

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO PROCEDENTES DE VÍA MEDIANTE TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA

J.A. Sainz-Aja*, I.A. Carrascal, J.A. Polanco, I. Sosa, C. Thomas

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

* Persona de contacto: jose.sainz-aja@unican.es

RESUMEN

Para la mejora de la calidad de las infraestructuras ferroviarias y la reducción de los costes de mantenimiento se plantea la sustitución de la vía tradicional por vía en placa. Debido al gran coste que supone esta nueva sustitución se plantea el empleo de árido reciclado proveniente de componentes ferroviarios fuera de uso, concretamente de las traviesas y el balasto.

En una primera etapa, se analizará el comportamiento a fatiga de morteros fabricados con las arenas recicladas tanto de las traviesas como del balasto. Para ello se han fabricado probetas cilíndricas miniatura de 40 mm de altura y 20 mm de diámetro para las que se han empleado tres arenas de diferentes procedencias, pero con la misma granulometría: arena de traviesa, de balasto y de sílice normalizada.

El método empleado para la caracterización en fatiga es el método acelerado de LOCATI. Para la evaluación del daño ocasionado por la fatiga se ha utilizado la técnica de Tomografía Axial Computarizada que permitirá entre cada bloque de fatiga aplicado evaluar la evolución del tamaño y forma de los poros de mayor tamaño, número de poros, así como detectar la aparición de fisuras y la evolución de las mismas.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, LOCATI, tomografía axial computarizada, morteros, árido reciclado, traviesa, balasto

ABSTRACT

Nowadays railway infrastructure is becoming obsolete, due to evolution of the trains. For this reason, it is fundamental to improve railroad superstructures, as well as to find a way to recycle the superstructures already obsolete. As a solution, the use of ballast and sleepers out of use as aggregates for the manufacture of slab track is proposed. A validation of this material as an aggregate for the manufacture of slab track is proposed, it is focused on comparing its fatigue strength with that of a standardized aggregate. For this, a series of LOCATI fatigue tests mixed with CT analyses, to see the evolution of the damage suffered by the sample, is carried out.

KEYWORDS: Fatigue, LOCATI, CT, mortars, recycled aggregates, sleepers, ballast.

1. INTRODUCCIÓN

Durante aproximadamente 130 años, el tráfico ferroviario se ha realizado mayoritariamente en vías tradicionales con balasto. Los requisitos más exigentes, debido a la aparición de trenes de alta velocidad, de unas mayores cargas por eje, mayores frecuencias de trenes y una mayor conciencia medioambiental, han creado un nuevo objetivo: los sistemas de vía sin balasto, también llamados sistemas de vía en placa.

La vía en placa supone un ahorro económico importante en el mantenimiento de la vía aunque supone una inversión inicial mayor y presenta un mejor comportamiento mecánico con unos rendimientos constructivos menores.

Existen estudios comparativos entre vía tradicional, formada por traviesas y balasto, y vía en placa analizando aspectos económicos y técnicos [1,2].

El beneficio económico proviene por un lado del ahorro de la compra de los nuevos materiales, y por otro lado del ahorro que supone el transporte hasta vertedero y el posterior acopio del material retirado.

El ahorro medioambiental también viene enfocado desde los dos mismos puntos de vista, por un lado, se evita la extracción de roca nueva en una cantera y por otro lado se evita el acopio del elevado volumen de desechos que se genera tras la retirada de la vía tradicional.

Lamentablemente, estos nuevos requerimientos convierten parte de las líneas ferroviarias actuales en obsoletas, por tanto surge la necesidad de renovar estas líneas ya que suponen la aparición de una gran cantidad de desechos que ocasionan un coste económico y medioambiental.

Con la finalidad de resolver ambas problemáticas se propone utilizar como árido para la fabricación de la vía en placa los desechos generados de la retirada de la vía ya obsoleta, tanto de las traviesas fuera de uso, como del balasto ya inservible.

El uso de áridos reciclados (RCD) para la fabricación de hormigones es algo que a día de hoy está relativamente extendido [3] aunque con algunas limitaciones, ya que existen normativas al respecto como por ejemplo EHE-08 [4] o catálogos como el catálogo de residuos de construcción y demolición emitido por el CEDEX [5] que clasifica cada residuo especificando sus posibles usos, pero dichas normativas resultan considerablemente conservadoras.

Cabe destacar la importancia de la resistencia a fatiga que ha de tener este material. Debido al tipo de acciones que aparecen, ocasionadas por las altas velocidades de los trenes. Por esta razón se ha realizado un estudio específico de la resistencia a fatiga utilizando el método LOCATI de fatiga acelerada.

