

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Evaluación de la estimación no destructiva
del parámetro de densidad de fisuras en el
hormigón: análisis de imágenes
Trabajo Experimental**

Oscar Andrés Rosero Vera

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 11 de mayo de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Evaluación de la estimación no destructiva
del parámetro de densidad de fisuras en el
hormigón: análisis de imágenes**

Oscar Andrés Rosero Vera

Calificación: _____

Nombre del profesor, Título Académico: Juan José Recalde, Ph.D.

Firma del Profesor: _____

Quito, 11 de mayo de 2018

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del Estudiante: _____

Nombres y Apellidos: Oscar Andrés Rosero Vera

Código: 00117327

Cédula de Identidad: 1750442392

Lugar y Fecha: Quito, 11 de mayo de 2018

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi tutor Juan José Recalde por su guía desde el inicio y a lo largo del desarrollo de esta investigación. Así también, extendo mi agradecimiento al Dr. Luis Mata de University of Toledo, quien también estuvo involucrado en la investigación desde su inicio. A Ramiro Pérez, Diego Chanchay, Sebastián Yépez y Magdalena Nováková, por su tiempo invertido en la ardua labor del procesamiento y la obtención de imágenes. Agradezco también al Dr. Michel Vargas, por su ayuda en la utilización del SEM y la obtención de las imágenes. A todo el departamento de Ingeniería Civil, por el apoyo económico brindado.

Por último, quisiera agradecer a mi familia por su incondicional apoyo a lo largo de todo el proceso no solo de este trabajo de titulación, sino de todo el camino que me ha conducido al logro de este objetivo. De igual forma, mi gratitud a mis amigos más cercanos, por su aliento constante.

Resumen

El hormigón, debido a su constante exposición a carga y condiciones ambientales, sufre cambios en sus propiedades mecánicas, mismas que han sido atribuidas a los daños en su microestructura. Un buen indicador de estos daños es la densidad de fisuras, la cual se pretende estimar en la presente investigación mediante la obtención y análisis de imágenes. Para ello, se evaluaron 4 tipos de mezclas con diferentes características. Se obtuvieron las imágenes por tres diferentes métodos de microscopía: microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido y tomografía computacional por rayos X. Se desarrolló una metodología de filtrado de imágenes para una mejor apreciación de las fisuras, teniendo como base un algoritmo de medias no locales. Con las imágenes de tomografía por rayos X se logró caracterizar el sistema de vacíos, y con las imágenes del microscopio electrónico de barrido se obtuvo el parámetro de densidad de fisuras equivalente (ϵ) para cada espécimen; por otro lado, a partir de las imágenes de microscopio óptico no se pudo obtener resultados pues no se logró apreciar con claridad los elementos debido a la resolución. Una vez establecido el método para la estimación del parámetro de densidad de fisuras y el sistema de poros, en investigaciones futuras se podrá correlacionar con los métodos no destructivos y evaluar la veracidad de los mismos.

Palabras Clave: Hormigón, durabilidad, parámetro de densidad de fisuras, microfisuras, microscopio electrónico de barrido, tomografía por rayos X, medias no locales, análisis de imágenes.

Abstract

Concrete, due to its constant exposure to load and environmental conditions, undergoes changes in its mechanical properties, which have been attributed to the damage in its microstructure. A good indicator of these damages is the density of cracks, which is intended to be estimated in the present investigation by obtaining and analyzing images. For this, 4 types of mixtures with distinctive characteristics were evaluated. The images were obtained by three different microscopy methods: optical microscope, scanning electron microscope and X-ray computed tomography. An image filtering methodology was developed for a better appreciation of the cracks, based on an algorithm of non-local means. With the images of X-ray tomography, the void system was characterized, and with the images of the scanning electron microscope, the equivalent crack density parameter (ε) was obtained for each specimen. On the other hand, from the optical microscope images it was not possible to obtain results because the elements could not be clearly appreciated due to the resolution. Once the method for estimating the crack density parameter and the pore system has been established, in future investigations it will be possible to correlate with the non-destructive methods and evaluate the veracity of them.

Key Words: Concrete, durability, crack density parameter, microcracks, scanning electron microscope, X-ray tomography, non-local means, image analysis.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	12
1.1	Antecedentes	12
1.2	Justificación	13
1.3	Objetivos.....	14
1.4	Resultados Esperados.....	14
2	Desarrollo.....	16
2.1	Marco Teórico.....	16
2.1.1	Daños en el hormigón expuesto a altas temperaturas.	16
2.1.2	Módulo de elasticidad dinámico de discos de hormigón.	16
2.1.3	Relaciones entre cambios en E_d y otras propiedades.	18
2.1.4	Parámetro de densidad de fisuras.....	19
2.1.5	Microscopía.....	22
2.1.5.1	Microscopio óptico (digital).	22
2.1.5.2	Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).	23
2.1.5.3	Tomografía 3D por Rayos-X (3DXRCT).	25
2.1.6	Procesamiento de Imágenes.....	26
2.1.6.1	Filtrado por Medias No Locales (NLM).	26
2.2	Plan Experimental.....	28
2.2.1	Plan experimental principal.	28
2.2.2	Matriz de Experimentos.....	30
2.3	Metodología	30

2.3.1	Micro tomografía 3D (3DXRCT).....	30
2.3.2	Microscopio electrónico de Barrido (SEM).....	31
2.3.3	Microscopio Óptico.	31
2.4	Resultados.....	32
2.4.1	Micro tomografía 3D (3DXRCT).....	32
2.4.2	Microscopio electrónico de Barrido (SEM).....	36
2.4.3	Microscopio Óptico.	40
2.5	Análisis.....	41
3	Conclusiones.....	44
3.1	Conclusiones de Resultados.....	44
3.2	Recomendaciones.....	45
4	Lista de referencias.....	46
	APÉNDICE A - CONTENIDO DIGITAL.....	49
	APÉNDICE B - HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN DE VACÍOS.....	50
	APÉNDICE C - IMÁGENES DE SEM COMPLETAS.....	58

Lista de tablas

Tabla 1: Detalle de mezclas.	28
Tabla 2: Probetas de ensayo obtenidas para el proyecto global para cada mezcla.	28
Tabla 3: Plan de ensayos en discos.	29
Tabla 4: Plan de obtención de imágenes en especímenes de cada muestra.	30
Tabla 5: Procedimiento de pulido para preparación de muestra.....	31
Tabla 6: Resumen de resultados de conteo de porosidad en muestras.	35
Tabla 7: Resultados de parámetro de densidad de fisuras (ϵ) obtenidos por SEM.....	38

Lista de figuras

Figura 1: Esquema método de obtención de Ed. Fuente: Recalde, J. J. (2009).....	17
Figura 2: Relación entre Ed y API. Fuente: Recalde, J. J. (2009).	19
Figura 3: Propiedades elásticas efectivas de un sólido con fisuras circulares. (a) Efecto de saturación total (b) Efecto de saturación parcial. Fuente: O’Connell y Budianski, (1974) ..	22
Figura 4: Partes del microscopio óptico. Fuente: Mundo Microscopio (2018)	23
Figura 5: Esquema SEM. Fuente: EcuRed (s.f.).....	24
Figura 6: Tomografía por rayos X. Fuente: Ketcham R. (2017).	25
Figura 7: De derecha a izquierda, de arriba hacia abajo, Imagen con ruido, Gaussiano, anisotrópico, variación total, vecindario y Medias No Locales. Fuente: Buades, A. Bartomeu, C. & Morel, J. (2005).....	27
Figura 8: Discos extraídos de los cilindros	29
Figura 9: Ejemplo de procesamiento de imágenes de tomografía por rayos-X. Imágenes superiores en escala de grises e inferiores en mapa de calor. Muestra NC51B, cada imagen es de 800x800 pixeles (16x16 mm).	32
Figura 10: Código base utilizado en lenguaje Matlab. Ejemplo para muestra HC41A.....	33
Figura 11: Ejemplo imagen binarizada. Muestra HC51A, 750x750 pixeles (15x15x15 mm).	34
Figura 12: Ejemplo de modelo 3D de porosidad en hormigón. Muestra HC51A, 750x750x750 pixeles (15x15x15 mm).	34
Figura 13: Ejemplo de histograma de distribución de poros por radio medio equivalente. Muestra HC51A.	35
Figura 14: Ejemplo de imagen obtenida por SEM. Muestra HC51B, imagen 2-1.	36

Figura 15: Ejemplo de imagen SEM completa. Muestra HC51B. (a) Matriz de imágenes unidas, imagen filtrada (b) Imagen completa con fisuras sobrepuestas.	37
Figura 16: Gráfica de resultados de obtenidos por SEM: (a) Longitud media de fisuras. (b) Densidad media de fisuras. (c) Parámetro de densidad de fisuras, ϵ	39
Figura 17: Gráficas comparativas del parámetro de densidad de fisuras vs densidad media de fisuras y longitud media de fisuras.	40
Figura 18: Ejemplo de imagen obtenida por microscopio óptico. Muestra HC51B.....	40
Figura 19: Cambio de los histogramas luego de la aplicación de ecualización y NLM. Muestra NC51B.	41

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El hormigón, hoy en día, es uno de los materiales más utilizados para la construcción de obras civiles. Como tal, se busca que, al estar expuesto a cargas y condiciones ambientales a lo largo de los años, la obra de infraestructura tenga una vida útil adecuada, brindada en particular por la resistencia de los materiales constituyentes ante eventos dañinos o perjudiciales. Para garantizar durabilidad se utiliza documentación normada, la cual se ha venido desarrollando a lo largo de los años principalmente de experiencias fallidas, es decir que se basan en un mecanismo de “prueba y error”, además de que no se consideran todos los tipos de hormigón.

