

La tomografía computerizada más allá de la medicina: Aplicaciones al estudio microestructural del hormigón y otros materiales de la ingeniería

Computed tomography beyond medicine: Applications to the microstructural study of concrete and other engineering materials

Álvaro Mena^{a,*}, Dorys C. González^a, Jesús Mínguez^a y Miguel A. Vicente^a

^a Universidad de Burgos, Dpto. de Ingeniería Civil, C/ Villadiego s/n, 09001 Burgos, España

Recibido el 7 de mayo de 2020; aceptado el 10 de septiembre de 2020

RESUMEN

La tomografía computerizada (TC) es una tecnología muy potente para el estudio de la microestructura de los materiales, lo que se refleja en la gran cantidad de trabajos publicados durante los últimos años. Más allá de su conocido uso en medicina, la TC se ha extendido a otros muchos campos científicos. En este trabajo se recogen algunos de ellos, con especial interés en el estudio del hormigón. Entre sus aplicaciones más relevantes destaca su uso en paleontología y patrimonio para analizar el interior de fósiles y restos arqueológicos sin dañarlos. Por otro lado, también se emplea con frecuencia en el estudio de materiales de la ingeniería, como los metales, los materiales compuestos, las mezclas bituminosas de los firmes, las rocas y el hormigón. En todos los casos, los datos obtenidos por los escáneres de TC se usan para mejorar el conocimiento de la respuesta macroscópica de dichos materiales frente a todo tipo de acciones, mecánicas o ambientales. En el caso particular del hormigón, entre sus aplicaciones principales se encuentran la del análisis de la matriz interna, el estudio de los patrones de fisuración y finalmente el estudio del hormigón reforzado con fibras.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Tomografía computerizada, metales, materiales compuestos, mezclas bituminosas, rocas, hormigón.

ABSTRACT

Computed tomography (CT) scanning is a very powerful technology for microstructural study of materials, as can be checked in the huge amount of papers published in recent years. Beyond its well-known use in medicine, CT scanning has spread to many other scientific fields. Some of them are revised in this work, with particular interest in concrete technology. Among its most relevant applications its use in paleontology and heritage to analyze the internal structure of fossils and relics without any damage can be highlighted. On the other side, it is also very used in the study of engineering materials, such as metals, composites, asphalt mixtures in pavements, rocks and concrete. In all cases, the data obtained by means of CT-scans is applied to improve the knowledge about the macroscopic response of those materials under any kind of loads, both mechanical and environmental ones. In the specific case of concrete, among its principal applications the analysis of internal matrix can be noticed, as well as the study of crack patterns and finally the study of fiber-reinforced concrete.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Computed tomography, metals, composites, asphalt mixtures, rocks, concrete.

1. INTRODUCCIÓN A LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA

El escaneo por tomografía computerizada es una tecnología no destructiva que permite caracterizar la estructura interna

de la materia a escala microscópica. Este método se basa en la atenuación o pérdida de energía que experimentan los rayos X al atravesar la materia, la cual está gobernada por la ley de Beer-Lambert (Ec. (1)).

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: amena@ubu.es (Álvaro Mena).

$$I = I_0 \exp \left[-\int \mu(s) ds \right] \quad (1)$$

Donde I es la intensidad final del rayo X, I_0 es la intensidad incidente y $\mu(s)$ es el coeficiente de atenuación lineal a lo largo de su recorrido. Este último parámetro depende básicamente de la densidad ρ de la materia que atraviesa el rayo X durante dicho recorrido. Se comprueba que el ratio μ/ρ es aproximadamente proporcional a Z^3 , donde Z es el número atómico del elemento.

Por lo tanto, el principio básico de funcionamiento de la TC es la relación directa existente entre la atenuación energética de los rayos X y la densidad de la materia que atraviesan. Un escáner de TC está formado por dos elementos básicos: una fuente de rayos X de intensidad regulable y un detector de intensidad. La muestra se coloca entre ambos y durante el proceso de escaneo es atravesada por haces de rayos X en diferentes direcciones y a diferentes cotas. El escáner mide la intensidad inicial y final de todos los rayos X, por lo que finalmente se determina la densidad en todos los puntos de la muestra.

Evidentemente, si el escáner de TC solo es capaz de emitir un rayo X en cada instante, el proceso de escaneo es demasiado largo. En consecuencia, se han desarrollado diferentes soluciones técnicas para la emisión de múltiples haces de rayos X. La solución convencional consiste en una fuente que emite un haz lineal de rayos X que es recibido por un detector lineal. Durante el escaneo ambos elementos permanecen fijos, mientras que la muestra rota, se eleva o desciende hasta que se analizan todas las áreas de estudio. Sin embargo, el proceso de escaneo sigue siendo lento y la precisión no es buena debido a las limitaciones mecánicas de los componentes que mueven las muestras. Una solución más eficiente es la de escáneres equipados con fuentes que emiten haces cónicos de rayos X, los cuales son recibidos por un conjunto de detectores. De esta forma se logra aumentar la zona de escaneo en cada instante, por lo que la duración total del proceso se reduce mucho. Además, se obtiene buena resolución en las tres direcciones del espacio, ya que los movimientos relativos entre el dispositivo emisor-detector y la muestra son menores. Esta tipología de escáneres se desarrolló en la década de 1980 [1], aunque no se implantó hasta el comienzo de los 2000.

El resultado práctico de un escaneo por TC es un conjunto de imágenes o *stack* en el que cada imagen representa un corte seccional de la muestra a una cota determinada. Los programas de procesamiento digital de imágenes permiten agrupar todas las imágenes del *stack*, generando una imagen espacial. La resolución de una imagen tridimensional viene determinada por las dimensiones de los vóxeles. Un vóxel no es más que un píxel en el espacio en el que la resolución en las direcciones X e Y viene dada por las imágenes del *stack* y la resolución en Z por la separación entre imágenes consecutivas. Además, a cada vóxel le corresponde un valor de gris (en un rango desde 0 a 65535, en el caso de imágenes de 16 bits) que está asociado a la densidad media del vóxel. Los tonos de gris más claros se corresponden con densidades altas, mientras que los tonos de gris más oscuro indican densidades bajas.

Por otra parte, la TC tiene una serie de limitaciones que es conveniente señalar. En primer lugar, el tamaño de muestra está acotado, ya que el haz de rayos X debe mantener una energía mínima tras haberse atenuado durante su paso a través

del objeto. Si la muestra tiene demasiado espesor, absorberá mucha energía, resultando un flujo de rayos X tenue y una calidad de imagen pobre. En general, los tamaños máximos de muestra oscilan entre unos 15-20 cm para los escáneres micro-CT de alta resolución y los 30-40 cm en los escáneres de alta energía con tubos de rayos X de 300-400 kV. Por lo tanto, a la hora de estudiar macizos rocosos o elementos de hormigón de gran tamaño, siempre se tendrá que recurrir a testigos y luego realizar extrapolaciones. En segundo lugar, la resolución máxima también está limitada y es función del tamaño de la muestra y del tipo de escáner empleado. Habitualmente, los escáneres micro-CT de alta resolución pueden llegar a conseguir resoluciones en muestras pequeñas del orden de 1 μm , mientras que en el caso de los equipos convencionales se tienen 30-40 μm . En consecuencia, cuando se analice la microestructura de hormigones, metales y/o materiales compuestos habrá que tener en cuenta cuál será el tamaño máximo de defecto (poros, fisuras, etc.) que se podrá detectar. Finalmente, como ya se ha mencionado, el principio de funcionamiento de la TC se basa en la diferente densidad de los materiales que atraviesa el haz de rayos. Por tanto, cuanto más cercanas sean las densidades de los materiales de una muestra, más difícil será diferenciarlos para el escáner. Esto no suele ser preocupante en el estudio del hormigón, ya que sus componentes tienen densidades muy diferentes (matriz de hormigón, poros y fisuras de aire, fibras o barras de acero, etc.). No obstante, sí que puede suponer un problema en el análisis de materiales compuestos formados por plásticos de densidad similar, por ejemplo. En estos casos, algunas alternativas son tratar de mejorar la resolución (bien con un tamaño de muestra menor, bien con un escáner más potente) o añadir algún aditivo que reaccione solo con uno de los componentes, cambiando su densidad (esto es más común en el campo de la biología).

Como es de sobra conocido, la TC está estrechamente relacionada con la medicina. De hecho, esta tecnología se aplicó por primera vez en este campo en los años 70 [2] como una técnica no invasiva para visualizar partes internas del cuerpo (órganos, tejidos, huesos, etc.) y detectar patologías. Desde entonces y sobre todo a partir de los años 80, su uso se ha ido extendiendo a otros campos de la ciencia e ingeniería. En este punto conviene subrayar que existen diferencias significativas entre un escáner de TC para tratamiento médico y otro para investigación científica e industrial. La más relevante es que, mientras que en medicina se emplean fuentes de baja intensidad para no dañar el tejido humano, en objetos inertes se pueden utilizar rayos X de alta intensidad, obteniendo imágenes de alta resolución.

En las últimas décadas, el uso del escaneo por TC se ha extendido a muchos campos científicos, especialmente a aquellos que analizan la microestructura de materiales o elementos, sus propiedades mecánicas y/o la respuesta macroscópica. En la figura 1 se muestra la evolución de los artículos científicos publicados entre los años 1990 y 2019 en los campos más relevantes que aplican la TC. Todos los datos se han obtenido de *WoS (Web of Science)* [3], una base de datos bibliográfica ampliamente utilizada y que recoge las revistas internacionales más influyentes en todos los campos de la ciencia y la tecnología.

En la figura 1 se observa un claro incremento del número de publicaciones con el tiempo en todos los campos analizados.