A pesar de que el método LOCATI es un método contrastado [6-8], se plantea [9] la comparativa de este método con un análisis del daño acumulado basado en Tomografía Axial Computarizada, con este método se obtiene un modelo digital 3d de las probetas analizadas, un análisis tanto cualitativo como cuantitativo de la evolución tanto de los poros, como de la aparición y propagación de las fisuras.

2. MATERIAL

Para este trabajo en el que se trata de validar estas arenas como materiales aptos para la fabricación de vía en placa se han definido tres materiales para analizar, una arena normalizada de sílice, una arena proveniente del balasto triturado y una arena proveniente de las traviesas trituradas. Con ellas se fabricaron tanto morteros normalizados, como minimorteros.

Los morteros normalizados son probetas prismáticas de 160x40x40 mm, las cuales fueron utilizadas para ensayos normalizados de compresión simple. Los minimorteros son cilindros de 20 mm de diámetro y 40 mm de altura, conservando las proporciones de las probetas cilíndricas normalizadas. Estas probetas fueron utilizadas para ensayos de compresión simple y ensayos de fatiga, concretamente ensayos de caracterización en fatiga mediante el método acelerado de LOCATI. Además, han sido analizadas mediante tomografía axial computarizada para obtener información sobre la red de defectos internos de las mismas. La razón de utilizar minimorteros en vez de morteros normalizados para estos ensayos de fatiga es la limitación en cuanto al tamaño de las muestras que se pueden introducir en el micro-TAC.

Con la intención de que las muestras sean lo más homogéneas posible, además de utilizar muestras con la misma geometría se ha utilizado una misma granulometría normalizada para todas las arenas, además de utilizar la misma relación agua/cemento efectiva (Tabla 1).

Tabla 1. Dosificación morteros

Material	Agua teo [g]	Agua [g]	Cemento [g]	Arena [g]
Sílice	250,00	253,52	500,00	1335,57
Balasto	250,00	251,56	500,00	1451,71
Traviesa	250,00	295,59	500,00	1319,73

Para definir la misma granulometría en todas las muestras se optó por tomar como patrón la granulometría de la arena normalizada, la cual cumple con la norma UNE-EN 933-1:2012 [10]. Para ello, en primer lugar se calcularon las densidades de los tres materiales, posteriormente se tamizó una muestra normalizada, y se definió el volumen de cada una de las fracciones. Con dicho resultado se pudo calcular el peso necesario de cada una de las fracciones de los otros dos materiales.

Para que todas las muestras tuviesen la misma relación agua cemento efectiva fue preciso la determinación de la absorción de cada uno de los materiales.

Para la fabricación de estos morteros se utilizó un cemento tipo IV, ya que presenta un menor porcentaje de Clinker, por lo que resulta menos dañino para el medio ambiente.

Los datos de la absorción y la densidad, parámetros clave para mantener constante la relación agua cemento efectiva aparecen en la tabla 2:

Tabla 2. Propiedades de los árido

Material	Densidad [g/cm ³]	Absorción [%]
Sílice	2,53	0,26
Balasto	2,75	0,11
Traviesa	2,50	3,45

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Determinación granulometría

Para la determinación de la granulometría de las muestras se utilizó la serie de tamices UNE, concretamente los tamices de abertura 2, 1.6, 1, 0.5, 0.16 y 0.08 mm. Se siguió el procedimiento descrito en la norma: UNE-EN 933-1:2012 [10].

3.2. Determinación de la densidad y absorción de los áridos

La determinación de densidades, porosidad y absorción se realiza mediante los procedimientos descritos en la normativa UNE-EN 1097-3 [11] y UNE-EN 1097-6 [12].

Para la determinación de la densidad de las arenas (expresión 1) se utilizó un picnómetro. El procedimiento consiste en rellenar de agua el matraz hasta un cierto volumen conocido, pesaremos el volumen de agua (M_3), a continuación, se añadir material granular hasta que la cota del agua alcance una segunda cota también conocida en ese momento, se pesara por un lado el material granular seco introducido (M_4) y el peso del picnómetro con el agua y la muestra de material granular (M_2).

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (1)$$

Para la determinación de la absorción (expresión 2) se mantuvieron las arenas en agua durante 72 horas, tiempo tras el cual se procedió al secado superficial de las mismas mediante un decapador, una vez que las muestras estaban secas superficialmente se procedió a su pesado (M_1). Posteriormente se introdujeron en una estufa a 105°C hasta masa constante momento en el que se obtuvo el peso seco (M_4).