Con el afán de entender mejor la durabilidad del hormigón, los estudios recientes se han centrado en su microestructura, y a enlazar los cambios en ella con la variación de las propiedades mecánicas del material. Dilek, Leming, y Guth (2004) encontraron una relación lineal entre la variación del módulo de elasticidad y el logaritmo del índice de permeabilidad al aire para mezclas de diferente resistencia, mas no se tomó en cuenta los cambios en la microestructura. Posteriormente, Recalde (2009) basado en lo anterior, buscó establecer cómo los cambios en las propiedades mecánicas se relacionan con los cambios en la microestructura del hormigón expuesto a condiciones perjudiciales. Su disertación se basó en la utilización de métodos analíticos para estimar cuantitativamente los cambios en el parámetro de densidad de fisuras (ϵ) después de exponer a especímenes de diferente composición a 300 °C por un corto tiempo.

La continuación de dichos estudios es la evaluación de los valores del parámetro de densidad de fisuras estimados, mediante un análisis de imágenes, para lo cual se estableció una colaboración entre University of Toledo, y la Universidad San Francisco de Quito, con Luis A. Mata y Juan José Recalde respectivamente como investigadores principales de ambas instituciones, quienes lideraron un proyecto de investigación centrada en la utilización de diferentes métodos de microscopía con el fin de evaluar la exactitud de los resultados obtenidos de forma analítica, para estimar el parámetro de densidad de fisuras (ϵ) en el hormigón.

1.2 Justificación

Como se mencionó anteriormente, el éxito en el uso de un material implica, entre otras cosas, que a lo largo de los años sus propiedades no varíen de forma significativa. En el caso del hormigón, su exposición a carga y ambiente derivan en un deterioro sustancial, siendo este deterioro el que se busca evitar, o en el caso de eventos extremos (sobrecarga o altas temperaturas), evaluar el grado de deterioro.

Los estudios previos, asocian el deterioro a la variación de ciertas propiedades mecánicas como son las pérdidas de resistencia a la compresión, la disminución del módulo de elasticidad, el incremento en la penetrabilidad de fluidos, entre otros. Estos a su vez están relacionadas con los cambios en la microestructura del hormigón, fundamentalmente asociado a la creación e interconexión de microfisuras en el material, siendo la densidad de fisuras, un indicador adecuado.

Recalde (2009) desarrolló una metodología no-destructiva para estimar el parámetro de densidad de fisuras (ϵ) basado en la teoría de un medio fisurado de

O'Connell & Budiansky (1976), sin embargo, no existe comprobación de que los resultados coincidan con predicciones directas de la densidad de microfisuras. Para la apreciación y medición directa de la densidad de microfisuras se requieren mecanismos de microscopía como pueden ser: el microscopio óptico, el microscopio electrónico de barrido (SEM) y la tomografía por rayos X (3DXRCT), entre otros.

Mediante dichos mecanismos, sumados a un software para el procesamiento de las imágenes obtenidas se puede contabilizar las microfisuras en ciertas secciones y cuantificar la densidad de fisuras. De confirmarse lo establecido el campo con mayor beneficio sería el de la ingeniería forense, para lo cual el ingeniero puede utilizar la metodología desarrollada por Recalde (2009) confiablemente para estimar el parámetro de densidad de microfisuras.

1.3 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo de titulación son:

- Evaluar la adecuación de los métodos de microscopía de imágenes en la caracterización del sistema poro-fisura: Microscopio Óptico, SEM y Tomografía de Rayos X.
- Desarrollar una metodología para el procesamiento y análisis de imágenes para identificar y caracterizar el sistema poro-fisura en el hormigón.
- Realizar mediciones al sistema poro-fisuras para correlacionar con el parámetro de densidad de fisuras obtenido no destructivamente.

1.4 Resultados Esperados

Los resultados esperados de esta investigación son:

- Modelos 3D del sistema poro-fisura de cada espécimen a partir de las tomografías de rayos x
- Imágenes del SEM y del Microscopio Óptico.
- Obtener mediciones del sistema poro-fisura a nivel microscópico.

DESARROLLO

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Daños en el hormigón expuesto a altas temperaturas.

El hormigón al estar expuesto a altas temperaturas sufre daños en su microestructura. Esto se debe a que, además del agua adsorbida en el hormigón, el agua libre se retiene en poros y capilares, que, en presencia de alta temperatura, escaparán a través de la red capilar en forma de vapor de agua (Neville, 1995). Si se produce una alta tasa de calentamiento y la permeabilidad es baja, grandes cantidades de agua libre pueden causar desprendimiento de la superficie del concreto (fisuras), lo que se especula que se debe a una mayor tasa de aumento de la presión de vapor (Mehta & Monteiro, 2006).

Así también, lo comprobaron Caldwell, Sharpe & Leming (2003) realizando evaluaciones no destructivas a elementos doble-T y comparando resultados con los obtenidos de pruebas de carga. Así también, Dilek, Leming & Sharpe (2003) identificaron daños en elementos de hormigón expuestos a un fluido criogénico mediante la obtención del módulo de elasticidad dinámico de Young (Ed), mediante el método desarrollado por Leming, Nau & Fukuda (1998).

2.1.2 Módulo de elasticidad dinámico de discos de hormigón.

Leming, Nau & Fukuda (1998) desarrollaron un método de ensayo para medir el módulo de elasticidad dinámico de Young (Ed) utilizando discos de hormigón. Este método ha sido utilizado exitosamente para determinar gradientes de deterioro (Dilek, Caldwell, Guth, etc.), que no se pueden determinar mediante los métodos normados existentes (Cap. 26 ACI 318-14, ASTM C469, ASTM C39).

El método, se basa en la teoría de Hutchinson (1979), con la cual se logra obtener una solución aproximada para la vibración de flexión axisimétrica de una placa circular gruesa en condiciones libre-libre. Su teoría, asume que el desplazamiento axial es independiente de la coordenada axial y que el desplazamiento radial es una función lineal de z . Esta suposición implica que el efecto promedio ponderado linealmente de la tensión axial es cero y que hay un esfuerzo cortante constante a través del espesor del disco. Es así que el método consiste en la utilización de la frecuencia natural de un disco de hormigón relativamente fino de 25 mm de diámetro, al que se le coloca un acelerómetro en un extremo, y se obtiene datos del disco en vibración libre a ambos lados, como se muestra en la Figura 1. Esta frecuencia es relacionada con el módulo de elasticidad según la ecuación (2-1).

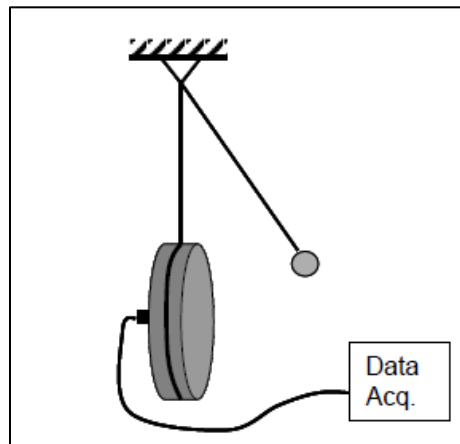


Figura 1: Esquema método de obtención de E_d . Fuente: Recalde, J. J. (2009).

$$E_d = 2(1 + \nu)\rho \left(\frac{\pi f d}{\Omega_0} \right)^2 \quad (2-1)$$

donde:

E_d = módulo de elasticidad dinámico de Young, Pa

ν = módulo de Poisson

ρ = densidad del disco, kg/m^3

f = frecuencia, Hz

d = diámetro del disco, m

Ω_0 = parámetro de frecuencia adimensional asociado con el primer modo de vibración

2.1.3 Relaciones entre cambios en Ed y otras propiedades.

Dilek, Leming y Guth (2004) estudiaron la relación entre el índice de permeabilidad al aire (API) y los cambios en el módulo dinámico de elasticidad (Ed). Recalde y Leming (2009), por su parte, estudiaron los cambios en el Ed cuando ocurren daños por altas temperaturas, comparando los resultados con la penetrabilidad de fluidos. Recalde (2005), encontró una variación entre los resultados de Ed para las muestras cuando estaban secas y cuando estaban saturadas, como se muestra en la Figura 2, además de encontrar claras diferencias en los resultados cuando cambiaba la composición del hormigón, dando una clara señal de que la microestructura debería contener la respuesta, esencialmente en las microfisuras que permitían el paso de agua.

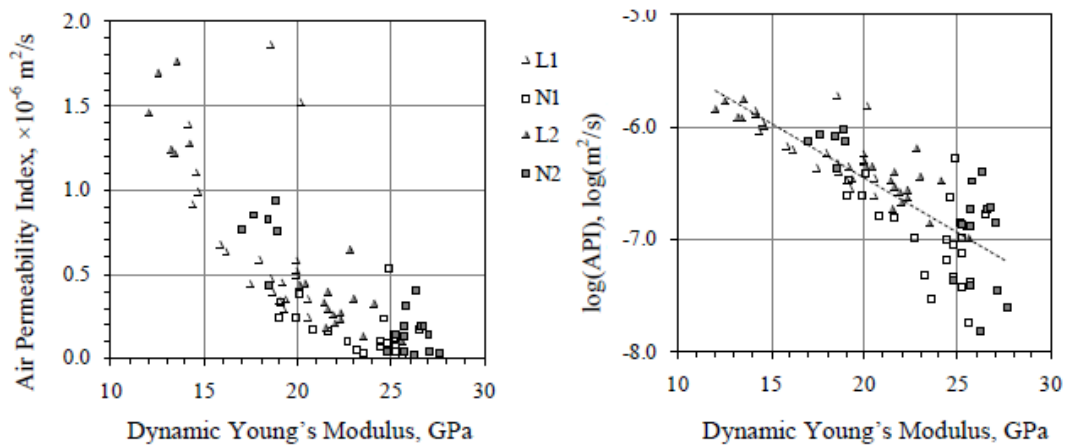


Figura 2: Relación entre E_d y API. Fuente: Recalde, J. J. (2009).