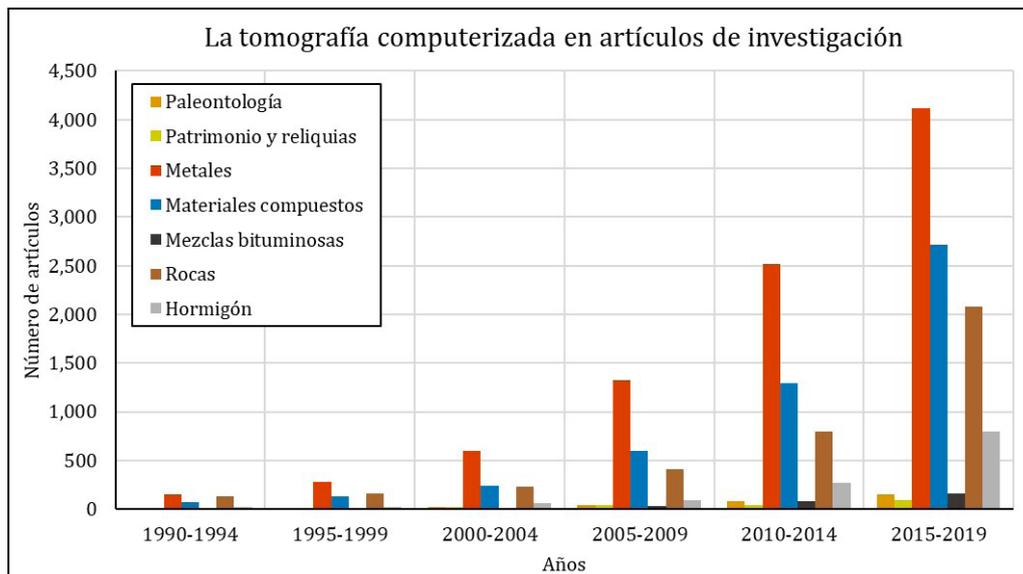


Figura 1. Evolución en el número de publicaciones científicas relacionadas con la tomografía computerizada.

Además, en la mayoría de ellos la tendencia es exponencial, observándose un claro aumento desde la década de los 2000, momento en el que comenzaron a implantarse los escáneres de haces cónicos de rayos X. De acuerdo con los datos recabados, los campos científicos que más utilizan las técnicas de TC son aquellos que estudian los metales, los materiales compuestos, las rocas y el hormigón. Por el contrario, su uso es menos relevante en el resto de campos analizados.

El objeto de este artículo es realizar una síntesis del estado del arte de la TC aplicada a la ciencia más allá de su uso conocido en medicina. Por tanto, se recogen los trabajos más relevantes de varios campos que utilizan esta tecnología para el estudio de la microestructura de los materiales, con particular interés en el caso del hormigón.

Este documento se estructura como sigue: en las secciones 2 y 3 se examinan las aplicaciones de la TC en paleontología y en el estudio del patrimonio, respectivamente. Después, en las secciones 4 y 5 se destacan los aspectos más relevantes de su uso en metales y materiales compuestos, respectivamente. A continuación, el empleo de la TC en algunos campos de la ingeniería civil, como firmes, rocas y hormigón, se muestra en las secciones 6, 7 y 8, respectivamente. Por último, en la sección 9 se recogen las conclusiones principales.

2. LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN PALEONTOLOGÍA

El empleo de la tomografía computerizada en este campo se inició pronto. Uno de los primeros trabajos data de 1979 y fue desarrollado por Jungers [4]. Este investigador aplicó la tecnología para comparar fósiles de huesos de diferentes especies de primates. En el artículo ya se destacan algunas de las ventajas de la TC, capaz de identificar tejidos de densidad similar o analizar fósiles con excesiva mineralización.

Sin embargo, en esta primera etapa se empleaban escáneres de TC procedentes de medicina que no eran lo suficientemente potentes como para distinguir con suficiente nitidez la estructura interna de los fósiles. Esto es debido a su mayor densidad en comparación con el tejido humano. Por lo tanto, rápidamente se aplicaron nuevas técnicas de análisis y se desarrollaron nuevas generaciones de escáneres de TC capaces de solventar este problema.

Pese a que hoy en día la TC no es tan popular como lo fue en sus orígenes, continúa siendo la tecnología base en muchas investigaciones [5–8]. La mayoría de estos trabajos se enmarca en la paleobiología, y en concreto en el estudio de fósiles. El proceso de fosilización de un organismo tiene lugar a lo largo de miles de años durante los que se produce la mineralización de la materia orgánica. Lo más habitual es que los tejidos blandos se descompongan, mientras que los esqueletos permanecen prácticamente inalterados debido a su mayor contenido de minerales. El resultado son muestras únicas y sumamente frágiles cuyo valor científico en algunos casos es enorme.

En este contexto, la TC es una herramienta muy útil, ya que produce imágenes seccionales de gran nitidez y con un programa de procesamiento digital de imágenes genera reconstrucciones virtuales de las muestras (figura 2). De esta forma, se reduce la manipulación de los fósiles y por tanto los riesgos de deterioro y rotura asociados. De hecho, hasta cabe la posibilidad de fabricar réplicas utilizando las modernas impresoras 3D [5].

Además, en ocasiones el estudio de las muestras con TC es mejor del que se puede conseguir a simple vista. Por un lado, cuando es físicamente imposible retirar los sedimentos adheridos a un fósil sin romperlo, se puede realizar una “limpieza” virtual de la muestra [6]. Por otro lado, cuando se tienen fragmentos de esqueleto pertenecientes a un mismo organismo, se pueden realizar reconstrucciones 3D completas, conectando los huesos e incluso simulando los movimientos [7].

Otras aplicaciones de la TC a la paleontología son la detección de malformaciones esqueléticas y espinales, y la identificación de la historia dental.

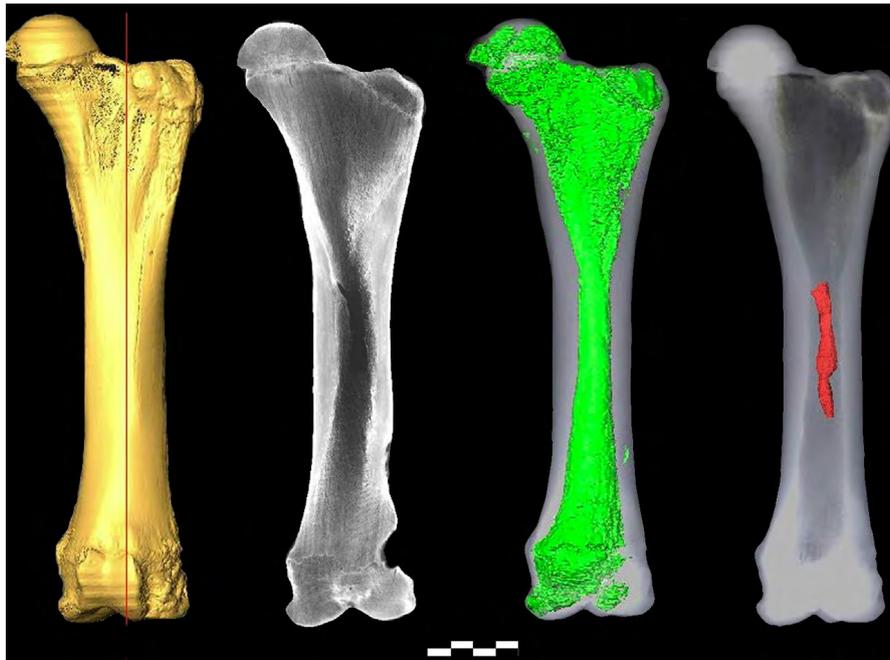


Figura 2. Fémur izquierdo de un ejemplar adulto de *Palaeoloxodon antiquus*, una especie extinta de elefante que habitó en el Pleistoceno. De izquierda a derecha, modelo tridimensional generado a partir del escáner de TC, imagen de la sección transversal, segmentación de los diferentes tejidos (verde) y segmentación de la cavidad medular (rojo) [8].

3. LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN ARQUEOLOGÍA Y PATRIMONIO

Los hallazgos arqueológicos y otros objetos pertenecientes al patrimonio cultural comparten ciertas similitudes con los fósiles. En ambos casos, se trata de muestras únicas y de valor singular, por lo que deben ser manipuladas con sumo cuidado. Además, las condiciones en las que se extraen de los yacimientos no suelen ser las óptimas y normalmente están cubiertas por capas duras de sedimento muy difíciles de retirar sin dañarlas.

La aplicación de las técnicas de tomografía computerizada en este campo se inició a mediados de los años 80. Uno de los primeros trabajos fue desarrollado en 1986 por Notman [9]. En este artículo se mencionan las ventajas de la TC frente a la resonancia magnética en el análisis de momias egipcias, proponiéndose como método no destructivo preferente. El empleo de estas técnicas para el estudio de momias y otros restos humanos antiguos ha continuado hasta la actualidad. En esta línea, se destacan trabajos sobre la detección de patologías en momias egipcias o el análisis del estado de reliquias de mártires religiosos.

Otra de las aplicaciones de la TC en este campo es el estudio de objetos arqueológicos. En ocasiones, el propósito principal es la reconstrucción virtual del hallazgo, particularmente cuando está roto en diferentes partes o se desea conocer la estructura interna de los materiales. En otros casos, cuando se trata de artefactos, la TC se emplea para comprender el proceso de fabricación o el mecanismo de funcionamiento (figura 3). En los últimos años se han realizado trabajos de investigación bastante interesantes sobre estas cuestiones [10–12]. Además, aunque en la actualidad esta tecnología no es demasiado popular en este campo, existen algunos trabajos que han tenido un gran impacto en los medios, como el del Mecanismo de Anticitera [12].