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (2)$$

3.3. Fabricación morteros

Para la fabricación de las probetas de mortero, tanto normalizadas como de los minimorteros, fue preciso definir los elementos necesarios: materiales y granulometría, modo de amasado, moldes, método de curado y preparación de muestras.

En cuanto a los materiales, se definieron 3 tipologías de árido, arena reciclada proveniente de traviesas fuera de uso, arena reciclada proveniente de balasto fuera de uso y arena de sílice normalizada. El cemento utilizado fue un cemento tipo IV de 32.5N. Con el objetivo de que los resultados sean lo más comparables posibles, se plantea definir una misma granulometría para todas las muestras, esta granulometría será la de las muestras normalizadas, y estará basada en la norma UNE-EN 196-1:2005 [13].

Para el amasado de la mezcla se utilizó una amasadora de 5 litros de capacidad [13].

Los moldes de las probetas normalizadas cumplen con las dimensiones definidas en la norma [13], mientras que para los minimorteros se diseñó un molde específico en base a dos medias cañas para obtener una geometría cilíndrica de 20 mm de diámetro y 50 mm de altura.

El compactado, tanto de las probetas normalizadas, como de los minimorteros se realizó por medio de una compactadora que cumple con los requisitos

establecidos en la norma [13]. Para fijar los moldes de las miniprobetas a la compactadora en la posición adecuada se fijaron 7 minimoldes en cada uno de los huecos de un molde de mortero normalizado, fabricando 21 miniprobetas por cada amasada. A las 24 horas se procedió al desmoldado de las probetas, tras lo cual se introdujeron en agua buscando un curado óptimo.



Figura 1. Minimorteros durante la fase de curado

Los morteros normalizados no precisaron de ningún tipo de preparación previa, mientras que los minimorteros necesitaron ser descabezados y pulidos para garantizar la axialidad de las cargas.

3.4. Ensayos de compresión

Los morteros normalizados fueron ensayados según dicta la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 [14]. En un primer lugar se ensayan las probetas de 40x40x160 a flexotracción, de donde se obtienen dos mitades las cuales son posteriormente ensayadas a compresión.

Para ensayar a compresión simple los minimorteros se utilizó una máquina servohidráulica de capacidad ± 100 kN a la que se acopló el útil de compresión de morteros normalizados dotado de una rotula en la cabeza superior que garantiza que las cargas se aplican perpendicularmente a la probeta.

La velocidad de aplicación de la carga fue de 0.05 mm/s garantizando que no hubo acelerones, ni que los tiempos de ensayo fueron en ningún caso inferior a 30 segundos o superiores a 90 segundos.

3.5. Ensayo de fatiga de minimorteros

Para determinar el comportamiento a largo plazo del material bajo esfuerzos variables de fatiga emulando sus condiciones de servicio en determinadas circunstancias, se decidió caracterizar el material reciclado dinámicamente realizando un ensayo de fatiga acelerado LOCATI [6,7]. La metodología de este ensayo consiste en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente a partir de un valor inferior a la resistencia a fatiga estimada, durante un número constante de ciclos a una frecuencia determinada. En la Figura 2 se muestra esquemáticamente los trenes de ondas en cada bloque de

carga, y en la tabla 3 aparecen los valores de las cargas empleadas.

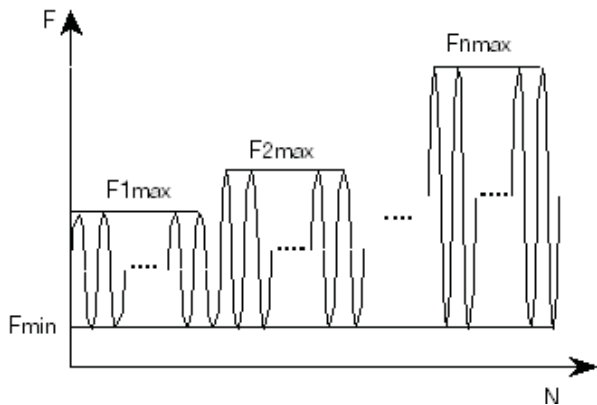


Figura 2. Metodología de ensayo LOCATI

Tabla 3. Parámetros empleados en el ensayo LOCATI

Step	Max Compressive Load [kN]	Min Compressive Load [kN]	Mediun Load [kN]	Amplitude [kN]
1	2,62	0,26	1,44	1,18
2	4,36	0,44	2,4	1,96
3	6,1	0,62	3,36	2,74
4	7,84	0,8	4,32	3,52
5	9,58	0,98	5,28	4,3
6	11,32	1,16	6,24	5,08
7	13,06	1,34	7,2	5,86
8	14,8	1,52	8,16	6,64
9	16,54	1,7	9,12	7,42
10	18,28	1,88	10,08	8,2