2.1.4 Parámetro de densidad de fisuras.

Recalde (2009), investigó la relación entre el cambio de propiedades mecánicas del hormigón con el cambio en la microestructura causada por la exposición de especímenes a altas temperaturas (300 °C), para lo cual, se tomó como indicador el parámetro de densidad de fisuras. Para obtenerlo se utilizó el modelo expuesto por O'Connell y Budianski, (1974) quienes, para estimar el parámetro de densidad de fisuras, supusieron que todas las fisuras en un material homogéneo e isotrópico son planos circulares o elipsoidales distribuidos aleatoriamente. Las ecuaciones (2-2) y (2-3) expresan el parámetro de densidad de fisuras (ϵ) para fisuras circulares y elípticas respectivamente.

$$\epsilon = \left(\frac{1}{V}\right) \sum a^3 \quad (2-2)$$

$$\epsilon = \left(\frac{2N}{\pi V}\right) \sum \frac{A_C^2}{P_C} \quad (2-3)$$

donde:

V = volumen del sólido, m^3

N = número de fisuras

a = radio circular o radio elíptico mayor, m

A_c^2 = área de fisura, m²

P_c = perímetro de fisura, m

El modelo de O'Connell y Budianski, (1974; 1977), describe además, los cambios en la relación de Poisson (ν), módulo de compresibilidad (K), módulo de corte (G) y módulo de Young (E) con concentración de grietas en el sólido, medido por el parámetro de densidad de grietas (ε). Estos cambios se describen según las ecuaciones (2-4), (2-5) y (2-6). En la Figura 3 se muestran estos cambios, poniendo especial atención al segundo cuadrante de ambos gráficos, pues se experimenta un aumento en el módulo de corte a medida que las fisuras se van saturando de fluido.

$$\frac{K}{K_0} = 1 - \frac{16(1-\nu^2)}{9(1-2\nu)} D\varepsilon \quad (2-4)$$

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{16}{45} (1 - \nu^2) \left[3D + \frac{4}{(2-\nu)} \right] \varepsilon \quad (2-5)$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{32}{45} (1 - \nu) \left[D + \frac{3}{(2-\nu)} \right] \varepsilon \quad (2-6)$$

donde:

$$\varepsilon = \frac{45(\nu_0 - \nu)}{16(1-\nu^2)} \frac{(2-\nu)}{[D(1+3\nu_0)(2-\nu) - 2(1-2\nu_0)]} \quad (2-7)$$

K = módulo de compresibilidad efectivo, Pa

K_0 = módulo de compresibilidad del sólido no fisurado, Pa

ν = módulo de Poisson efectivo

ν_0 = módulo de Poisson del sólido no fisurado

G = módulo de cortante efectivo, Pa

G_0 = módulo de cortante del sólido no fisurado, Pa

y D depende del grado de saturación. Para fisuras parcialmente saturadas se aplica la ecuación (2-8) y para fisuras totalmente saturadas se aplica la ecuación (2-9).

$$D_{ps} = 1 - \xi_{OB} \quad (2-8)$$

$$D_{sf} = \left[1 + \frac{4(1-\nu^2)K_0}{3\pi(1-2\nu)K} \omega_{OB} \right]^{-1} \quad (2-9)$$

donde:

$$\omega_{OB} = \frac{a K_{fl}}{c K_0} \quad (2-10)$$

a = radio elíptico mayor, m

c = grosor de fisura, m

K_{fl} = módulo de compresibilidad del fluido, Pa

ξ_{OB} = grado de saturación de fisuras

Para el caso de una estimación del parámetro de densidad de fisuras (ε) en un plano que corta el sólido fisurado, O'Connell y Budianski (1974) proveen una expresión que lo relaciona con longitudes y densidades medias de fisuras, a partir del conteo de segmentos de línea formados por intersecciones de fisuras con una sección plana. Asumiendo tamaño uniforme y forma convexa, como se espera para las fisuras de zona de transición que rodean agregados de tamaño uniforme, ε se relaciona con la longitud de fisura promedio (\bar{L}) y la densidad de fisuras (M), medida como el número de segmentos de línea de fisuras por unidad de área, de acuerdo con la ecuación (2-11).

$$\varepsilon = \frac{8}{\pi^3} M(\bar{L})^2 \quad (2-11)$$

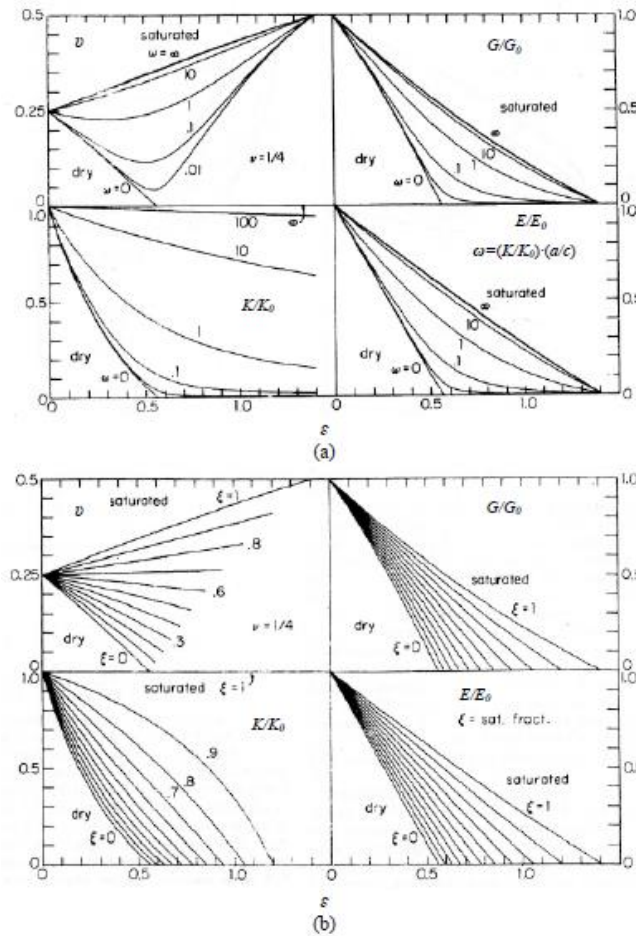


Figura 3: Propiedades elásticas efectivas de un sólido con fisuras circulares. (a) Efecto de saturación total (b) Efecto de saturación parcial. Fuente: O'Connell y Budianski, (1974)

2.1.5 Microscopía.

Las microfisuras, poseen espesores en escala micrométrica, por lo que para observarlos surge la necesidad de utilizar mecanismos de microscopía. Los instrumentos y métodos son variados, pero entre ellos se describen los utilizados en la presente investigación.

2.1.5.1 Microscopio óptico (digital).

El microscopio óptico es un instrumento que consta de un sistema de lentes que magnifican la visualización directa de una muestra. Su funcionamiento se basa en la

propiedad de algunos materiales que permiten cambiar la dirección de los rayos de luz, permitiendo fabricar lentes capaces de hacer converger o divergir los rayos de luz. Existen modelos diversos, pero en general todos poseen un sistema óptico compuesto por: foco o fuente de luz, que emite rayos de luz hacia la muestra, pasando por un condensador que concentra los rayos de luz emitidos y un diafragma acoplado que permite regular la cantidad de luz incidente. El objetivo por su parte es el que contiene el conjunto de lentes que reciben la luz y por último el ocular permite ver la imagen aumentada, además de sus partes mecánicas que colaboran con su manipulación y manejo. Para conveniencia de posterior procesamiento se acopla una cámara digital al ocular y poder extraer imágenes (Microscopio Óptico, 2018). Un claro ejemplo de su composición se muestra en la Figura 4, a continuación.

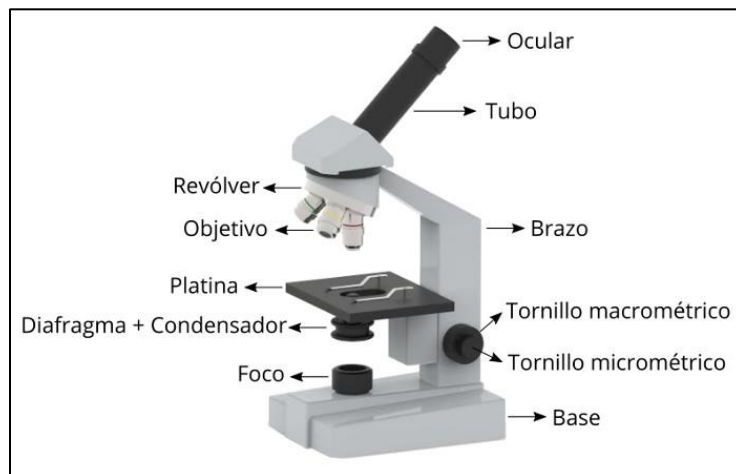


Figura 4: Partes del microscopio óptico. Fuente: Mundo Microscopio (2018)

2.1.5.2 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

El microscopio óptico de barrido es un instrumento bastante sofisticado, que a diferencia de los microscopios tradicionales utiliza un haz de electrones y no uno de luz. Consiste en un cátodo de tungsteno que emite electrones a altas velocidades a través de

una columna con lentes electromagnéticas que van concentrando el haz hasta volverlo casi puntual, el cual interactúa con la muestra y dependiendo del material y su composición refleja los electrones, ahora llamados electrones secundarios, que después de pasar por un videoamplificador son captados por un tubo semejante a un osciloscopio de rayos catódicos donde se reconstruirá la imagen (Renau-Piqueras & Faura, 1965). La Figura 5 muestra un esquema del SEM.