En todos los casos, el procedimiento que se sigue es similar. En primer lugar, se escanean las piezas completas o todos los fragmentos si la pieza está fracturada o incompleta. A continuación, mediante un programa de procesamiento digital de imágenes se realiza una reconstrucción virtual y se eliminan los elementos no deseados (sedimentos rocosos, etc.). De forma complementaria, se puede reproducir una o varias réplicas con impresión 3D, mientras que el original se preserva del deterioro. Asimismo, los museos pueden almacenar los originales por seguridad, exhibiendo solo las réplicas.

4. LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN METALES

Los metales son materiales ampliamente utilizados en todos los campos de las ingenierías civil e industrial. En el mercado actual existe una amplia gama de metales y aleaciones, cada uno diseñado con propiedades específicas dependiendo de su uso: peso, resistencia, ductilidad, tenacidad, absorción energética, conductividad eléctrica, transmisividad térmica, resistencia a la abrasión, dureza, resistencia a la corrosión y porosidad, entre otras. Además, los procesos de fabricación también son muy variados, desde los más convencionales de fundición y moldeo hasta los procedimientos más modernos, como el estampado, la inyección y la fabricación aditiva. Por tanto, esta heterogeneidad implícita en los metales, tanto en productos como en procesos, constituye un terreno perfecto para la aplicación de la tomografía computerizada.

Los primeros trabajos de investigación que utilizan la TC para el estudio de metales y aleaciones son muy tempranos, surgiendo a partir de los desarrollos en aplicaciones médicas.

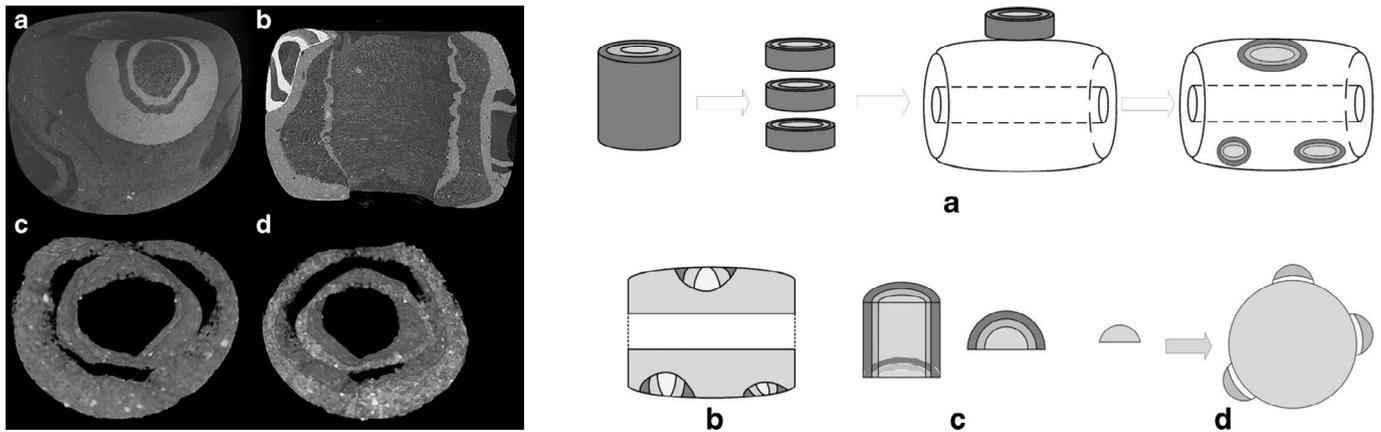


Figura 3. Imágenes seccionales de cuentas de vidrio halladas a lo largo de la antigua Ruta de la Seda, en la región autónoma de Xinjiang Uygur (China) (izquierda), y análisis del proceso de fabricación artesanal (derecha) [10].

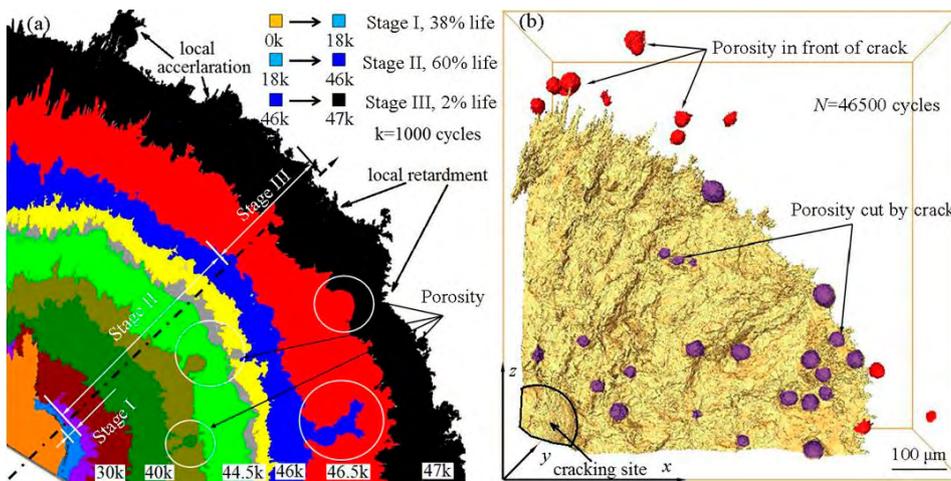


Figura 4. Análisis de la propagación de la fisuración por fatiga en una muestra de aleación de aluminio AA7020-T651 soldada con láser híbrido: (a) avance del frente de fisura indicado en diferentes colores, (b) renderizado 3D de la fisura de fatiga a partir de las imágenes del escáner de TC [29].

En concreto, cabe destacar el trabajo de Hildebrand y Harrington en 1981 [13], que pone de manifiesto el potencial de la TC para la localización y mapeo de tensiones residuales en metales. Con el tiempo, el empleo de esta tecnología en la metalurgia se ha afianzado y hoy en día es muy habitual.

Una de las aplicaciones de la TC es el estudio de defectos durante el proceso de fabricación de un producto. Se trata de un uso propio de sectores que desarrollan componentes de alto valor añadido (aeronáutico, aeroespacial, automovilístico y bioingeniería, entre otros) en los que una mejora innovadora en el control de calidad o en la cadena de montaje puede suponer ahorros millonarios. En este sentido, se han realizado algunos proyectos que estudian los defectos más comunes, como los poros, las tensiones residuales o las fisuras [14–17].

Además, mencionan aparte merecen las técnicas de fabricación aditiva, que en la actualidad están revolucionando los procesos de fabricación de elementos metálicos. En concreto, una de las tecnologías más utilizadas es la fusión selectiva por láser (SLM, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite crear objetos a partir de capas delgadas de material pulverizado que se funde selectivamente con un láser de alta potencia. Las posibilidades de diseño son prácticamente ilimitadas, lo que explica su gran popularidad. En los últimos años, se han desarrollado muchos trabajos de investigación que utilizan la TC para de-

teccionar la porosidad, analizar las tensiones residuales, estudiar las propiedades mecánicas de una pieza fabricada según distintas orientaciones, etc. [18–23].

Otra línea de investigación frecuente es la combinación de las técnicas de TC y las pruebas mecánicas para establecer correlaciones entre la microestructura interna de un material y su respuesta macroscópica [16,22,24]. El objetivo último que se persigue es optimizar el control de calidad sustituyendo los ensayos mecánicos por el escaneo con TC, más barato y fácil de implementar en el proceso de producción. Además, la información proporcionada por el escáner de TC puede servir de base para el desarrollo de modelos predictivos de elementos finitos, los cuales se pueden calibrar con los resultados de las pruebas mecánicas [17,25]. La ventaja de la TC es que permite crear modelos numéricos exactos, aportando la ubicación exacta de todas las fases y defectos (poros, fisuras, etc.) que forman la muestra. Por último, otras aplicaciones de la TC en esta línea de investigación es el análisis de la influencia de la microestructura interna de los metales en la mecánica de fractura y en su comportamiento bajo cargas de fatiga [18,24–27] (figura 4).

Finalmente, también es necesario mencionar las posibilidades que ofrece la TC para el estudio de las uniones soldadas [14,28]. La soldadura es el procedimiento más utilizado para conectar dos piezas metálicas. Por lo tanto, es necesario tener

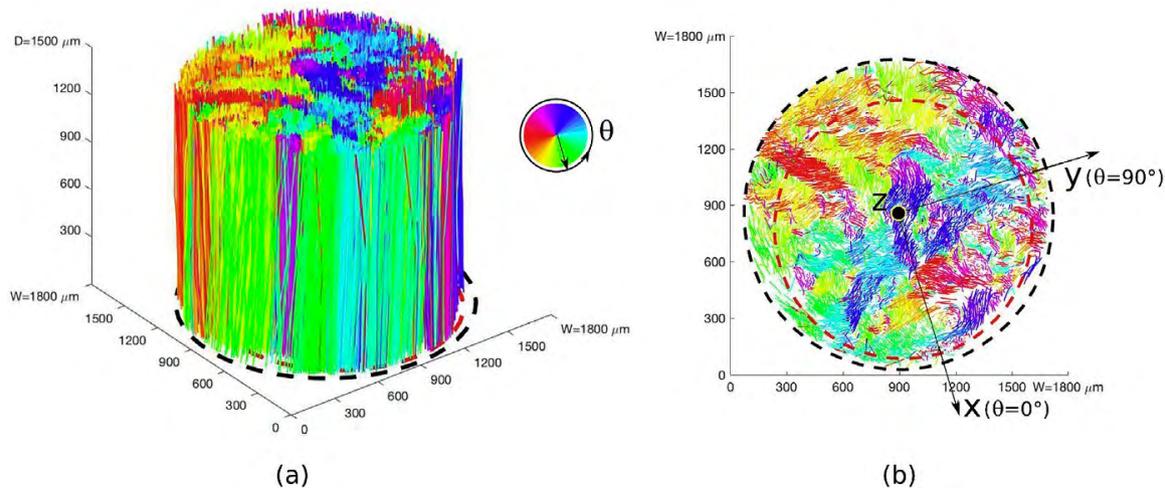


Figura 5. Estudio de la orientación de las fibras de un polímero reforzado con fibras de vidrio: (a) vista lateral tridimensional obtenida a partir de TC, donde el color de cada fibra está asociado al azimut θ de su dirección, (b) vista de una sección transversal [38].

un control adecuado de su calidad. En este sentido, las técnicas de TC permiten el estudio de su microestructura y la evaluación de sus defectos, contribuyendo a una mejora del proceso.

5. LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se utilizan en la actualidad en muchos campos de la ingeniería. Generalmente, están formados por una matriz polimérica o metálica y un refuerzo de fibras u otro tipo de elementos similares. Las fibras (de vidrio, carbono o acero, entre otros) aportan resistencia y rigidez, mientras que la matriz las protege y transfiere las cargas aplicadas. De esta forma, la matriz y el refuerzo componen un material con unas propiedades mecánicas imposibles de conseguir por separado. Además, debido a la extensa gama de polímeros, metales y fibras existente en el mercado, es habitual que los materiales compuestos se diseñen para un uso particular, como añadir resistencia, eficiencia o durabilidad.

Como en el caso de los metales, la aplicación de las técnicas de tomografía computerizada al estudio de los materiales compuestos comenzó en etapas tempranas. Uno de los primeros trabajos desarrollados específicamente para la industria fue el de Moore en 1983 [30], que utilizó un escáner de TC para analizar muestras de carbono reforzado con fibra de carbono (CRFC, por sus siglas en inglés). Desde entonces, su uso ha ido en aumento y hoy en día es una tecnología de probada eficacia para el análisis de cualquier tipo de material compuesto.

Por otra parte, el proceso de fabricación de los materiales compuestos es bastante complejo, debido entre otros factores a la gran heterogeneidad de su composición y a la necesidad de conseguir una correcta disposición del refuerzo. En este contexto, la TC es una herramienta que ayuda a optimizar los controles de calidad. En los últimos años se han publicado trabajos de investigación que analizan los poros y las fisuras pro-

ducidos durante la fabricación [31–35], así como la eficiencia que se consigue en la orientación de las fibras [36,37] (figura 5). Además, en algunos casos se combina el escaneo por TC con las pruebas de caracterización mecánicas y térmicas, de forma que se establecen correlaciones empíricas entre la microestructura del material compuesto y su respuesta macroscópica [31,33,34].

Asimismo, en los últimos años existe cierto interés científico en el análisis de las variaciones que sufre la microestructura (reorientación de las fibras, etc.) y los mecanismos de daño (mecánica de fractura, propagación de fisuración por fatiga, etc.) de materiales compuestos sometidos a todo tipo de acciones mecánicas y/o ambientales [38–41].

Por último, al igual que en el caso de los metales cabe destacar la posibilidad de generar modelos de elementos finitos a partir de los datos proporcionados por el escáner de TC. Por lo tanto, se pueden realizar simulaciones numéricas de cualquier elemento para su posterior comparación y ajuste con los datos experimentales [42,43].

6. LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN FIRMES

Los firmes de carretera se clasifican típicamente en rígidos, formados por pavimento de hormigón, y flexibles, constituidos por pavimento bituminoso. En España se utilizan preferentemente estos últimos, aunque ambas soluciones pueden ser correctas en función de los criterios de diseño. Entre las ventajas de los firmes flexibles destacan la mayor comodidad en la conducción, la mayor facilidad para conseguir las propiedades adecuadas de rozamiento, la menor contaminación acústica y, por último, el menor coste de construcción.

Los firmes flexibles están formados por mezclas bituminosas que son el resultado de la combinación de áridos, filler y un ligante hidrocarbonado (generalmente betún). Se trata de una especie de “material compuesto”, ya que el árido grueso

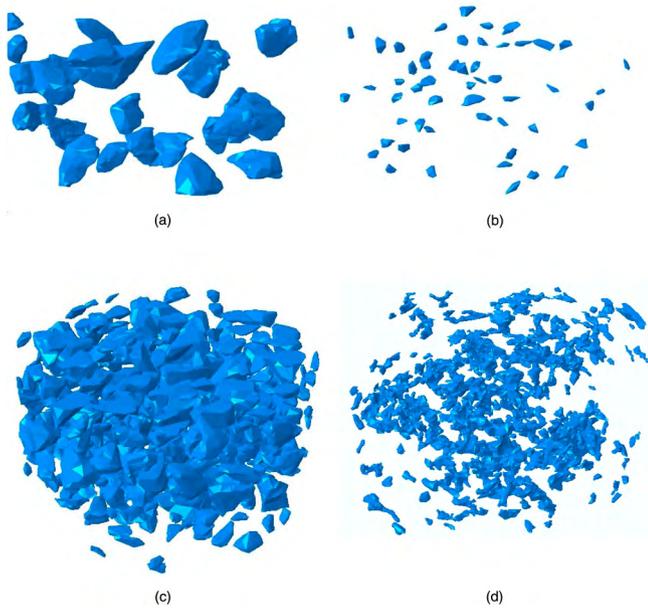


Figura 6. Segmentación de todas las fases que componen una mezcla bituminosa mediante TC: (a) selección del árido grueso, (b) selección del árido fino, (c) árido total, (d) poros [50].

forma el esqueleto resistente, mientras que el sistema filler-betún aporta la cohesión necesaria al conjunto. No obstante, dada su heterogeneidad, pequeñas variaciones en la forma y distribución de los áridos, el contenido de betún y/o la porosidad, provocan cambios significativos en las propiedades mecánicas de estos materiales. Por tanto, resulta de interés la aplicación de la tomografía computerizada para el estudio de la microestructura de las mezclas bituminosas.

El uso de la TC para el estudio de mezclas bituminosas es relativamente reciente. No obstante, en la actualidad el empleo de esta tecnología está bastante extendido y suscita un importante interés, lo que se refleja en una producción científica creciente durante los últimos años. Los primeros resultados relevantes se publicaron hace alrededor de 20 años por Masad [44], centrándose en el estudio de la porosidad.

Como es evidente, el análisis de la microestructura es una de las líneas de investigación principales. En este caso, la TC tiene su aplicación cuando se busca conocer la permeabilidad de las mezclas bituminosas, o bien determinar la influencia de los materiales o las condiciones de mezclado sobre la microestructura final [45–47] (figura 6). Además, como se ha visto en los metales y los materiales compuestos, también es posible generar modelos de elementos finitos con los datos aportados por el escáner de TC. En este sentido, existen algunos trabajos que desarrollan modelos apoyándose en resultados experimentales, de forma que son capaces de simular el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a las cargas de fatiga producidas por el tráfico [48–50].

Por otro lado, durante los últimos años existe un importante interés científico en la capacidad auto-reparadora de las mezclas bituminosas, así como de las técnicas para inducirla (inducción, radiación por microondas o micro-cápsulas, entre otros). En este entorno, la TC es una herramienta indispensable, ya que permite evaluar la evolución en el cierre de las

fisuras, la influencia del tipo de árido sobre la capacidad auto-reparadora, etc. [51–53].

Finalmente, aunque en menor medida, también se aplica la TC para el análisis de firmes rígidos de hormigón, centrándose en estudios de permeabilidad o de fisuración [54,55].

7.

LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN ROCAS

Al igual que ocurre en el caso de los materiales compuestos y las mezclas bituminosas de los firmes, las rocas son materiales con un alto grado de heterogeneidad. En general, cualquier macizo rocoso está constituido por una roca matriz y una serie de defectos que pueden ser microscópicos (poros, fisuras, etc.) o macroscópicos (zonas de debilidad, fallas, diaclasas, etc.). Son precisamente estos defectos internos los que caracterizan la calidad del macizo y por tanto sus propiedades mecánicas y comportamiento estructural real.

En cuanto a su relación con la ingeniería civil, las rocas son el material más importante en un amplio rango de trabajos, particularmente en el caso de los túneles y las presas. En el caso de los túneles, la resistencia de la roca matriz, la permeabilidad y la presencia de discontinuidades en el macizo determinan fuertemente la estabilidad y el nivel de convergencia de los túneles y en consecuencia su procedimiento constructivo. Algo similar ocurre en el caso de las presas, especialmente en las presas arco y bóveda. Los elementos estructurales de este tipo de presas están empotrados en las rocas, por lo que el comportamiento mecánico del macizo condiciona enormemente la seguridad estructural de la presa. Si se producen asientos diferenciales en la zona de apoyo de la presa, el arco puede pasar de su estado natural de compresión total a experimentar flexiones locales. Esto a su vez puede provocar la aparición de fisuración, filtraciones y, en último término, la ruina de la presa. Este es el motivo por el que este tipo de presas se suele ubicar

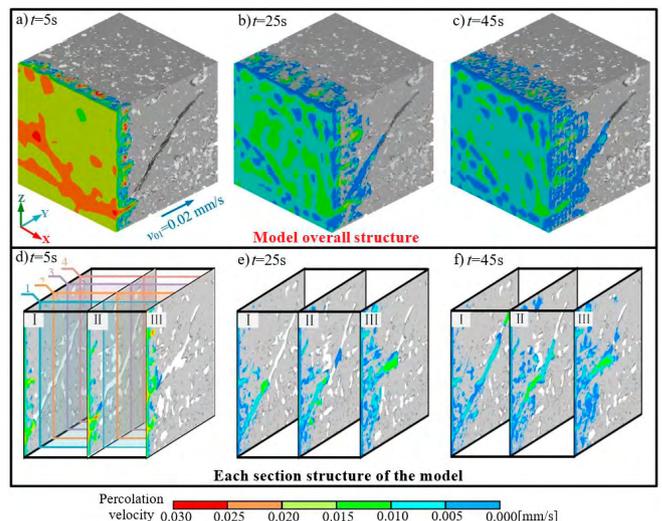


Figura 7. Análisis de la filtración de agua en un modelo de una muestra de carbón generado a partir de las imágenes de TC: (a-c) distribución general de la filtración en diferentes momentos, (d-f) distribución de la filtración en una serie de planos controlados [57].

en las cerradas de valles angostos en zonas de montaña, donde la calidad de los macizos es muy elevada.