Este tipo de ensayo se presenta como alternativa a otros tradicionales enfocados a determinar la endurancia o resistencia a fatiga de un material a través de la curva de Wöhler [15] y el Staircase [16], permitiendo estimar de forma rápida, con un único ensayo, la resistencia a fatiga o endurancia del componente en estudio. Asimismo, permite comparar, cómodamente, los diferentes parámetros dinámicos determinados en cada una de las condiciones analizadas.

3.6. Análisis tomografía axial computarizada (TAC)

Para el análisis de la evolución de los poros y fisuras presentes en las probetas analizadas, se recurrió a un micro-Tomógrafo Axial Computarizado, el cual puede proporcionar información tanto cualitativa, como cuantitativa sobre la porosidad de las probetas ensayadas.

Este análisis consta de cuatro fases.

- **Escaneo:** En esta fase se enfoca a la muestra con una fuente de rayos X repetidamente mientras la muestra va girando, de tal manera que se realiza una serie de radiografías de la muestra. Para este escaneo se utilizó un micro-TAC Skyscan1172 con

una fuente de Rayos X de 80 kV y 100 uA. Para obtener la resolución necesaria para analizar con calidad la evolución de la porosidad se optó por utilizar un Image Pixel Size = 13.51 um.

- **Reconstrucción:** En esta fase, mediante el software Nrecond, se pasa de las imágenes longitudinales obtenidas en el escaneo a las imágenes transversales de la muestra, véase figura 3. Para ello es preciso correlacionar la absorción lineal de cada material con un tono de gris entre 0 y 255. Esto se hace mediante dos factores denominados CS, que definen el gris 0 [negro] y el gris 255 [blanco]. En estas muestras se utilizaron los mismos parámetros CS para todas las muestras de tal manera que los resultados sean comparables entre sí, CSmin=0.01 y CSmax=0.1.
- **Análisis cuantitativo:** Mediante un software de análisis de imagen se permite determinar una serie de propiedades geométricas, entre ellas porosidad de la muestra completa, porosidad la muestra, véase figura 4. Para ello es preciso definir un valor de thresholding, el cual se fija mediante un proceso no paramétrico, manteniéndolo constante para todas las muestras, garantizando de esta manera que se trata de resultados comparables entre sí.
- **Análisis cualitativo:** esta técnica nos permite ver cómo evolucionan tanto los poros como las fisuras a lo largo de las probetas y del tiempo. Lo cual puede ser de interés para ver planos de fallo o dirección de crecimiento de las fisuras.

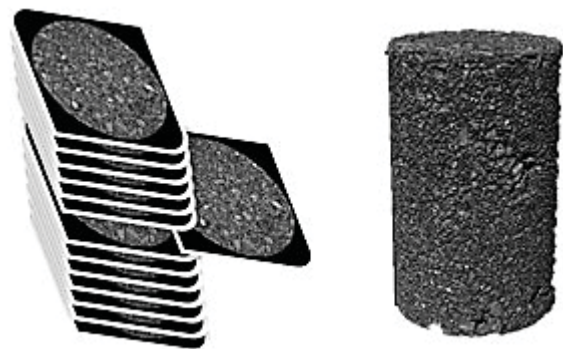


Figura 3. Funcionamiento micro-TAC

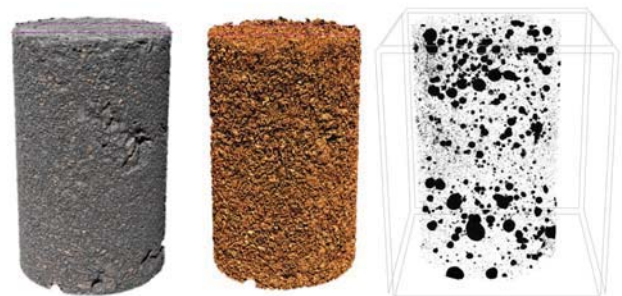


Figura 4. Posibilidades micro-TAC

4. ANÁLISIS Y RESULTADO

4.1. Caracterización física

La curva granulométrica de la muestra de arena normalizada ha de encontrarse entre unos valores que marca la norma UNE EN 196-1[13], tal y como aparece en la figura 5.

