido de la evolución de la deformación máxima, que el RC-B es el material al que mayor IC presenta, aunque debido a que la resistencia a compresión del RC-S es la mayor de todas, los rangos tensionales correspondientes al límite a fatiga de los 3 hormigones son similares. También se puede apreciar que, si bien, los valores tanto de límite a fatiga como de IC, obtenidos mediante los dos criterios de análisis son similares, en el mayor de los casos un 5% de diferencia en el límite proporcionado por Thomas [31] es en todos los casos más conservador que el obtenido mediante la frecuencia de resonancia.

En las Figura 10 a Figura 12 se presenta un ejemplo de la comparación de la deformación máxima entre los dos tipos de ensayo Locati para cada material.

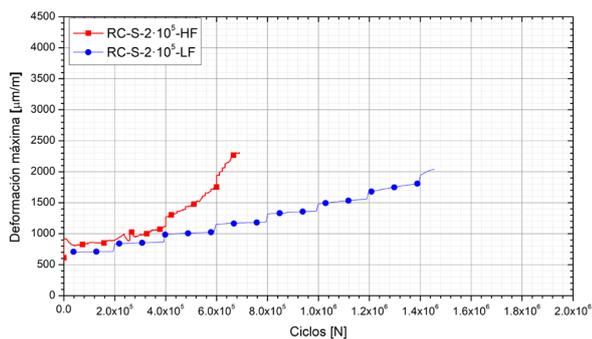
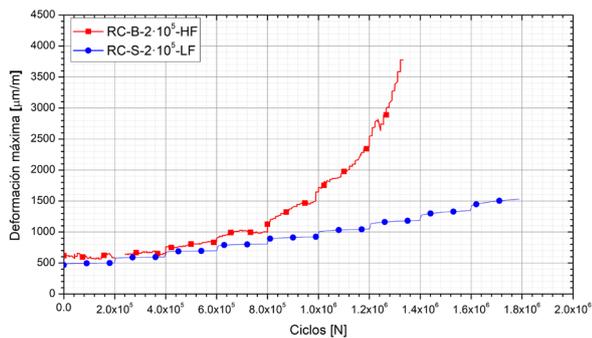


Figura 11. Comparativa de la deformación máxima durante los ensayos Locati a alta frecuencia y moderada para el RC-S.

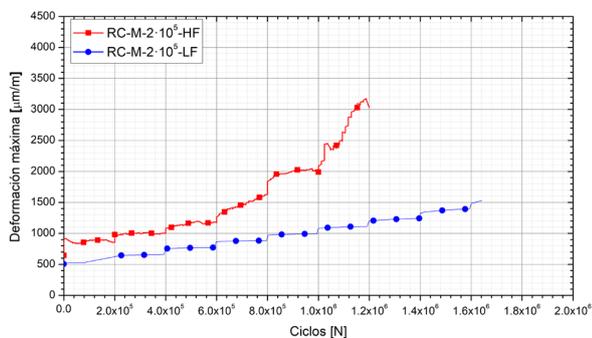


Figura 12. Comparativa de la deformación máxima durante los ensayos Locati a alta frecuencia y moderada para el RC-M.

Del análisis de las Figura 10 a Figura 12 se puede apreciar que, en los 3 casos, el incremento de frecuencia reduce notablemente el límite a fatiga del material. De igual manera, es posible apreciar que, en los 3 casos, en una primera zona, el comportamiento a muy alta y a frecuencia moderada es similar, mientras que, una vez pasado un cierto límite, los valores de deformación máxima registrados a muy alta frecuencia crecen de manera mucho más rápida que en el caso de la frecuencia moderada. Cabe

destacar que, cuando se retiraban las probetas ensayadas, se detectó que aquellas probetas ensayadas a muy alta frecuencia se encontraban a una temperatura anormalmente alta, hecho que no se detectó en aquellas probetas ensayadas a frecuencia moderada.

4. Conclusiones

Si bien el hormigón es un material que habitualmente no se caracteriza a fatiga, resulta indudable que existen ciertos elementos típicamente de hormigón que están sometidas a cargas variables y, por lo tanto, precisan de ser caracterizadas a fatiga. En el presente trabajo se han caracterizado 3 tipos de hormigón a fatiga mediante el método de fatiga acelerada Locati. Se han realizado ensayos de fatiga para analizar una variable fundamental en la duración de los ensayos como es la frecuencia de ensayo. De los resultados obtenidos pueden observarse las siguientes conclusiones:

- Se aprecia que en todos los casos el material que menor ratio limite a fatiga/ resistencia a compresión presenta es el RC-S, esto se achaca a la debilidad que introduce la pasta adherida a los áridos.
- Se ha encontrado que la frecuencia de resonancia del sistema es un parámetro capaz de identificar variaciones sensibles en la rigidez del conjunto, síntoma de que la probeta se encuentra próxima a la rotura. Por esta razón, se define como criterio para determinar el límite a fatiga mediante los ensayos Locati el rango tensional del escalón previo al escalón en el que se produce una caída en la frecuencia de resonancia del sistema.
- Los resultados de endurance obtenidos mediante ensayos a muy alta frecuencia resultan más conservadores que los realizados a frecuencia moderada. Se propone que durante los ensayos a muy alta frecuencia se produce un incremento de temperatura que puede reducir la vida en fatiga del hormigón. Este estudio abre la puerta al análisis de esta hipótesis que podrá explicar la razón por la cual un incremento

en la frecuencia reduce la vida en fátiga de los elementos.