La influencia de los defectos sobre el comportamiento macroscópico de las rocas es la razón por la que la tomografía computerizada es una herramienta provechosa en este campo. De hecho, las técnicas de TC comenzaron a emplearse en la investigación de rocas y mineralogía a comienzos de los años 80, siendo uno de los primeros campos de la ingeniería civil en utilizar esta tecnología. Entre los primeros trabajos publicados se encuentra el de Petrovic en 1982 [56], que utilizó un escáner de TC para medir la densidad aparente de rocas. En la actualidad, el uso de esta tecnología es muy intenso y se ha publicado una cantidad considerable de trabajos de investigación sobre rocas tomando como base la TC.

El escaneo por TC conduce a un mejor entendimiento de su comportamiento mecánico. En este sentido, es interesante comparar los datos proporcionados por los escáneres de TC con los resultados de los ensayos habituales para determinar la calidad de un macizo, en los que se miden parámetros como la densidad, la porosidad, la velocidad sónica, la resistencia o la durabilidad. Además, una de las líneas de investigación más interesantes es la que estudia la permeabilidad y su influencia en la degradación de las rocas. Los defectos de los macizos rocosos, y en particular las fisuras, son una de las vías preferentes para la aparición de filtraciones y flujos permanentes de agua, que con el paso del tiempo pueden dañar aún más el macizo. Este aspecto es de interés en la minería del carbón, lo que se demuestra en los numerosos trabajos publicados en los últimos años [57,58] (figura 7).

Otra de las aplicaciones es el análisis y la caracterización de los daños producidos por las acciones ambientales. En concreto, existen numerosas publicaciones que evalúan las variaciones en la microestructura de las rocas como consecuencia de los ciclos hielo-deshielo [59] y los efectos térmicos [60]. Además, recientemente se han desarrollado proyectos que evalúan la interacción de las rocas empleadas en construcción con los gases contaminantes de la atmósfera [61]. Este tema es interesante para el diseño del mantenimiento de edificios históricos, como las catedrales.

Otra línea de investigación en la que la TC tiene potencial de aplicación es el estudio de la mecánica de fractura de las rocas. Por un lado, se trata de un campo relacionado con la minería, con el fin de tener un mejor control de la fisuración inducida [62]. En estos casos, el escaneo por TC puede ayudar a generar modelos de predicción de propagación de fisuras, de forma que las explotaciones sean capaces de producir bloques del tamaño óptimo, con el consiguiente ahorro en costes. Por otro lado, este tema también está ligado con la fractura hidráulica (o *fracking*). En los últimos años, se han publicado diversos estudios que usan la TC para explorar la microestructura interna de todas las fases del macizo rocoso (sólida, líquida y gaseosa), así como su evolución a lo largo del tiempo [63].

En la actualidad existen algunas líneas de investigación novedosas que aplican la TC para el estudio de las rocas. Una de ellas es la generación de modelos para simular el comportamiento de los macizos bajo diferentes acciones o analizar los flujos de agua en su interior [57]. Por otro lado, existen algunos trabajos recientes que combinan el escaneo por TC y la impresión 3D para analizar la microestructura de las rocas [62].

8.

LA TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA EN HORMIGÓN

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Entre sus ventajas más importantes destacan su bajo coste, una tecnología de producción globalmente accesible, su facilidad de adaptación a cualquier geometría y su durabilidad. No obstante, igualmente tiene desventajas bien conocidas, como su baja resistencia a tracción (en el caso del hormigón en masa), la reducida precisión dimensional de los elementos y la gran dispersión de sus propiedades mecánicas. Este último inconveniente es el que más interés tiene desde el punto de vista de la aplicación de la tomografía computerizada.

El comportamiento macroscópico del hormigón depende en buena medida de su microestructura. Sin embargo, el control de la matriz interna del hormigón es bastante complicado, ya que se trata de un material heterogéneo por naturaleza. La TC encaja perfectamente en este entorno, permitiendo analizar todas las fases presentes en su microestructura interna: áridos, cemento, agua, poros, fisuras y en algunos casos, fibras.

Las primeras investigaciones que aplicaron las técnicas de TC para estudiar el hormigón son bastante tempranas. Uno de los primeros trabajos es el de Morgan en 1980 [64], en el que ya consiguió analizar poros y fisuras en hormigón con una precisión del entorno del milímetro. En la actualidad, se trata de una tecnología cada vez más extendida, y se han publicado una cantidad notable de artículos que utilizan datos proporcionados por los escáneres de TC.

Existen tres ámbitos de aplicación de la TC al hormigón que merecen ser estudiados por separado: el análisis de la matriz interna (con especial énfasis en la porosidad), el estudio de los patrones de fisuración y el estudio de la microestructura del hormigón reforzado con fibras.

8.1. Aplicaciones al estudio de la matriz interna

Como ya se ha mencionado, la microestructura del hormigón tiene una influencia determinante sobre sus propiedades mecánicas, lo que explica en parte la dispersión que presentan. Por ello, el estudio de la porosidad interna del hormigón suscita un gran interés científico. En este sentido, la TC en combinación con un programa de procesamiento digital de imágenes, permite obtener los parámetros geométricos de los poros (posición, longitud, superficie, volumen, etc.). Además, estos datos se pueden utilizar para la generación de modelos de elementos finitos que simulen el comportamiento mecánico del hormigón. Existe un buen número de artículos publicados recientemente sobre este tema [65–69].

Otro aspecto de interés es el estudio de la influencia de las diferentes tipologías de aditivos sobre la microestructura final del hormigón. En concreto, en los últimos años se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre los efectos provocados por los polímeros superabsorbentes (SAP, por sus siglas en inglés) [70,71]. Se trata de un novedoso aditivo cuya función es la de mitigar la retracción autógena del hormigón.

Por otra parte, los datos aportados por los escáneres de TC sirven de base para desarrollar estudios estadísticos que en último término permiten establecer correlaciones entre la microestructura del hormigón y su comportamiento macros-

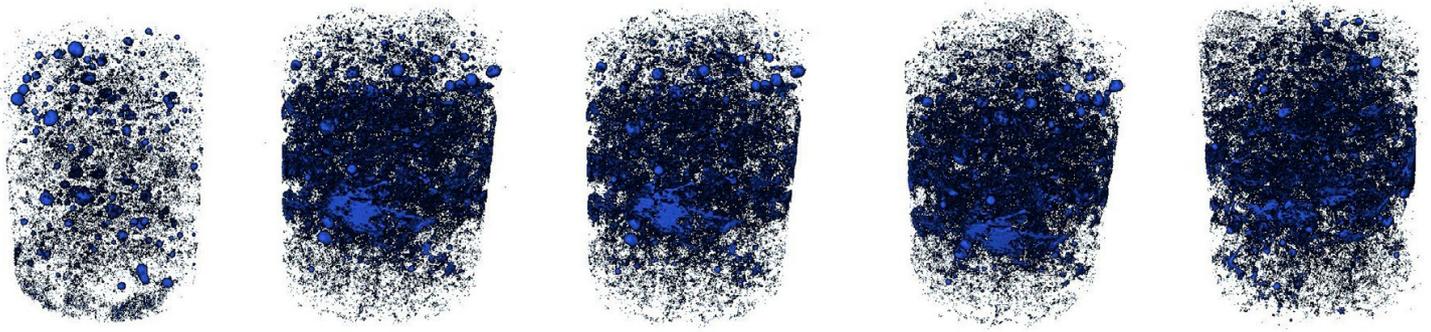


Figura 8. Evolución de la porosidad en una muestra de mortero reforzado con fibras de acero a lo largo del tiempo de curado. De izquierda a derecha: días 1, 2, 3, 4 y 7 tras el hormigonado [75].

cópico. Existen numerosos trabajos de investigación que han estudiado la influencia de la porosidad sobre la durabilidad del hormigón, su respuesta frente a cargas cíclicas de fatiga y su comportamiento frente a ciclos hielo-deshielo [70,72].

Además, el análisis de la matriz interna está relacionado con el estudio de hormigones singulares; en particular, el hormigón permeable [73] y el hormigón fabricado con áridos reciclados [74]. Por último, cabe destacar que los estudios microestructurales no solo ayudan a entender el comportamiento del hormigón endurecido, sino también del hormigón fresco. En este caso, existen diversos trabajos que utilizan la TC para estudiar la evolución de la porosidad con el tiempo de curado del hormigón [71,75] (figura 8).

8.2. Aplicaciones al estudio de los patrones de fisura

Otro campo de aplicación muy interesante del escaneo por TC es el análisis de los patrones de distribución de fisura, dada su estrecha relación con la durabilidad del hormigón. En este sentido, el postprocesado con programas de procesamiento digital de imágenes permite realizar un filtrado de los defectos presentes en el hormigón, descartando los poros y aislando las fisuras. En los últimos años, se han publicado varios artículos

que utilizan la TC para estudiar la mecánica de fractura en el hormigón y otros materiales quasi-frágiles [76,77]. Además, en ocasiones se utilizan los datos de los escáneres para generar modelos predictivos que permiten simular el comportamiento a fractura del hormigón.