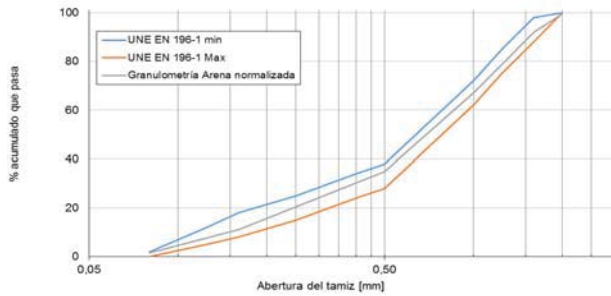


Figura 5. Granulometría arenas

Las tres muestras tendrán la misma curva granulométrica, para ello se han determinado las masas de cada fracción necesarias a partir de las densidades de cada una de las muestras.

A partir de estas densidades se determinó el peso de material necesario para cada tamaño de partícula, véase tabla 4:

Tabla 4. Peso de cada fracción de árido

Tamiz	Sílice	Balasto	Traviesa
2	4,46	4,85	4,41
1,6	192,76	209,52	190,47
1,25	199,86	217,24	197,49
1	43,86	47,67	43,34
0,5	428,03	465,25	422,95
0,4	50,20	54,57	49,60
0,25	133,30	144,89	131,72
0,125	219,50	238,59	216,90
0,063	54,72	59,48	54,07
0	8,88	9,65	8,77
Total	1335,57	1451,71	1319,73

4.2. Caracterización en compresión

De los morteros normalizados se obtuvieron resultados de compresión a 28 días. Se ensayaron 5 minimorteros a compresión de cada una de las dosificaciones a los 90 días de ser fabricados, fecha en que se comenzaron a realizar los ensayos de fatiga. Los resultados aparecen reflejados en la figura 6.

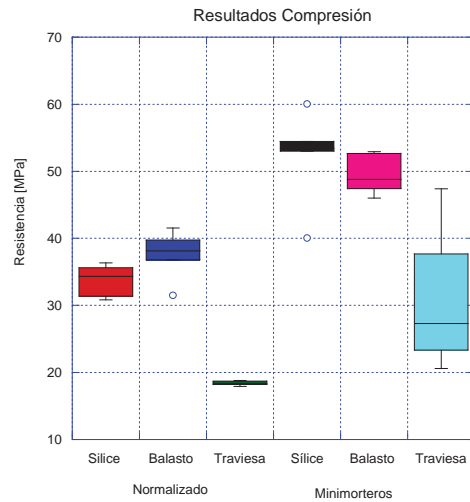


Figura 6. Resultados compresión

Se puede comprobar que el árido procedente del balasto obtiene resultados similares al de sílice, mientras que el árido de traviesa obtiene valores, prácticamente de la mitad.

Se puede observar una enorme dispersión en los ensayos realizados sobre minimorteros provenientes de traviesa. Al analizar las probetas mediante la técnica de tomografía axial computarizada se pudo apreciar que presentaban fisuras de retracción debidas a problemas durante el fraguado, véase figura 7.

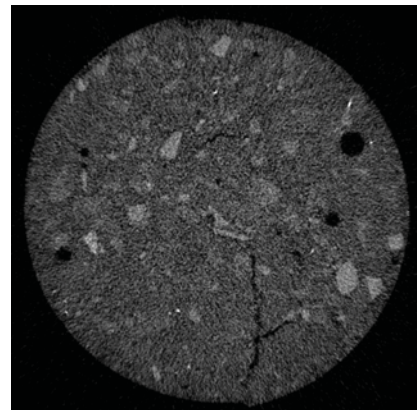


Figura 7. Mini probeta de traviesa con fisura de retracción

Debido a este problema no se continuó con los ensayos de fatiga sobre los morteros con arena reciclado proveniente de traviesa.

4.3. Caracterización en fatiga

Durante los ensayos de fatiga se registró la evolución tanto del desplazamiento del actuador como de la fuerza aplicada. En los gráficos de las figuras 8 a 10 se muestra la variación del desplazamiento del actuador en función del número de ciclos.