Referencias

- [1] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra, R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *J. Clean. Prod.* 203 (2018) 822–835.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.292>.
- [2] C. Meyer, The greening of the concrete industry, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 601–605.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONC.OMP.2008.12.010>.
- [3] C.-S. Poon, D. Chan, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, *Resour. Conserv. Recycl.* 50 (2007) 293–305.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>.
- [4] G. De Schutter, K. Audenaert, Report 38: Durability of Self-Compacting Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, RILEM publications, 2007.
- [5] C. Thomas, J. Setién, J.A.Ja. Polanco, P. Alaejos, M.S. De Juan, M. Sánchez de Juan, Durability of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 1054–1065.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD.MAT.2012.11.106>.
- [6] J. De Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, M. Guerreiro, Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete, *J. Build. Eng.* 6 (2016) 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.003>.
- [7] S.C.C. Kou, C.S.S. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONC.OMP.2009.06.005>.
- [8] A. Alliche, Damage model for fatigue loading of concrete, *Int. J. Fatigue.* 26 (2004) 915–921.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2004.02.006>.
- [9] J. Xiao, H. Li, Z. Yang, Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 681–688.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.024>.
- [10] Ł. Skarżyński, I. Marzec, J. Tejchman, Fracture evolution in concrete compressive fatigue experiments based on X-ray micro-CT images, *Int. J. Fatigue.* 122 (2019) 256–272.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2019.02.002>.
- [11] C. Thomas, J. Setién, J.A.A. Polanco, I. Lombillo, A. Cimentada, Fatigue limit of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 146–154.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD.MAT.2013.11.032>.
- [12] C. Thomas, I. Sosa, J. Setién, J.A. Polanco, A.I. Cimentada, Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 65 (2014) 397–405.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.09.036>.
- [13] Q. Li, B. Huang, S. Xu, B. Zhou, R.C. Yu, Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility, *Cem. Concr. Res.* 90 (2016) 174–183.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONR.ES.2016.09.019>.
- [14] M.A. Vicente, J. Mínguez, D.C. González, Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of fiber-reinforced concrete under static and cyclic bending tests, *Int. J. Fatigue.* 121 (2019) 9–19.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2018.11.023>.

- [15] C. Carloni, K. V. Subramaniam, Investigation of sub-critical fatigue crack growth in FRP/concrete cohesive interface using digital image analysis, *Compos. Part B Eng.* 51 (2013) 35–43. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.02.015>.
- [16] A. Yoris, C. Thomas, C. Medina, J.A. Polanco, M.I. Sánchez de Rojas, M. Frias, B. Cantero, Comportamiento a fatiga resonante en compresión de hormigones reciclados para uso estructural, in: V. L., L. I., B. H., B. Y. (Eds.), 7th Euro-American Congr. Constr. Pathol. Rehabil. Technol. Herit. Manag. REHABEND 2018, University of Cantabria - Building Technology R&D Group, LADICIM (Laboratory of Materials Science and Engineering), University of Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, Santander, 39005, Spain, 2018: pp. 1460–1467. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85057981584&partnerID=40&md5=09af74745eb4d86f788b13d6f6b65f7dc>.
- [17] A. Medeiros, X. Zhang, G. Ruiz, R.C. Yu, M. de S.L. Velasco, Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete, *Int. J. Fatigue.* 70 (2015) 342–350. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2014.08.005>.
- [18] J.W. Murdock, A critical review of research on fatigue of plain concrete, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering ..., 1965.
- [19] J.M. Hanson, C.A. Ballinger, D. Linger, C. Rep, Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading, *ACI J.* 71 (1974) 97–121. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0016035704&partnerID=40&md5=d8b60ba82d37cbec96f8e1c412bca393>.
- [20] EN 197-1, Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, Br. Stand. (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.88>.
- [21] C. Alfa, Ficha técnica EN 197-1 CEM IV/B (V) 32,5 N, (n.d.).
- [22] U.N.E. 80103:2013, Test methods of cements. Physical analysis. Actual density determination, (2013).
- [23] E.N. 196-6:2010, Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness, (2010).
- [24] J. Sainz-Aja, I. Carrascal, J.A. Polanco, C. Thomas, I. Sosa, J. Casado, S. Diego, Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes, *J. Clean. Prod.* 230 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.386>.
- [25] U.-E. 12390-3:2009, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2009).
- [26] E.N. 12390-3:2009/AC:2011, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2011).
- [27] E.N. 12390-13:2013, Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, (2014).
- [28] L. Locati, *La fatica dei materiali metallici*, Ulrico Hoepli, 1950.
- [29] L. Locati, Programmed fatigue test, variable amplitude rotat, *Metall. Ital.* 44 (1952) 135–144.
- [30] C. Thomas García, *HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL*, 2012.