El carácter no destructivo de la TC permite que se puedan realizar escaneos en diferentes etapas a lo largo de la vida útil del hormigón. Esto es muy relevante para fenómenos como la fatiga y los ciclos hielo-deshielo, que causan un daño acumulado en el hormigón en forma de microfisuras que progresan hasta el fallo del elemento estructural. Existe un buen número de artículos publicados que evalúan el daño producido por las cargas cíclicas de fatiga [78–80] y los ciclos hielo-deshielo [81–83], así como su evolución en el tiempo. Asimismo, también es interesante la comparación que se hace en algunos de estos trabajos entre los patrones de fisuración en los ensayos cíclicos y los resultados de ensayos estáticos equivalentes [84] (figura 9).

8.3. Aplicaciones al estudio del hormigón reforzado con fibras

En la actualidad, una de las líneas de investigación más activas es la que examina el hormigón reforzado con fibras. La TC es

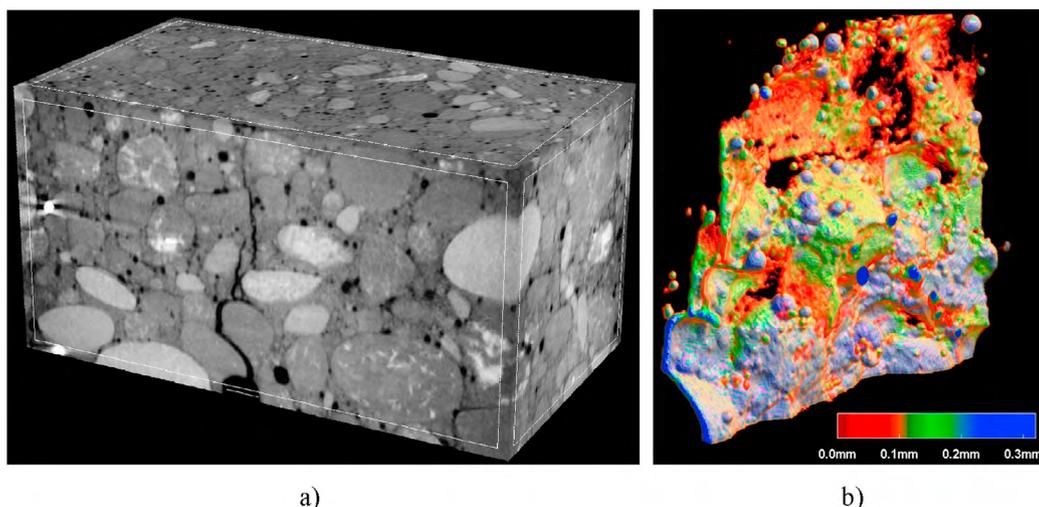


Figura 9. (a) Imagen obtenida a través de un escáner de TC de una muestra de hormigón ensayada a flexión en 3 puntos, (b) segmentación para obtener la macrofisura generada y estudio de la magnitud de su apertura [84].

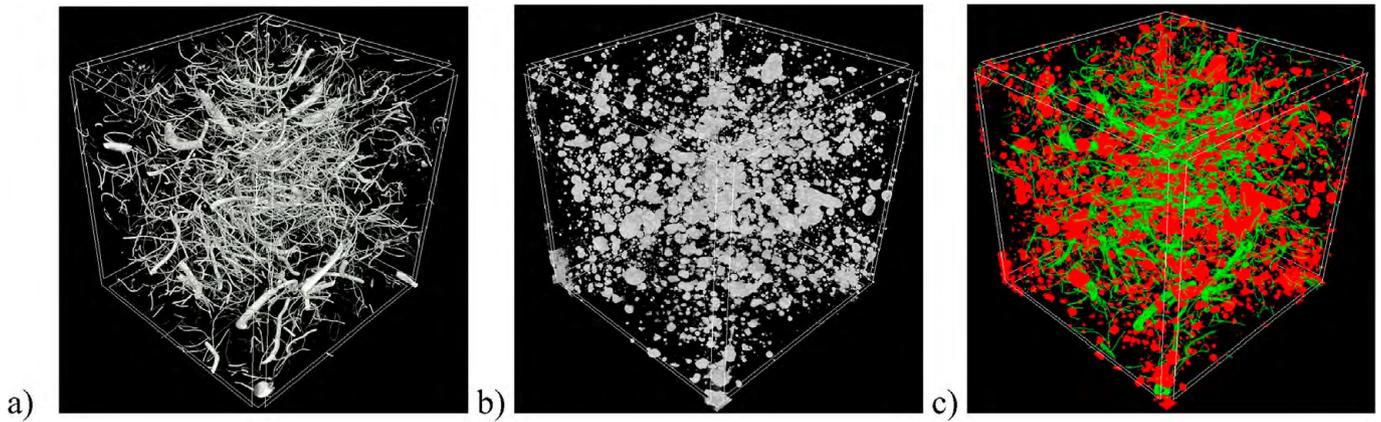


Figura 10. Segmentación de una muestra de hormigón reforzado con fibras de acero reciclado: (a) distribución de las fibras de acero, (b) distribución de los poros, (c) combinación de las fibras (verde) y los poros (rojo) [88].

de gran ayuda en este campo, permitiendo aislar cada fibra y obtener de ella su ubicación, distribución, orientación, etc. Se han publicado varios trabajos que estudian la distribución de diferentes tipos de fibras en el hormigón [78,85]. Además, un caso particular del análisis de la distribución de las fibras es el estudio de su orientación, ya que este parámetro es determinante en la respuesta macroscópica del hormigón. Por ello, también se han realizado diversos proyectos al respecto, incluso evaluando técnicas para inducir el alineamiento de las fibras [86,87].

Al igual que ocurre en el hormigón convencional, el uso de la TC en el hormigón con fibras sirve de base para establecer correlaciones entre la microestructura (en particular, los poros y las fibras) y la respuesta macroscópica. En los últimos años, se han publicado numerosos trabajos que estudian la influencia de la porosidad y las fibras (distribución, orientación, etc.) sobre el comportamiento a fractura [88], la resistencia a fatiga [78] o la ductilidad [87] (figura 10).

Por último, una línea de investigación también presente en los últimos años, aunque menos explotada, es la aplicación de la TC para el estudio de los efectos de las fibras durante el curado del hormigón [75].

9. CONCLUSIONES

La tomografía computerizada es una tecnología con un gran potencial de aplicación en muchos campos de la ciencia y la tecnología, lo que se refleja en una cantidad significativa de artículos científicos publicados en las dos últimas décadas. En particular, en el caso de la ingeniería una de sus utilidades más relevantes es el análisis microestructural de los materiales, que sirve de base a los investigadores para un mejor entendimiento de su respuesta macroscópica.

En este trabajo, se recogen algunos de los campos en los que el empleo de la TC tiene un mayor interés: paleontología, patrimonio, metales, materiales compuestos, firmes, rocas y hormigón. No obstante, existen otras disciplinas en las que se utiliza esta tecnología, así como otras muchas aplicaciones que aún no se han explorado con la suficiente profundidad.

Los datos proporcionados por los escáneres de TC se pueden utilizar a varias escalas. El uso más básico consiste en la interpretación de las imágenes a simple vista sin ninguna clase de post-procesado. Evidentemente, se trata de un empleo muy pobre de esta tecnología que desaprovecha todo su potencial. El siguiente paso consiste en el uso de programas de procesamiento digital de imágenes para extraer los datos más relevantes de las imágenes de TC. De este modo, se puede tener un conocimiento cuantitativo de la microestructura de los materiales. Además, si se realizan estudios estadísticos que combinan los datos del escáner de TC con los de ensayos mecánicos, se pueden llegar a establecer correlaciones entre la microestructura de un material y su respuesta macroscópica. Adicionalmente, es posible tomar la información proporcionada por la TC y exportarla a un programa de elementos finitos. De esta forma, se pueden generar modelos exactos de las muestras, incluyendo todos los defectos con su posición y magnitud real. Por tanto, las simulaciones numéricas llevadas a cabo son mucho más precisas que las realizadas con modelos teóricos ideales, lo que permite ajustar mejor estos últimos.

Es esperable que durante las siguientes décadas los avances tecnológicos traigan consigo escáneres de TC más eficientes, con tiempos de procesado más bajos y resoluciones mayores. En este contexto, los investigadores podrán utilizarlos para tener un mejor conocimiento de la microestructura de los materiales y en consecuencia un mejor entendimiento de su comportamiento.

Financiación: El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, España [proyecto número BIA2015-68678-C2-R].

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- [1] L. A. Feldkamp, L.C. Davis, J.W. Kress, Practical cone-beam algorithm, *J. Opt. Soc. Am. A.* 1 (1984) 612-619. <https://doi.org/10.1364/JOSA.A.1.000612>.
- [2] G.N. Hounsfield, Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system, *Br. J. Radiol.* 46 (1973) 1016-1022. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-46-552-1016>.
- [3] C. Analytics, Web of Science [database], (1997). <http://webofknowledge.com/WOS>.
- [4] W.L. Jungers, R.J. Minns, Computed tomography and biomechanical analysis of fossil long bones, *Am. J. Phys. Anthropol.* 50 (1979) 285-290. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330500219>.