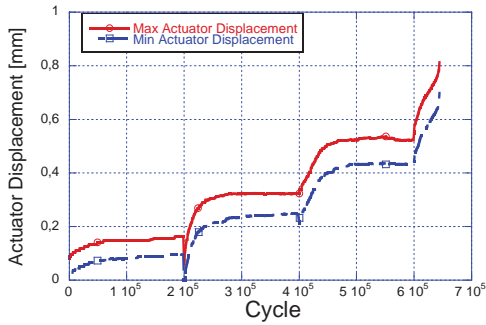


Figura 8. Curva Locati probeta Balasto-1

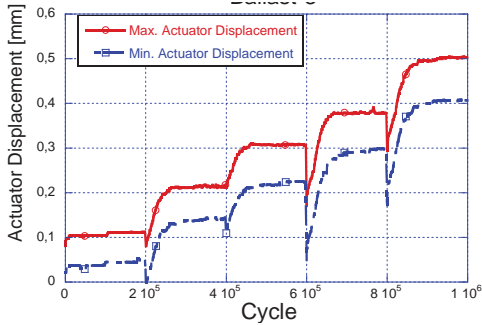


Figura 9. Curva Locati probeta Balasto-3

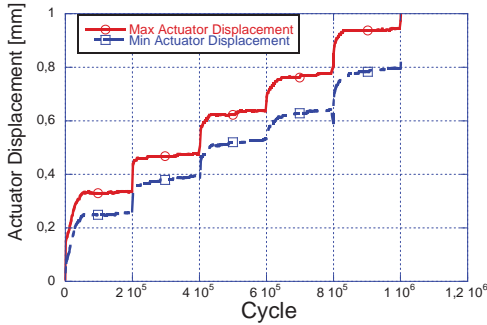


Figura 10. Curva Locati probeta Sílice-2

A partir de los resultados obtenidos se ha determinado la resistencia a fatiga de los dos materiales, para ello se definió como el 80% de la variación de tensión del escalón de rotura[8]. En la gráfica 11 se puede apreciar una comparativa entre los resultados obtenidos en fatiga por los dos materiales.

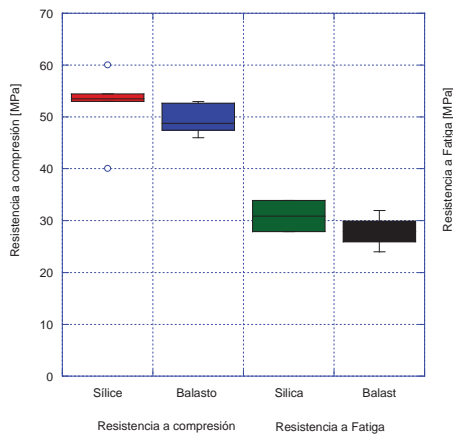


Figura 11. Resistencias compresión y fatiga

Por medio de la Tomografía Axial Computarizada se ha podido explicar que la probeta Balast-1 presente una menor resistencia a fatiga que la probeta Balast-3, ya que como se aprecia en la figura 12, la cantidad de defectos internos es claramente superior. En esta figura se representa el porcentaje de imperfecciones para las diferentes superficies transversales a diferentes alturas.

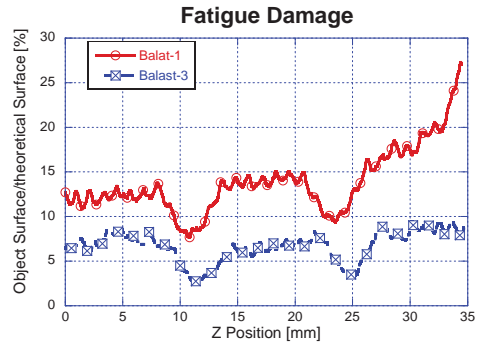


Figura 12. Comparativa del nivel de imperfecciones de las probetas Balasto-1 y Balasto-3.

4.4. Análisis de micro-Tomografía axial computarizada

Mediante esta técnica se puede apreciar la evolución de los defectos internos de las probetas, lo cual tiene una relación directa con la resistencia a fatiga de las mismas. En la figura 13 se puede apreciar la diferencia entre los defectos presentes en una probeta antes del primer escalón y al terminar el escalón previo a la ruptura.

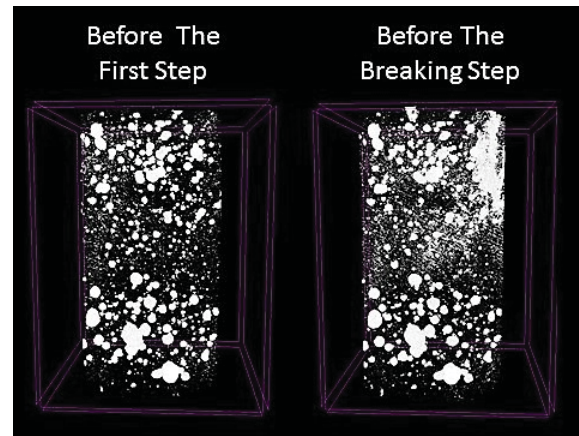


Figura 13. Defectos presentes en una misma probeta antes y después de la fatiga

Con la intención de tener unos datos comparables cuantitativamente se obtuvo la porosidad sección a sección de las muestras para evaluar una posible evolución en el área de defectos presentes en las muestras, véanse figuras 14 y 15. En estas figuras, sobre todo en la probeta Ballast-2, se puede apreciar como en el escalón previo a la rotura la porosidad se desmarca del resto de escalones, sirviendo como indicador de que se está generando un daño sobre el material.