Figura 5: Esquema SEM. Fuente: EcuRed (s.f.).

Una de las mayores ventajas de utilizar este tipo de instrumento es que al ser el haz tan pequeño, se lo va recorriendo punto a punto de la muestra a gran velocidad, llegando a obtener imágenes en dos o tres dimensiones con resoluciones nanométricas. Dependiendo del instrumento, además, se tiene la posibilidad de realización de bajo vacío o alto vacío en la cámara donde se coloca la muestra, o si se requiere se puede estimar la composición química de las muestras debido a que los electrones reaccionan distinto con cada elemento.

2.1.5.3 Tomografía 3D por Rayos-X (3DXRCT).

La tomografía por rayos-X se basa en la producción, emisión y posterior recepción de radiación electromagnética. La producción de esta radiación se realiza mediante un “tubo de rayos X” que está compuesto por un cátodo, un ánodo y una fuente de poder. El cátodo es, generalmente, un filamento de tungsteno. Los electrones libres se aceleran hacia el ánodo, y, por consiguiente, adquieren una significativa cantidad de energía cinética. Cuando estos electrones chocan con la placa de tungsteno que hay en el ánodo, pierden su energía cinética, es entonces cuando se genera un fotón luego de que se llenen las vacantes dejadas. Estos rayos traspasan los cuerpos, pero se ven afectados por el coeficiente de atenuación lineal de los materiales, que se define como la capacidad de un material para detener fotones y es directamente proporcional a su número atómico y a su densidad, por lo cual define las secciones dependiendo de qué tanto fueron retenidos los fotones en su trayecto (Ramírez, Arboleda, & McCollough, 2008). La Figura 6 muestra un ejemplo de cómo se realizan las tomografías por rayos-X.

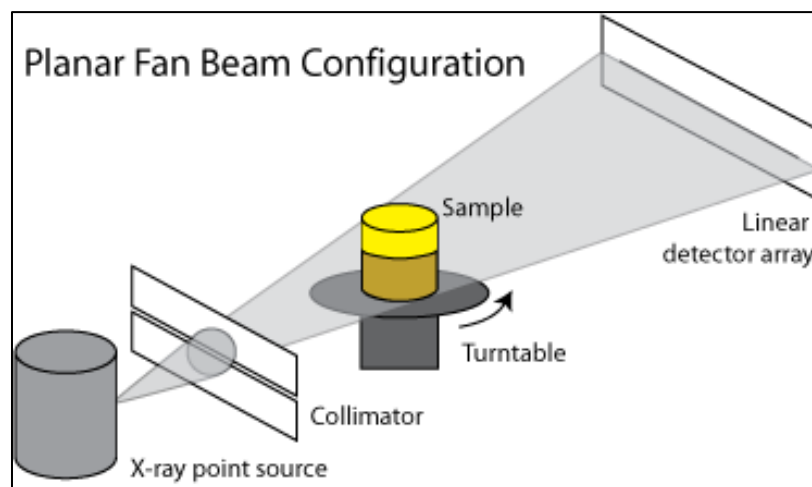


Figura 6: Tomografía por rayos X. Fuente: Ketcham R. (2017).

Cuando se consigue varias imágenes de tomografía por rayos X consecutivas se puede utilizar un software para realizar una reconstrucción en 3D de la figura, llegando a obtener una visión interna, completa y detallada de los objetos.

2.1.6 Procesamiento de Imágenes.

El análisis de imágenes, o procesamiento digital de imágenes se refiere al mejoramiento de la calidad de las imágenes para lograr apreciar a detalle su contenido, o en otras palabras, eliminar el ruido existente. Su utilidad va desde la corrección de imperfecciones de una fotografía hasta cartografía a gran escala (Domínguez, 1996). Las imágenes obtenidas, por cualquiera de los métodos de microscopía mencionados anteriormente, presentan imperfecciones debido a varios factores, muchas veces inevitables, por lo que se necesita realizar un procesamiento (filtrado) antes de empezar a analizar dichas imágenes.

Para el procesamiento de imágenes existen varios algoritmos, llamados filtros de imagen, cada uno centrado en la definición y diferenciación de las diferentes partes de la imagen mediante la mediación de la intensidad de píxeles. Entre los más usados están: Gaussiano, de vecindario, anisotrópico, medias no locales (NLM), minimización de la variación total, entre otros. Un filtro bastante útil es el NLM, explicado a continuación.

2.1.6.1 Filtrado por Medias No Locales (NLM).

El algoritmo de filtrado de Medias No Locales, o Non Local Means, resulta muy útil a la hora de eliminar la mayor cantidad de ruido de las imágenes sin perder detalles importantes de la imagen. Este algoritmo restaura cada píxel de la imagen calculando un promedio ponderado de los píxeles circundantes utilizando una medida de similitud

robusta que tiene en cuenta a los píxeles vecinos que rodean al pixel analizado, dando mayor peso a los más cercanos (Buades, Bartomeu, & Morel, 2005), y cuyo valor filtrado para cada pixel se calcula utilizando la ecuación (2-12).

$$NL[v](i) = \sum_{j \in I} w(i, j)v(j) \quad (2-12)$$

donde:

i = pixel analizado

$v = \{v(i) | i \in I\}$ = imagen con ruido

$w(i, j)$ = familia de ponderaciones

Visualmente se puede apreciar la diferencia en filtrado entre los demás filtros y el de medias no locales, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: De derecha a izquierda, de arriba hacia abajo, Imagen con ruido, Gaussiano, anisotrópico, variación total, vecindario y Medias No Locales. Fuente:

Buades, A. Bartomeu, C. & Morel, J. (2005).

2.2 Plan Experimental

2.2.1 Plan experimental principal.

Al ser el presente trabajo de titulación un subcomponente del alcance del proyecto experimental “Evaluation of the nondestructive estimate of the crack density parameter of concrete” dirigido por Juan José Recalde de la Universidad San Francisco de Quito (Ecuador) y el Dr. Luis A. Mata de University of Toledo (EEUU), ver sección 1.1, a continuación se presenta el plan experimental principal de este proyecto.

Se realizaron 4 mezclas distintas, cuyas condiciones se presentan en la Tabla 1, y de cada mezcla se obtuvieron probetas para los ensayos que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 1: Detalle de mezclas.

Propiedad	NC	NF	HC	HF
Resistencia promedio a los 28 días	26,6 MPa	27,2 MPa	41,4 MPa	34,0 MPa
Tipo hormigón	Normal (Comercial)	Normal (Comercial)	Alto desempeño	Alto desempeño
Cementante	100 % Cemento Portland	Cemento con 15 % Ceniza volante tipo F de reemplazo	100 % Cemento Portland	Cemento con 15 % Ceniza volante tipo F de reemplazo

Tabla 2: Probetas de ensayo obtenidas para el proyecto global para cada mezcla.

Ensayo	Tipo de Probeta	Cantidad	Observaciones
Resistencia a la compresión	Cilindro 100x200 mm	2	Edad de ensayo: 28 días
Módulo de Elasticidad Estático a la Compresión	Cilindro 100x200 mm	1	Edad de ensayo: 28 días
N.A. ^a	Cilindro 100x200 mm	3	Para obtención de discos

^aN.A.: No Aplica

De cada una de estas mezclas, de los tres cilindros para obtención de discos, se cortaron 4 discos, dos de 50 ± 2 mm de espesor y dos de 25 ± 2 mm de espesor, tal como se muestra en la Figura 8, descartando las secciones superior e inferior de cada cilindro. De entre ellos, dos fueron expuestos a una temperatura de $450 \text{ }^\circ\text{C}$ por una hora (discos B). Luego todos fueron probados con el método desarrollado por Leming, Nau & Fukuda (1998). Posteriormente, para la obtención de imágenes y análisis, todos los discos de 25 mm fueron cortados en prismas de dimensiones $25 \times 25 \times 75$ mm, y de dichas muestras solo las de dos cilindros fueron enviadas a la escuela de odontología de la Universidad de Michigan, para la obtención de las imágenes de tomografía por rayos-X, como primer paso para la evaluación. En la Tabla 3 se detallan los ensayos previstos para cada uno de los juegos de tres discos obtenidos para cada mezcla.

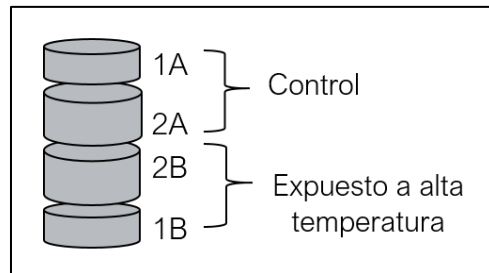


Figura 8: Discos extraídos de los cilindros

Tabla 3: Plan de ensayos en discos.

Ensayo	Especímenes			
	1A	2A	1B	2B
Módulo de elasticidad dinámico de discos (E_d)	A ^a	A	A, D ^b	A, D
Índice de Permeabilidad de Aire (API)	A	A	A, D	A, D
Tasa de Absorción de Agua, según ASTM C1585 (S)	-	A	-	D
Parámetro de densidad de fisuras (ϵ)	A	A	A, D	A, D
Tomografía Computacional 3D por rayos X (3DXRCT)	A	-	D	-

^aAntes de la exposición a $450 \text{ }^\circ\text{C}$

^bDespués de la exposición a $450 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2.2 Matriz de Experimentos.

Para la presente investigación se definió obtener imágenes microscópicas según se detalla en la Tabla 4, mediante los métodos: tomografías de rayos-X (3DXRCT) e imágenes por microscopio óptico (M. O.) y microscopio electrónico de barrido (SEM).