- [5] F. Osti, G.M. Santi, M. Neri, A. Liverani, L. Frizziero, S. Stilli, E. Maredi, P. Zarantonello, G. Gallone, S. Stallone, G. Trisolino, CT conversion workflow for intraoperative usage of bony models: From DICOM data to 3D printed models, *Appl. Sci.* 9 (2019) 708. <https://doi.org/10.3390/app9040708>.
- [6] E. Santos, N. Garcia, J.M. Carretero, J.L. Arsuaga, E. Tsoukala, Endocranial traits of the Sima de los Huesos (Atapuerca, Spain) and Petralona (Chalkidiki, Greece) Middle Pleistocene ursids. Phylogenetic and biochronological implications, *Ann. Paleontol.* 100 (2014) 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.anpal.2014.02.002>.
- [7] E. Been, A. Gómez-Olivencia, P.A. Kramer, A. Barash, 3D Reconstruction of Spinal Posture of the Kebara 2 Neanderthal, in: A. Marom, E. Hovers (Eds.), *Hum. Paleontol. Prehistory*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 239–251. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46646-0>.
- [8] G. Boschian, D. Caramella, D. Saccà, R. Barkai, Are there marrow cavities in Pleistocene elephant limb bones, and was marrow available to early humans? New CT scan results from the site of Castel di Guido (Italy), *Quat. Sci. Rev.* 215 (2019) 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.010>.
- [9] D.N. Notman, J. Tashjian, A.C. Aufderheide, O.W. Cass, O.C. Shane, T.H. Berquist, J.E. Gray, E. Gedgaudas, Modern imaging and endoscopic biopsy techniques in Egyptian mummies, *Am. J. Roentgenol.* 146 (1986) 93–96. <https://doi.org/10.2214/ajr.146.1.93>.
- [10] Q. Cheng, X. Zhang, J. Guo, B. Wang, Y. Lei, G. Zhou, Y. Fu, Application of computed tomography in the analysis of glass beads unearthed in Shanpula cemetery (Khotan), Xinjiang Uyghur Autonomous Region, *Archaeol. Anthropol. Sci.* 11 (2019) 937–945. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0582-6>.
- [11] M.P. Morigi, F. Casali, M. Bettuzzi, R. Brancaccio, V. D'Errico, Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 100 (2010) 653–661. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5648-6>.
- [12] T. Freeth, Y. Bitsakis, X. Moussas, J.H. Seiradakis, A. Tselikas, H. Mangou, M. Zafeiropoulou, R. Hadland, D. Bate, A. Ramsey, M. Allen, A. Crawley, P. Hockley, T. Malzbender, D. Gelb, W. Ambrisco, M.G. Edmunds, Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism, *Nature.* 444 (2006) 587–591. <https://doi.org/10.1038/nature05357>.
- [13] B.P. Hilderbrand, T.P. Harrington, Mapping of Materials Stress with Ultrasonic Tomography, *Mater. Eval.* 39 (1981) 383–390. <https://lib.dr.iastate.edu/qnde/1979/allpapers/59> (accessed April 6, 2020).
- [14] J. Kar, S.K. Dinda, G.G. Roy, S.K. Roy, P. Srirangam, X-ray tomography study on porosity in electron beam welded dissimilar copper–304SS joints, *Vacuum.* 149 (2018) 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.038>.
- [15] W. Yu, S.L. Sing, C.K. Chua, X. Tian, Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting, *J. Alloys Compd.* 792 (2019) 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.017>.
- [16] X.Z. Lu, L.C. Chan, Micro-voids quantification for damage prediction in warm forging of biocompatible alloys using 3D X-ray CT and RVE approach, *J. Mater. Process. Technol.* 258 (2018) 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.020>.
- [17] M. Wicke, M. Luetje, I. Bacaicoa, A. Brueckner-Foit, Characterization of Casting Pores in Fe-rich Al-Si-Cu Alloys by Microtomography and Finite Element Analysis, *Procedia Struct. Integr.* 2 (2016) 2643–2649. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.330>.
- [18] M. Seifi, A. Salem, D. Satko, J. Shaffer, J.J. Lewandowski, Defect distribution and microstructure heterogeneity effects on fracture resistance and fatigue behavior of EBM Ti–6Al–4V, *Int. J. Fatigue.* 94 (2017) 263–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.001>.
- [19] W. Tillmann, C. Schaak, J. Nellesen, M. Schaper, M.E. Aydinöz, K.P. Hoyer, Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting, *Addit. Manuf.* 13 (2017) 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006>.
- [20] C. Panwisawas, B. Perumal, R.M. Ward, N. Turner, R.P. Turner, J.W. Brooks, H.C. Basoalto, Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: Experimental and modelling, *Acta Mater.* 126 (2017) 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.062>.
- [21] I. Maskery, N.T. Aboulkhair, M.R. Corfield, C. Tuck, A.T. Clare, R.K. Leach, R.D. Wildman, I.A. Ashcroft, R.J.M. Hague, Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography, *Mater. Charact.* 111 (2016) 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.001>.
- [22] U. Tradowsky, J. White, R.M. Ward, N. Read, W. Reimers, M.M. Attallah, Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development, *Mater. Des.* 105 (2016) 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.066>.
- [23] X. Zhou, D. Wang, X. Liu, D.D. Zhang, S. Qu, J. Ma, G. London, Z. Shen, W. Liu, 3D-imaging of selective laser melting defects in a Co-Cr-Mo alloy by synchrotron radiation micro-CT, *Acta Mater.* 98 (2015) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.014>.
- [24] M.J. Nemcko, D.S. Wilkinson, On the damage and fracture of commercially pure magnesium using x-ray microtomography, *Mater. Sci. Eng. A.* 676 (2016) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.095>.
- [25] V.D. Le, N. Saintier, F. Morel, D. Bellett, P. Osmond, Investigation of the effect of porosity on the high cycle fatigue behaviour of cast Al-Si alloy by X-ray micro-tomography, *Int. J. Fatigue.* 106 (2018) 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.012>.
- [26] J. Tenkamp, A. Koch, S. Knorre, U. Krupp, W. Michels, F. Walther, Defect-correlated fatigue assessment of A356-T6 aluminum cast alloy using computed tomography based Kitagawa-Takahashi diagrams, *Int. J. Fatigue.* 108 (2018) 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.11.003>.
- [27] S. Siddique, M. Imran, F. Walther, Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy, *Int. J. Fatigue.* 94 (2017) 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.003>.
- [28] P. Myrach, F. Jonietz, D. Meinel, H. Suwala, M. Ziegler, Calibration of thermographic spot weld testing with X-ray computed tomography, *Quant. Infrared Thermogr. J.* 14 (2017) 122–131. <https://doi.org/10.1080/17686733.2017.1281554>.
- [29] S.C. Wu, T.Q. Xiao, P.J. Withers, The imaging of failure in structural materials by synchrotron radiation X-ray microtomography, *Eng. Fract. Mech.* 182 (2017) 127–156. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.07.027>.
- [30] N. More, B. Basse-Cathalinat, C. Baquey, F. Lacroix, D. Ducassou, Application of novel techniques of medical imaging to the non-destructive analysis of carbon-carbon composite materials, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res.* 214 (1983) 531–536. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)90628-2](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90628-2).
- [31] M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest, S. V. Lomov, Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance, *J. Compos. Mater.* 53 (2019) 1579–1669. <https://doi.org/10.1177/0021998318772152>.
- [32] S.C. Garcea, Y. Wang, P.J. Withers, X-ray computed tomography of polymer composites, *Compos. Sci. Technol.* 156 (2018) 305–319. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.10.023>.
- [33] J. Maj, M. Basista, W. Węglewski, K. Bochenek, A. Strojny-Nędza, K. Naplocha, T. Panzner, M. Tatarková, F. Fiori, Effect of microstructure on mechanical properties and residual stresses in interpenetrating aluminum-alumina composites fabricated by squeeze casting, *Mater. Sci. Eng. A.* 715 (2018) 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.091>.
- [34] M.E. Ibrahim, Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 64 (2014) 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.010>.
- [35] N. Naouar, E. Vidal-Sallé, J. Schneider, E. Maire, P. Boisse, Meso-scale FE analyses of textile composite reinforcement deformation based on X-ray computed tomography, *Compos. Struct.* 116 (2014) 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.04.026>.
- [36] B.R. Denos, D.E. Sommer, A.J. Favaloro, R.B. Pipes, W.B. Avery, Fiber orientation measurement from mesoscale CT scans of prepreg platelet molded composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 114 (2018) 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.024>.
- [37] N.Q. Nguyen, M. Mehdikhani, I. Straumit, L. Gorbatikh, L. Lessard, S. V. Lomov, Micro-CT measurement of fibre misalignment: Application to carbon/epoxy laminates manufactured in autoclave and by vacuum assisted resin transfer moulding, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 104 (2018) 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.018>.
- [38] M.J. Emerson, Y. Wang, P.J. Withers, K. Conradsen, A.B. Dahl, V.A. Dahl, Quantifying fibre reorientation during axial compression of a composite through time-lapse X-ray imaging and individual fibre tracking, *Compos. Sci. Technol.* 168 (2018) 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.08.028>.
- [39] Y. Gong, B. Zhang, S.R. Hallett, Delamination migration in multidirectional composite laminates under mode I quasi-static and fatigue loading, *Compos. Struct.* 189 (2018) 160–176. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.074>.
- [40] Y. Qi, H. Qi, Y. He, W. Lin, P. Li, L. Qin, Y. Hu, L. Chen, Q. Liu, H. Sun, Q. Liu, G. Zhang, S. Cui, J. Hu, L. Yu, D. Zhang, J. Ding, Strategy of Metal-Polymer Composite Stent to Accelerate Biodegradation of Iron-Based