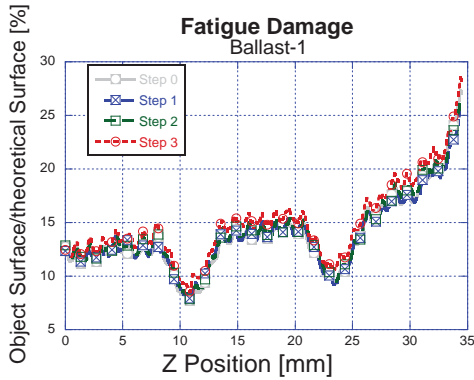


Figura 14. Evolución porosidad 2D probeta Balasto-1

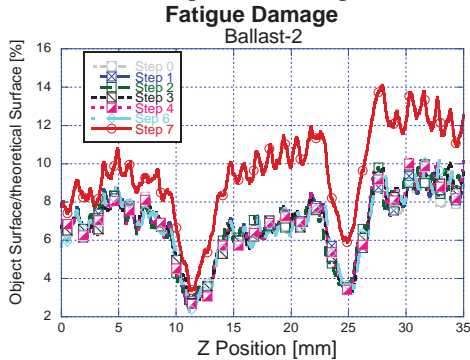


Figura 15. Evolución porosidad 2D probeta Balasto-2

En las figuras 16 y 17 se puede apreciar la evolución del volumen total de defectos en función del número de ciclos. Al igual que ocurría en las figuras anteriores se puede comprobar como en el escalón previo a la rotura la porosidad crece de forma acelerada.

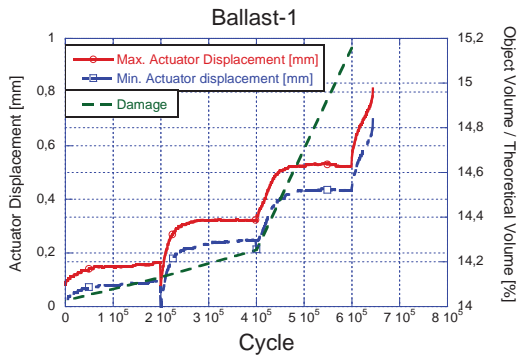


Figura 16. Evolución de la porosidad de la probeta Balasto-1

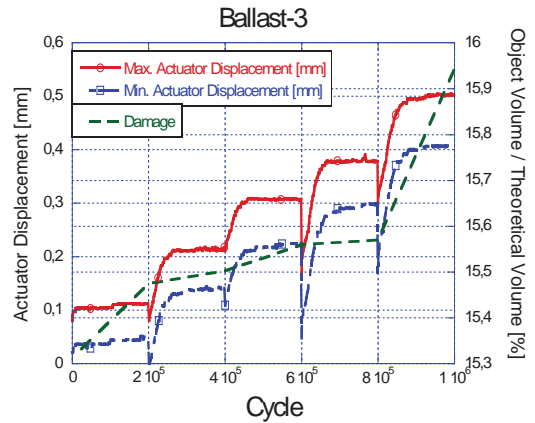


Figura 17. Evolución de la porosidad de la probeta Balasto-3

En la figura 18 se puede apreciar la evolución de una misma sección al terminar cada escalón.

5. CONCLUSIONES

Tras este estudio se concluye que la Tomografía Axial Computarizada resulta sumamente útil tanto para el análisis del daño sufrido por una muestra debido a fatiga, tanto como para explicar fluctuaciones en los resultados producto de la presencia de defectos internos de las muestras.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida para la realización de este trabajo al Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad en el marco del acuerdo de subvención MAT2014-57544-R, financiado por el Gobierno de España, Ministerio de Economía y Competitividad.