Tabla 4: Plan de obtención de imágenes en especímenes de cada muestra.

Espécimen	Dimensiones aproximadas	3DXRCT	SEM	Microscopio Óptico
1A	25x25x75 mm	Si	Si	Si
1B	25x25x75 mm	Si	Si	Si

2.3 Metodología

2.3.1 Micro tomografía 3D (3DXRCT).

Como se mencionó anteriormente, las imágenes de tomografía por rayos-X fueron realizadas por la escuela de odontología de la Universidad de Michigan, quienes proporcionaron dichas tomografías con una resolución de 20 μm /voxel. Con las imágenes proporcionadas se realizará un procesamiento y filtrado de imágenes, a través del software Matlab, probando varios algoritmos de mejoramiento y definición de imágenes o combinaciones de ellos hasta lograr una mejor calidad de imágenes evitando la pérdida de detalle en ellas. Entre los algoritmos a probar están los mencionadas en la sección 2.1.6: Gaussiano, de vecindario, medias no locales, entre otros.

Una vez obtenido el algoritmo se reconstruirá un modelo tridimensional con la ayuda del software ImageJ, y a partir del mismo se caracterizará el sistema poro-fisura de cada muestra, con ellas se contabilizará volúmenes, radios promedio, áreas planas y perímetros de las fisuras y vacíos.

2.3.2 Microscopio electrónico de Barrido (SEM).

El microscopio electrónico de barrido utilizado es el JSM-IT300 InTouchScope SEM de la empresa JEOL, mismo que tiene una magnificación de hasta x300000, pistola de electrones completamente automática, capacidad de bajo vacío de hasta 10 Pa en el cual se puede llegar a una resolución de 4 nm (30 kV), entre otras cualidades (JEOL, s.f.).

Para la obtención de imágenes, en primer lugar, se calibrarán los parámetros a utilizarse como son la presión, el voltaje dentro de la cámara de muestras, la magnificación, entre otros. Con las condiciones mencionadas se realiza un barrido de imagen. Las imágenes, se filtran en el software Matlab mediante el algoritmo obtenido, como se mencionó en la sección 2.3.1 pero para imágenes planas, y posteriormente se contabilizará las microfisuras observadas.

2.3.3 Microscopio Óptico.

El microscopio utilizado es de tipo óptico invertido, de marca Nikon, modelo ECLIPSE MA100 con una cámara digital integrada.

Para una buena apreciación de la imagen se debió preparar la muestra según se indica en la Tabla 5. Posteriormente se enfocará una zona de la muestra, y con ayuda de la cámara digital integrada se tomarán fotografías de varios lugares de la muestra. Estas imágenes, serán procesadas mediante el algoritmo de filtrado para imágenes planas y luego se contabilizará las microfisuras observadas.

Tabla 5: Procedimiento de pulido para preparación de muestra

Pasos	1	2	3	4	5	6
Abrasivo	240 grit	320 grit	400 grit	600 grit	15 μ	9 μ
Método	Arrastrar la muestra 20 veces en ambos sentidos					
Tiempo	Aproximadamente 1 minuto					
Refrigerante	Agua					

2.4 Resultados

2.4.1 Micro tomografía 3D (3DXRCT).

Luego de varias pruebas con los algoritmos mencionados en la sección 2.1.6, como se esperaba, se encontró un mejor desempeño en el filtrado por medias no locales (NLM), explicado en la sección 2.1.6.1, pues a pesar de que el algoritmo conlleva un tiempo elevado de ejecución debido a la cantidad de píxeles a evaluar, los resultados reflejan una menor pérdida de detalle y definición de las diferentes partes de la estructura del hormigón; en combinación a dicho algoritmo, se realizó una ecualización adaptativa de imagen con el fin de dar un mayor contraste y brillo sin alterar los resultados. En la Figura 9 se muestra el detalle de estos dos procesos tanto en escala de grises como en mapa de calor para una mejor apreciación de los cambios realizados, y en la Figura 10 se presenta el código de programación base utilizado en lenguaje Matlab.

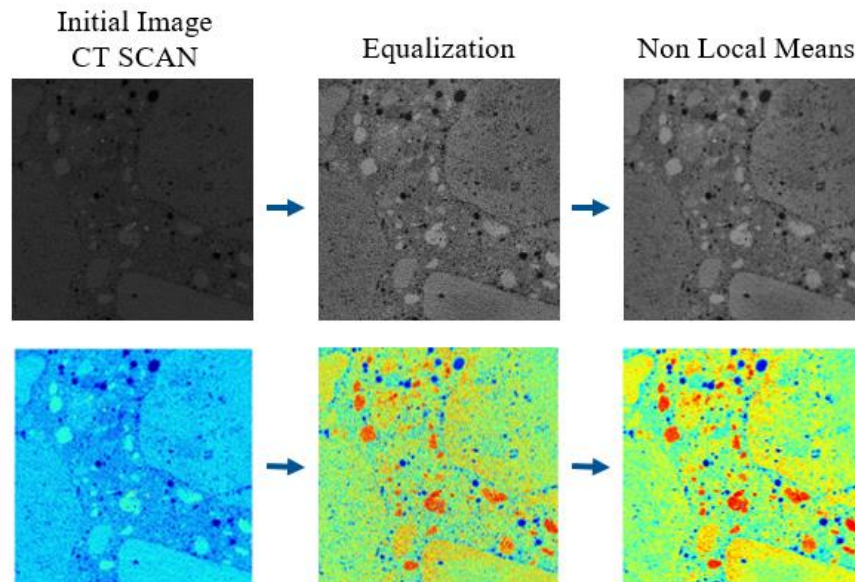


Figura 9: Ejemplo de procesamiento de imágenes de tomografía por rayos-X. Imágenes superiores en escala de grises e inferiores en mapa de calor. Muestra NC51B, cada imagen es de 800x800 píxeles (16x16 mm).


```

A=SlicesStack;
for i=1:size(A,3)
    Hist(:,:,i)=adapthisteq(Hist(:,:,i),'clipLimit',0.02);
end
D=im2double(Hist);
Options.verbose=true;
Options.filterstrength=0.5;
Options.blocksize=30;

V=NLMF(D,Options);
Binary = 48/255 >= V;

B = imgaussfilt3(D,5);
aridos = 110/255 < B;
F=aridos;
for f=1:size(aridos,3)
    F(:,:,f) = imfill(aridos(:,:,f),'holes');
end

M = Binary;
M(F==1) = 0;
tiffWrite(M,'HC41A.tif');

```

Figura 10: Código base utilizado en lenguaje Matlab. Ejemplo para muestra HC41A.

A contraparte, se encontró que la resolución de las fotografías no fue la suficiente para mostrar las microfisuras, ni los capilares existentes en la matriz del hormigón, por lo cual se decidió solo caracterizar el aire atrapado y aire añadido existente en la pasta de hormigón. Se binarizaron las imágenes, se eliminó la porosidad de los agregados y se reconstruyó los modelos 3D. El volumen de cada modelo se definió como un cubo de 750 píxeles de arista (15 mm). La Figura 11 muestra un ejemplo de imagen procesada, mientras la Figura 12 muestra un ejemplo de modelo volumétrico reconstruido. En el Apéndice A (contenido digital) se pueden encontrar la totalidad de modelos e imágenes procesadas.

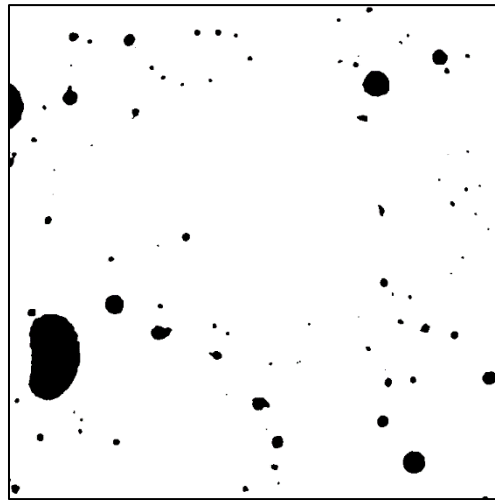


Figura 11: Ejemplo imagen binarizada. Muestra HC51A, 750x750 pixeles (15x15x15 mm).

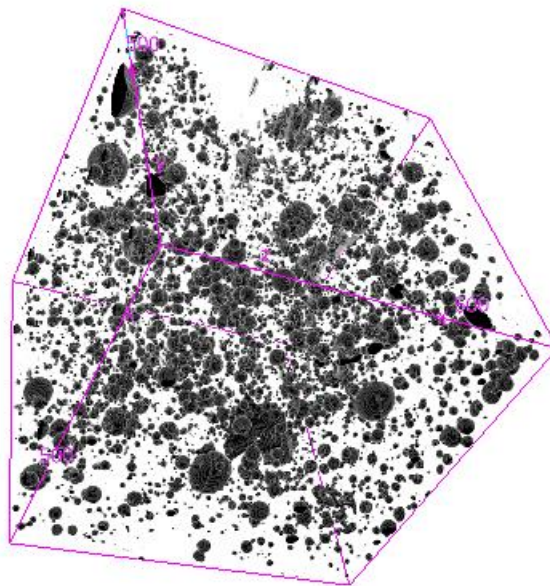


Figura 12: Ejemplo de modelo 3D de porosidad en hormigón. Muestra HC51A, 750x750x750 pixeles (15x15x15 mm).

Una vez obtenido el modelo tridimensional, se realizó el conteo de los poros causados por el aire atrapado y el aire añadido en cada mezcla, además de una distribución de los mismos con respecto a su radio medio (\bar{r}), suponiendo a todos como

esferas distribuidas en toda la pasta de la muestra. En la Figura 13 se muestra el histograma que se obtuvo para uno de los especímenes donde se aprecia la distribución de vacíos, limitada hacia la izquierda por la resolución límite de 20 μm por voxel. El resumen de resultados se muestra en la Tabla 6, y en el Apéndice B se muestran los histogramas correspondientes al conteo y distribución de cada muestra.