- Biomaterials, ACS Appl. Mater. Interfaces. 10 (2018) 182–192. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15206>.
- [41] Z. Wang, X.L. Zhao, G. Xian, G. Wu, R.K. Singh Raman, S. Al-Saadi, A. Haque, Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment, Constr. Build. Mater. 139 (2017) 467–489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038>.
- [42] V. Crupi, E. Kara, G. Epasto, E. Guglielmino, H. Aykul, Prediction model for the impact response of glass fibre reinforced aluminium foam sandwiches, Int. J. Impact Eng. 77 (2015) 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.11.012>.
- [43] S.D. Green, A.C. Long, B.S.F. El Said, S.R. Hallett, Numerical modelling of 3D woven preform deformations, Compos. Struct. 108 (2014) 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.015>.
- [44] E. Masad, B. Muhunthan, N. Shashidhar, T. Harman, Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis, J. Comput. Civ. Eng. 13 (1999) 88–95. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:2\(88\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:2(88)).
- [45] J. Gao, H. Wang, Y. Bu, Z. You, M.R.M. Hasan, M. Irfan, Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture, Constr. Build. Mater. 183 (2018) 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>.
- [46] J. Norambuena-Contreras, E. Yalcin, A. Garcia, T. Al-Mansoori, M. Yilmaz, R. Hudson-Griffiths, Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules, Constr. Build. Mater. 175 (2018) 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.153>.
- [47] H. Xu, F. Chen, X. Yao, Y. Tan, Micro-scale moisture distribution and hydrologically active pores in partially saturated asphalt mixtures by X-ray computed tomography, Constr. Build. Mater. 160 (2018) 653–667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.107>.
- [48] P. Liu, J. Hu, D. Wang, M. Oeser, S. Alber, W. Ressel, G. Canon Falla, Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior, Constr. Build. Mater. 133 (2017) 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.041>.
- [49] C. Jin, X. Yang, Z. You, Automated real aggregate modelling approach in discrete element method based on X-ray computed tomography images, Int. J. Pavement Eng. 18 (2017) 837–850. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1066006>.
- [50] P. Liu, J. Hu, H. Wang, G.C. Falla, D. Wang, M. Oeser, Influence of temperature on the mechanical response of asphalt mixtures using microstructural analysis and finite-element simulations, J. Mater. Civ. Eng. 30 (2018) 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002531).
- [51] A. González, J. Norambuena-Contreras, L. Storey, E. Schlangen, Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating, J. Environ. Manage. 214 (2018) 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.001>.
- [52] A. Menozzi, A. Garcia, M.N. Partl, G. Tebaldi, P. Schuetz, Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples, Constr. Build. Mater. 74 (2015) 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.034>.
- [53] Á. García, Self-healing of open cracks in asphalt mastic, Fuel. 93 (2012) 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009>.
- [54] H. Wang, C. Wang, Z. You, X. Yang, Z. Huang, Characterising the asphalt concrete fracture performance from X-ray CT Imaging and finite element modelling, Int. J. Pavement Eng. 19 (2018) 307–318. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1347440>.
- [55] M. Kayhanian, D. Anderson, J.T. Harvey, D. Jones, B. Muhunthan, Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots, J. Environ. Manage. 95 (2012) 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>.
- [56] A.M. Petrovic, J.E. Siebert, P.E. Rieke, Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning, Soil Sci. Soc. Am. J. 46 (1982) 445–450. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600030001x>.
- [57] G. Wang, C. Jiang, J. Shen, D. Han, X. Qin, Deformation and water transport behaviors study of heterogenous coal using CT-based 3D simulation, Int. J. Coal Geol. 211 (2019) 103204. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.011>.
- [58] H.L. Ramandi, P. Mostaghimi, R.T. Armstrong, M. Saadatfar, W.V. Pinczewski, Porosity and permeability characterization of coal: A micro-computed tomography study, Int. J. Coal Geol. 154–155 (2016) 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.10.001>.
- [59] S. Wang, P. Yang, Z. (Joey) Yang, Characterization of freeze-thaw effects within clay by 3D X-ray Computed Tomography, Cold Reg. Sci. Technol. 148 (2018) 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.01.001>.
- [60] L.F. Fan, J.W. Gao, Z.J. Wu, S.Q. Yang, G.W. Ma, An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique, Appl. Therm. Eng. 140 (2018) 505–519. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.074>.
- [61] S. Gibeaux, P. Vázquez, T. De Kock, V. Cnudde, C. Thomachot-Schneider, Weathering assessment under X-ray tomography of building stones exposed to acid atmospheres at current pollution rate, Constr. Build. Mater. 168 (2018) 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.120>.
- [62] J.B. Zhu, T. Zhou, Z.Y. Liao, L. Sun, X.B. Li, R. Chen, Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 106 (2018) 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.022>.
- [63] L. Zhuang, K.Y. Kim, S.G. Jung, M. Diaz, K.B. Min, Effect of Water Infiltration, Injection Rate and Anisotropy on Hydraulic Fracturing Behavior of Granite, Rock Mech. Rock Eng. 52 (2019) 575–589. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1431-3>.
- [64] I.L. Morgan, H. Ellinger, R. Klinksiek, J.N. Thomson, Examination of Concrete by Computerized Tomography, ACI J. Proc. 77 (1980) 23–27. <https://doi.org/10.14359/6987>.
- [65] Y. Li, Y. Li, Z. Guan, Q. Ding, Elastic modulus damage model of cement mortar under salt freezing circumstance based on X-ray CT scanning, Constr. Build. Mater. 191 (2018) 1201–1209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.097>.
- [66] W. Trawiński, J. Tejchman, J. Bobiński, A three-dimensional meso-scale modelling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray μ CT images, Eng. Fract. Mech. 189 (2018) 27–50. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.003>.
- [67] Y.S. Wang, J.G. Dai, X-ray computed tomography for pore-related characterization and simulation of cement mortar matrix, NDT E Int. 86 (2017) 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.11.005>.
- [68] T. Liu, S. Qin, D. Zou, W. Song, J. Teng, Mesoscopic modeling method of concrete based on statistical analysis of CT images, Constr. Build. Mater. 192 (2018) 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.136>.
- [69] A. Qsymah, R. Sharma, Z. Yang, L. Margetts, P. Mummery, Micro X-ray computed tomography image-based two-scale homogenisation of ultra high performance fibre reinforced concrete, Constr. Build. Mater. 130 (2017) 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.020>.
- [70] F. Liu, T. Zhang, T. Luo, M. Zhou, W. Ma, K. Zhang, The effects of Nano-SiO₂ and Nano-TiO₂ addition on the durability and deterioration of concrete subject to freezing and Thawing Cycles, Materials (Basel). 12 (2019). 3608. <https://doi.org/10.3390/ma12213608>.
- [71] B.J. Olawuyi, W.P. Boshoff, Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume analysis, Constr. Build. Mater. 135 (2017) 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.128>.
- [72] M.A. Vicente, D.C. González, J. Mínguez, M.A. Tarifa, G. Ruiz, R. Hindi, Influence of the pore morphology of high strength concrete on its fatigue life, Int. J. Fatigue. 112 (2018) 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.006>.
- [73] J. Zhang, G. Ma, R. Ming, X. Cui, L. Li, H. Xu, Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging, Constr. Build. Mater. 161 (2018) 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.149>.
- [74] X. Wu, J. Zhou, T. Kang, F. Wang, X. Ding, S. Wang, Laboratory investigation on the shrinkage cracking of waste fiber-reinforced recycled aggregate concrete, Materials (Basel). 12 (2019). 1196. <https://doi.org/10.3390/ma12081196>.
- [75] J. Mínguez, M.A. Vicente, D.C. González, Pore morphology variation under ambient curing of plain and fiber-reinforced high performance mortar at an early age, Constr. Build. Mater. 198 (2019) 718–731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.010>.
- [76] W. Ren, Z. Yang, R. Sharma, C. Zhang, P.J. Withers, Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete, Eng. Fract. Mech. 133 (2015) 24–39. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.10.016>.
- [77] Z. Yang, W. Ren, R. Sharma, S. McDonald, M. Mostafavi, Y. Vertyagina, T.J. Marrow, In-situ X-ray computed tomography characterisation of 3D fracture evolution and image-based numerical homogenisation of concrete, Cem. Concr. Compos. 75 (2017) 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.001>.

- [78] 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>.
- [79] M.A. Vicente, G. Ruiz, D.C. González, J. Mínguez, M. Tarifa, X. Zhang, CT-Scan study of crack patterns of fiber-reinforced concrete loaded monotonically and under low-cycle fatigue, *Int. J. Fatigue*. 114 (2018) 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.05.011>.
- [80] 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>.
- [81] Q. Luo, D.X. Liu, P. Qiao, Q.G. Feng, L.Z. Sun, Microstructural damage characterization of concrete under freeze-thaw action, *Int. J. Damage Mech.* 27 (2018) 1551–1568. <https://doi.org/10.1177/1056789517736573>.
- [82] T. Suzuki, T. Shiotani, M. Ohtsu, Evaluation of cracking damage in freeze-thawed concrete using acoustic emission and X-ray CT image, *Constr. Build. Mater.* 136 (2017) 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.013>.
- [83] Y. Shields, E. Garboczi, J. Weiss, Y. Farnam, Freeze-thaw crack determination in cementitious materials using 3D X-ray computed tomography and acoustic emission, *Cem. Concr. Compos.* 89 (2018) 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.004>.
- [84] Ł. Skarżyński, J. Tejchman, Experimental investigations of damage evolution in concrete during bending by continuous micro-CT scanning, *Mater. Charact.* 154 (2019) 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.034>.
- [85] G.L. Balázs, O. Czoboly, É. Lublóy, K. Kapitány, Á. Barsi, Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography, *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 534–541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.114>.
- [86] M.A. Vicente, G. Ruiz, D.C. González, J. Mínguez, M. Tarifa, X. Zhang, Effects of fiber orientation and content on the static and fatigue behavior of SFRC by using CT-Scan technology, *Int. J. Fatigue*. 128 (2019) 105178. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.038>.
- [87] A.B. Groeneveld, T.M. Ahlborn, C.K. Crane, C.A. Burchfield, E.N. Landis, Dynamic strength and ductility of ultra-high performance concrete with flow-induced fiber alignment, *Int. J. Impact Eng.* 111 (2018) 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.08.009>.
- [88] Ł. Skarżyński, J. Suchorzewski, Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography, *Constr. Build. Mater.* 183 (2018) 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.182>.