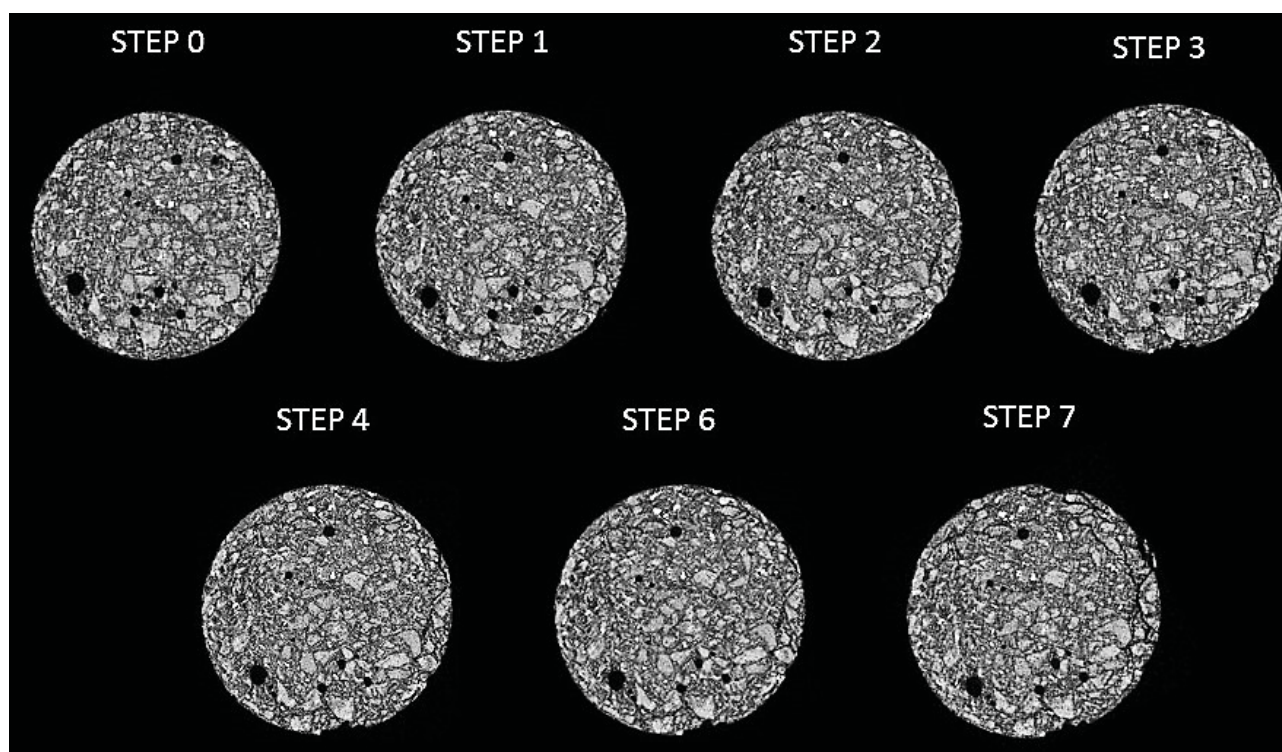


Figura 18. Evolución de una sección al terminar cada escalon

REFERENCIAS

- [1] C. Esveld, Recent developments in slab track application, Rail Tech Europe.
- [2] S. Tayabji, D. Bilow, Concrete slab track state of the practice, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1742, 87-96, 2001.
- [3] C.J. Zega, Y.A. Villagrán-Zaccardi, A.A. Di Maio, Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 43, 195-202, .
- [4] M. Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Fomento, Madrid, España.
- [5] CEDEX, "Catalogo de residuos de construcción y demolición,".
- [6] L. Locati, Programmed fatigue test, variable amplitude rotat, Metallurgia Italiana 44, 135-144, .
- [7] L. Locati, "La fatica dei materiali metallici," 1950.
- [8] C. Thomas, I. Sosa, J. Setién, J.A. Polanco, A.I. Cimentada, Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete, Journal of Cleaner Production 65, 397-405, .
- [9] R.A. Dueñas Naranjo, Elementos de ayuda para la toma de decisiones sobre la utilización de vías sin basalto, .
- [10] AENOR, UNE-EN 993-1:1996. Métodos de ensayo para productos refractarios conformados densos. Parte 1: Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total.
- [11] AENOR, UNE-EN 1097-3:1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.
- [12] AENOR, UNE-EN 1097-6:2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.
- [13] AENOR, UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
- [14] AENOR, UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- [15] A. Wohler, Wohler's Experiments on the Strength of Metals, Engineering 4, 160-161, .
- [16] AENOR, UNE-EN 14587-1. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Soldeo de carriles a tope por chispa. Parte 1: Carriles nuevos de grado R220, R260, R260Mn y R350HT en una instalación fija, .