Tabla 6: Resumen de resultados de conteo de porosidad en muestras.

Muestra	Radio promedio (μm)	Desviación Estandar (μm)	Radio max (μm)	Radio min (μm)	N poros	Volumen Total (mm^3)	Densidad poros ($/\text{mm}^3$)
NC41A	71.34	53.15	1254.70	15.63	11461	3375	3.40
NC51A	70.92	50.43	731.78	15.63	16407	3375	4.86
NC41B	71.25	57.24	1422.17	15.63	9403	3375	2.79
NC51B	74.00	61.01	939.70	15.63	6849	3375	2.03
NF41A	70.74	51.38	526.30	15.63	13516	3375	4.00
NF51A	71.56	53.74	727.03	15.63	14431	3375	4.28
NF41B	73.04	57.83	835.15	15.63	7498	3375	2.22
NF51B	72.53	58.27	819.45	15.63	10625	3375	3.15
HC41A	75.52	59.20	848.92	15.63	8695	3375	2.58
HC51A	74.90	65.25	844.55	15.63	8196	3375	2.43
HC41B	78.51	72.76	1635.79	15.63	5760	3375	1.71
HC51B	73.02	58.58	677.55	15.63	6627	3375	1.96
HF41A	67.54	55.29	1507.28	15.63	7720	3375	2.29
HF51A	70.40	55.24	1051.76	15.63	8740	3375	2.59
HF41B	72.28	54.20	845.56	15.63	12304	3375	3.65
HF51B	73.09	58.74	935.70	15.63	9570	3375	2.84

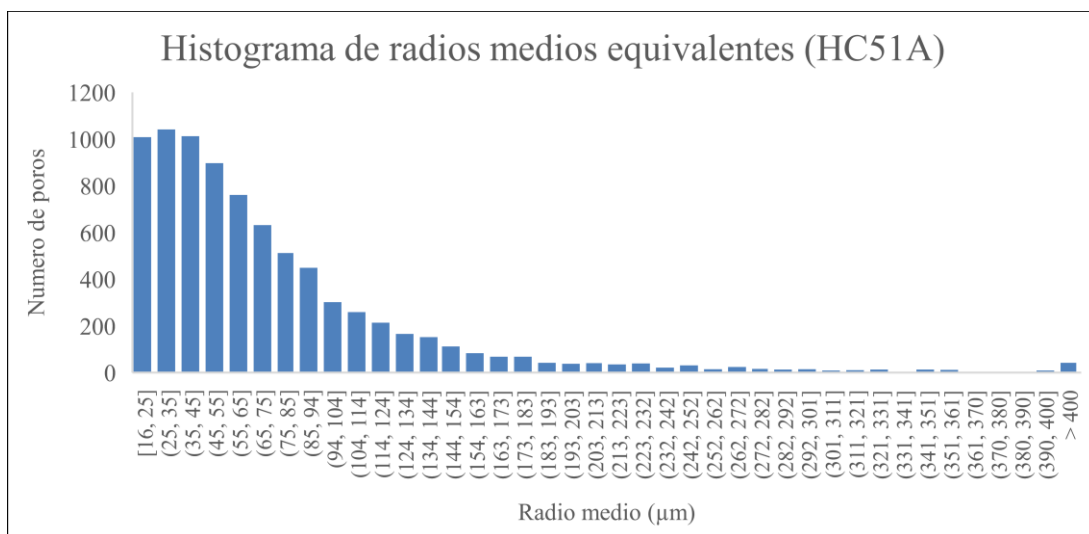


Figura 13: Ejemplo de histograma de distribución de vacíos por radio medio equivalente. Muestra HC51A.

2.4.2 Microscopio electrónico de Barrido (SEM).

Las condiciones calibradas para los especímenes fueron: voltaje de 10 kV, bajo vacío de 100 Pa y magnificación x100. Con las condiciones mencionadas se realizó un barrido de aproximadamente 20 s a una resolución de imagen de 1280x960, dando como resultado una escala de 1 μ m/pixel, resolución donde se pudo apreciar con claridad las microfisuras de cada muestra, como se muestra en la Figura 14.

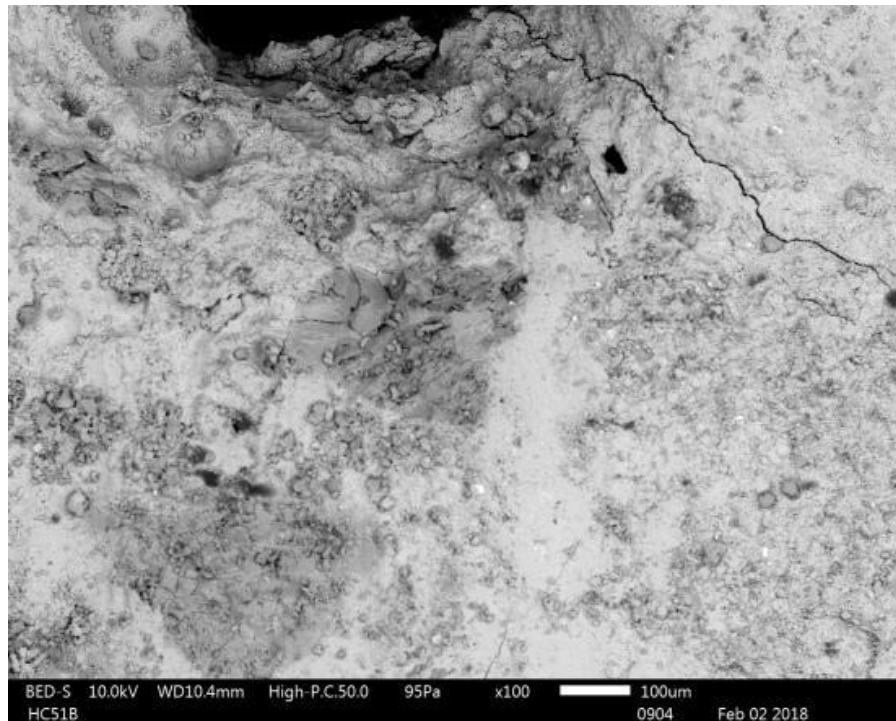
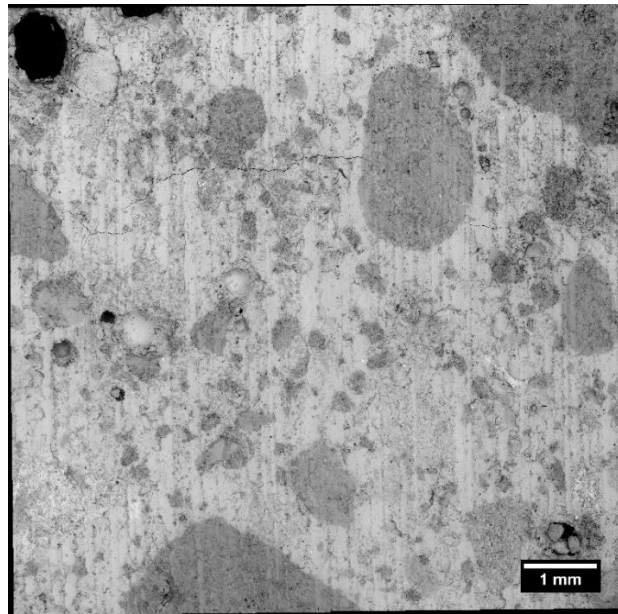


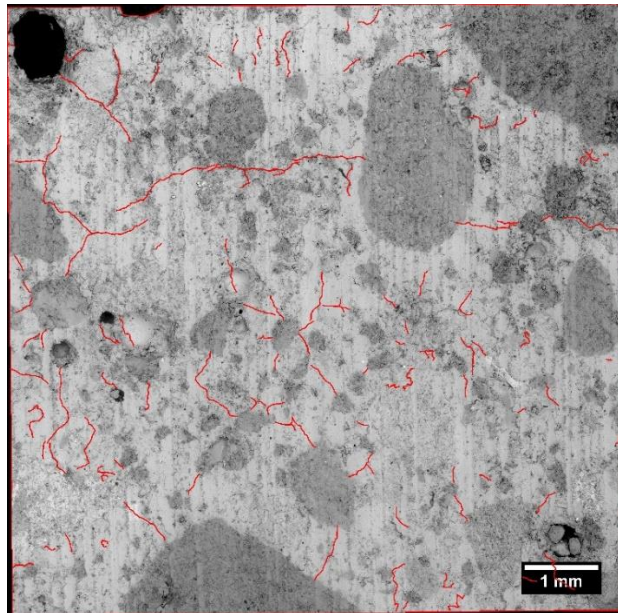
Figura 14: Ejemplo de imagen obtenida por SEM. Muestra HC51B, imagen 2-1.

Para poder abarcar un área significativa se movió la cámara del microscopio siguiendo una distancia fija horizontal y verticalmente para crear una matriz de 8x9 imágenes, mismas que se juntaron para obtener una imagen con un área aproximada de 1 cm², a la cual se procesó mediante el algoritmo de medias no locales (NLM) y se marcó las fisuras halladas. La Figura 15(a) muestra un ejemplo de imagen unida y filtrada, mientras la Figura 15(b) muestra la misma imagen con las fisuras sobrepuestas. En el

Apéndice A (contenido digital) se encuentran el resto de imágenes de SEM tanto unidas y procesadas, como con las fisuras sobrepuestas. En el Apéndice C se muestran las imágenes procesadas con las microfisuras trazadas.



(a)



(b)

Figura 15: Ejemplo de imagen SEM completa. Muestra HC51B. (a) Matriz de imágenes unidas, imagen filtrada (b) Imagen completa con fisuras sobrepuestas.

Con los datos extraídos de las fisuras en cada imagen se obtuvo una estimación del parámetro de densidad de fisuras equivalente de cada muestra, mediante la ecuación (2-11), y se obtuvo una media de los parámetros entre las muestras del mismo tipo y composición, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 7 y graficados para una mejor apreciación en la Figura 16. Además, en la Figura 17 se muestran las gráficas comparativas entre el parámetro de densidad de fisuras equivalente con respecto a la longitud media de fisuras y la densidad media de fisuras respectivamente.

Tabla 7: Resultados de parámetro de densidad de fisuras (ϵ) obtenidos por SEM

Muestra	N	\bar{L} (μm)	\bar{L}_{prom} (μm)	\bar{M} ($1/\mu\text{m}^2$)	\bar{M}_{prom} ($1/\mu\text{m}^2$)	ϵ	ϵ (%)	ϵ_{prom}
NC41A	182	408.51	430.48	2.77E-06	2.05E-06	0.119	11.92	9.47
NC51A	91	452.45		1.33E-06		0.070	7.01	
NC41B	140	408.64	460.71	2.14E-06	1.97E-06	0.092	9.23	10.73
NC51B	106	512.78		1.80E-06		0.122	12.23	
NF41A	169	341.53	347.36	2.38E-06	2.42E-06	0.072	7.16	7.56
NF51A	173	353.20		2.47E-06		0.079	7.95	
NF41B	90	626.73	505.10	1.31E-06	1.65E-06	0.133	13.30	10.44
NF51B	155	383.47		2.00E-06		0.076	7.58	
HC41A	216	313.96	379.00	3.03E-06	2.46E-06	0.077	7.71	8.68
HC51A	133	444.03		1.90E-06		0.096	9.65	
HC41B	79	557.62	478.41	1.19E-06	1.48E-06	0.095	9.51	8.41
HC51B	124	399.20		1.78E-06		0.073	7.31	
HF41A	160	377.86	443.53	2.21E-06	2.18E-06	0.081	8.14	11.29
HF51A	150	509.19		2.16E-06		0.144	14.44	
HF41B	169	350.82	367.35	2.40E-06	2.23E-06	0.076	7.62	7.74
HF51B	140	383.88		2.07E-06		0.079	7.87	

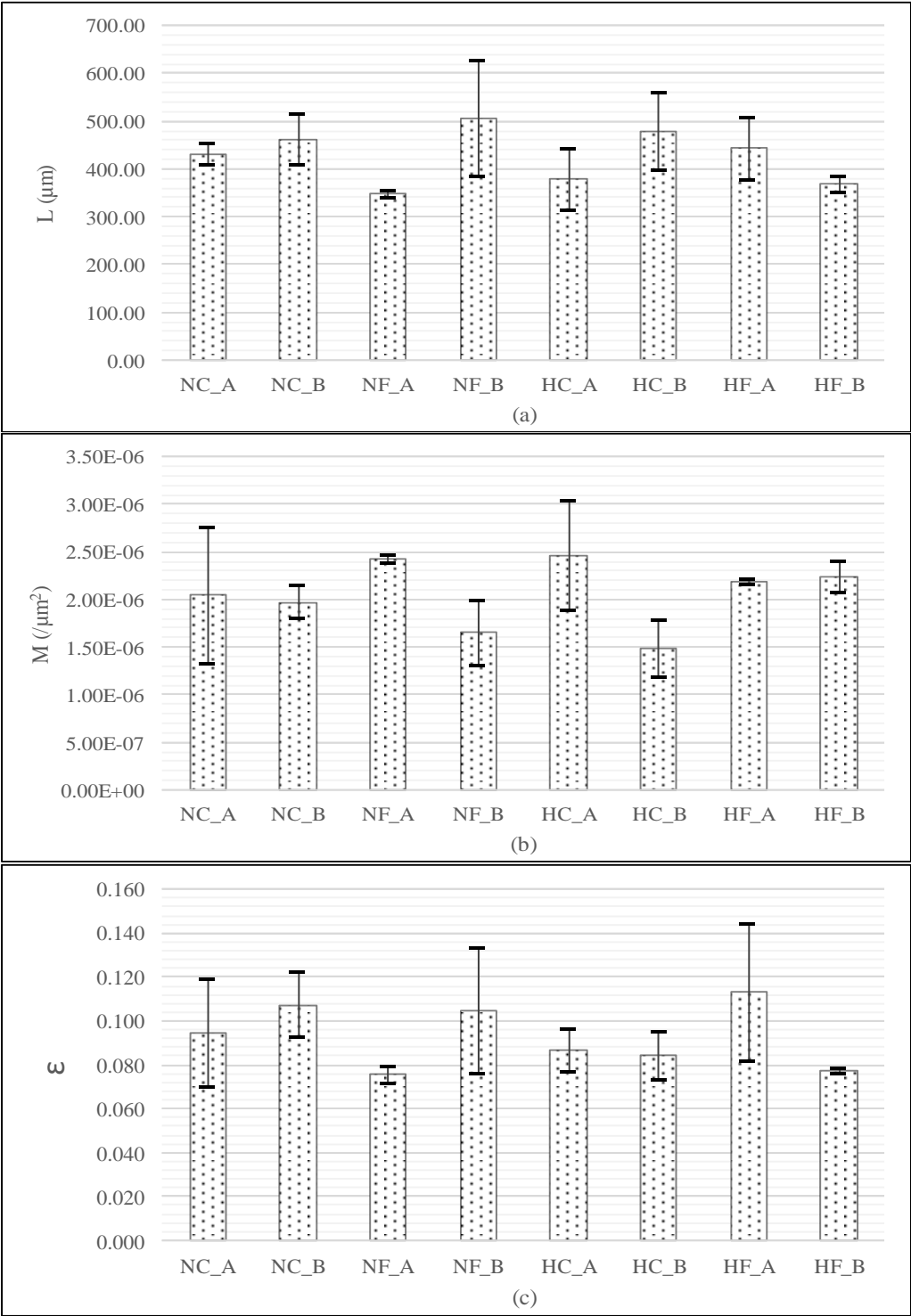


Figura 16: Gráfica de resultados de obtenidos por SEM: (a) Longitud media de fisuras. (b) Densidad media de fisuras. (c) Parámetro de densidad de fisuras, ϵ .

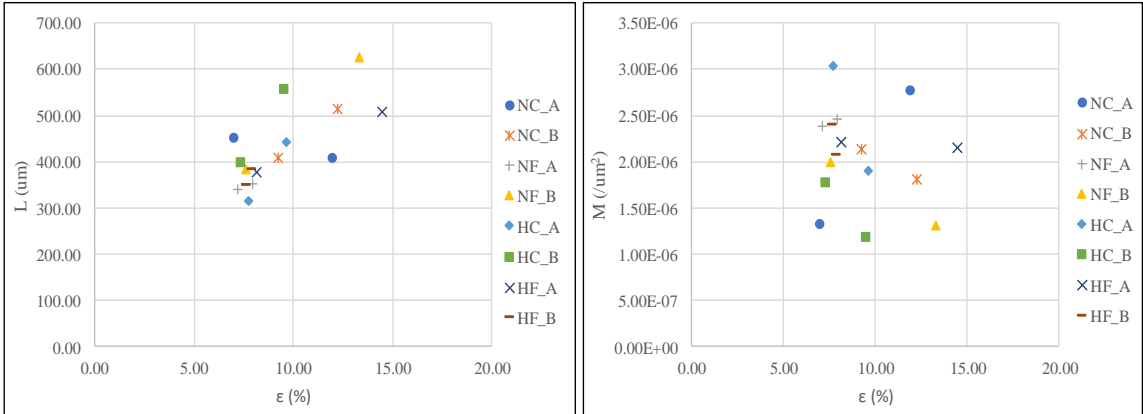


Figura 17: Gráficas comparativas del parámetro de densidad de fisuras vs densidad media de fisuras y longitud media de fisuras.

2.4.3 Microscopio Óptico.

Para la utilización del microscopio óptico, luego de realizar el pulido de la muestra, se inspeccionó la imagen con una magnificación x5 y x20 tratando de buscar el mejor enfoque para la apreciación y conteo de las microfisuras. Un ejemplo de imagen obtenida se muestra en la Figura 18. Observando las imágenes y probando la aplicación de varios algoritmos de filtrado se trató de definir las microfisuras en las imágenes, no obstante, las imágenes no poseían la claridad esperada por lo que se optó por no continuar con la obtención de estas imágenes.



Figura 18: Ejemplo de imagen obtenida por microscopio óptico. Muestra HC51B.

2.5 Análisis

Luego de las diferentes pruebas realizadas con distintos algoritmos de filtrado, se observó un mejor desempeño con el algoritmo de medias no locales (NLM) pues la pérdida de detalle fue mínima y la diferenciación entre pasta, agregados y espacios vacíos fue lo suficientemente consistente como para que se vea con claridad al binarizar las imágenes. Dichas mejoras se pueden apreciar de mejor manera si observamos un histograma de distribución de intensidades. La Figura 19 muestra la aplicación de una ecualización adaptativa para que se amplíe la distribución de intensidades de pixel, y posteriormente la aplicación del algoritmo de medias no locales, donde la distribución llega a cambiar a una que se asemeja mucho a una función de distribución continua.

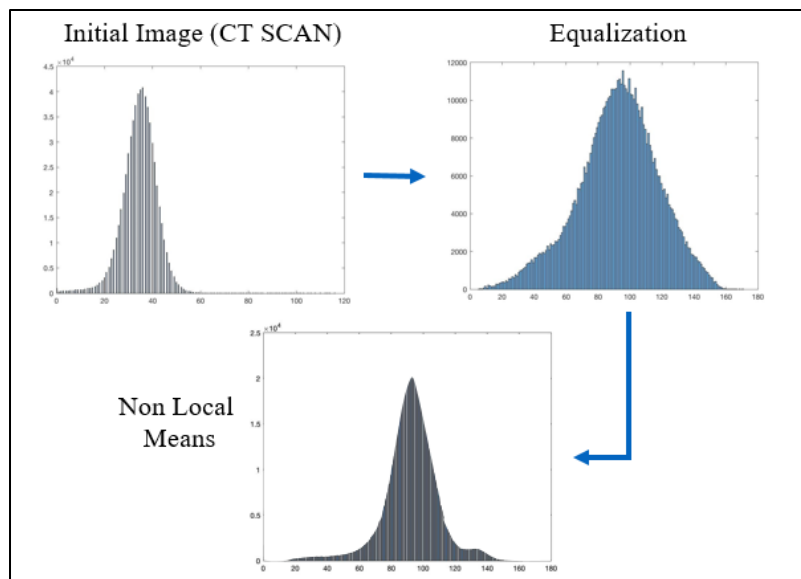


Figura 19: Cambio de los histogramas luego de la aplicación de ecualización y NLM. Muestra NC51B.

La caracterización de aire añadido y aire atrapado, por medio de los modelos tridimensionales, expuestos en el Apéndice A (contenido digital), mostró de manera consistente la distribución de vacíos dentro de cada espécimen, excluyendo los vacíos

dentro de los áridos. Por otra parte, en los resultados expuestos en la Tabla 6, se muestra que los especímenes poseen un radio medio equivalente de vacíos (suponiendo esferas perfectas) de alrededor de 70 μm . Además, las características generales de vacíos y su distribución no varían demasiado entre los diferentes especímenes, como se puede apreciar en los diferentes histogramas del Apéndice B. Todos ellos, indican una clara tendencia hacia los radios medios más pequeños, mientras los radios medios grandes ($>400 \mu\text{m}$) son pocos o nulos, a pesar de que, el radio medio mínimo se ve limitado por la resolución de la imagen (20 $\mu\text{m}/\text{voxel}$).

Los resultados del parámetro de densidad de fisuras equivalente (ϵ) obtenidos a partir de las imágenes de SEM muestran ciertos puntos relevantes. Como se aprecia en las imágenes de la Figura 15 y del Apéndice C, las fisuras aparecen aleatoriamente en toda la superficie del hormigón, pero a diferencia de lo que se esperaba, la zona de transición no contiene la gran mayoría de las mismas, sino más bien una mayor cantidad de microfisuras se distribuyen por la zona media entre agregados, atravesando los espacios vacíos dejados por el aire añadido y el aire atrapado. Así también, en los resultados presentados en la Tabla 7 y expuestos en las gráficas de la Figura 16, se aprecia que los valores del parámetro de densidad de fisuras no son mayores en el caso de las muestras tipo B (expuestas a altas temperaturas) como se esperaría, pues las medias reflejan que ϵ es menor en los especímenes tipo A para hormigón normal (código N), pero por el contrario para hormigón de mayor resistencia (código H) los especímenes tipo B son los que presentan menor ϵ . La posible razón de estos resultados es la aleatoriedad de las fisuras distribuidas en el hormigón, y es muy probable que la región fotografiada

no refleje con claridad lo que está sucediendo en la totalidad del espécimen, más aún con solo dos muestras de aproximadamente 1 cm^2 .

Estadísticamente hablando se puede decir que los datos obtenidos no son concluyentes y que es necesaria una muestra mayor para que pueda estimar lo que sucede con la población total (el espécimen completo). Casos como el de las mezclas tipo NF A o HF B podrían parecer bastante acertados, pues en las gráficas (a), (b) y (c) de la Figura 16 los datos de ambas fotografías convergen, pero de igual forma siguen siendo necesarios más datos que validen esta hipótesis. Por otro lado, las gráficas expuestas en la Figura 17, muestran que para el caso de la longitud media de fisuras podría plantearse una tendencia de aumento del parámetro de densidad de fisuras a medida que aumenta la longitud media de fisuras, fundamentalmente relacionado a su cálculo mediante la ecuación (2-11).

CONCLUSIONES

3.1 Conclusiones de Resultados

Las conclusiones encontradas en la presente investigación son:

- De todos los filtros de imagen utilizados se concluyó que el filtrado por medias no locales fue el que mostró mejores resultados, pues se lograba definir y diferenciar agregados, pasta y vacíos en el hormigón sin perder detalle.
- Se pudo desarrollar un algoritmo de filtrado de imágenes tanto en 2 como en 3 dimensiones para aplicarlo en las imágenes obtenidas por tomografía de rayos-X, microscopio electrónico de barrido y microscopio óptico.
- Se consiguió obtener modelos tridimensionales de las imágenes de tomografía por rayos-X, utilizando primero el algoritmo desarrollado para el filtrado de imágenes y una posterior modelación tridimensional. Debido a la baja resolución solo se pudo caracterizar el aire atrapado y el aire añadido de cada muestra y no las fisuras como se esperaba.
- Se obtuvo imágenes con la ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido de cada una de las muestras obteniendo una matriz de imágenes que se unió y filtró, para luego contabilizar manualmente las fisuras observadas. Las mediciones mostraron las longitudes de cada fisura, y aplicando el modelo de O'Connell & Budiansky (1974) se estimó el parámetro de densidad de fisuras equivalente (ϵ).
- Los resultados obtenidos a partir de las imágenes de SEM no resultaron concluyentes. Se necesita una mayor cantidad de imágenes para validar los

resultados. Las variaciones en los datos se debieron principalmente a la relevancia de las muestras tomadas y a que la cara del prisma en la que se tomó fue distinta en cada muestra, pudiendo afectar a los resultados.

- Las imágenes obtenidas a partir del microscopio óptico no funcionaron para los fines de observación y conteo de fisuras.

3.2 Recomendaciones

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Las tomografías por rayos-X, para fines de apreciación de microfisuras deben tener una resolución mejor que la obtenida, relacionándolas con las imágenes del SEM una resolución de $1\mu\text{m}/\text{voxel}$ o menor sería la indicada.
- Para futuras investigaciones se recomienda utilizar el filtrado de imágenes por medias no locales como base, pero teniendo en cuenta ajustes a los parámetros de filtrado que se necesiten para cada caso.
- Para que los datos obtenidos sean concluyentes, en el caso de imágenes por SEM o microscopio óptico se recomienda tomar varias fotografías en varias caras de cada espécimen para así tener una muestra mayor y por ende representar mejor a lo que sucede en toda la matriz del hormigón.
- Las imágenes obtenidas por microscopio óptico no funcionaron como se esperaba, pero se recomienda probar el uso de fluorescencia para poder apreciar las microfisuras.

LISTA DE REFERENCIAS

- Buades, A., Bartomeu, C., & Morel, J.-M. (2005). A non-local algorithm for image denoising. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2, págs. 60-65.
- Budiansky, B., & O'Connell, R. J. (1974). Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids. *Journal of Geophysical Research*, 79(36), 5412-5426.
- Budiansky, B., & O'Connell, R. J. (1976). Elastic Moduli of a Cracked Solid. *International Journal of Solids and Structures*, 12(2), 81-97.
- Dilek, U., & Leming, M. L. (2008). Elastic Dynamic Young's Modulus and Permeability of Concrete in Fire Damaged Structural Members. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 102-110.
- Dilek, U., Caldwell, T., Sharpe, E. F., & Leming, M. L. (2003). Fire Damage Assessment, Pre-stressed Concrete Double-Tees at Parking Deck. *Forensic Engineering: Proceedings of the Third Congress* (págs. 247-258). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Dilek, U., Leming, M. L., & Guth, D. (2004). Relationship Between Elastic Modulus and Permeability of Damaged Concrete. *Journal of the Transportation Research Board, Concrete TRB(1893)*, 53-60.
- Dilek, U., Leming, M. L., & Sharpe, E. F. (2003). Assessment of Cryogenic Fluid Spill Damage to Concrete. *Forensic Engineering: Proceedings of the Third Congress* (págs. 269-279). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

- Domínguez, A. (1996). Procesamiento digital de imágenes. *Perfiles educativos*, 72.
 Recuperado el 17 de marzo de 2018, de
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13207206>
- EcuRed*. (s.f.). Obtenido de Microscopio Electrónico de Barrido:
https://www.ecured.cu/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido
- Hutchinson, J. R. (1979). Axisymmetric Flexural Vibrations of a Thick Free Circular Plate. *Journal of Applied Mechanics*, 46, 139-144.
- JEOL. (s.f.). *JSM-IT300 InTouchScope™ Scanning Electron Microscope*. Obtenido de
<https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-IT300.html>
- Ketckam, R. (Mayo de 2017). *X-ray Computed Tomography (CT)*. Recuperado el 19 de Abril de 2018, de Geochemical Instrumentation and Analysis:
https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/CT.html
- Leming, M. L., Nau, J. M., & Fukuda, J. (1998). Non Destructive Determination of the Dynamic Modulus of Concrete Disks. *ACI Materials Journal*, 95(1), 50-57.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete : Microstructure, Properties, and Materials* (3 ed.). The Mac-Graw Hill Companies.
- Mundo Microscopio*. (2018). Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de
<https://www.mundomicroscopio.com/>
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete* (4 ed.). Pearson Education.
- O'Connell, R. J., & Budiansky, B. (1977). Viscoelastic Properties of Fluid Saturated Cracked Solids. *Journal of Geophysical Research*, 82(35), 5719-5735.

Ramírez, J. C., Arboleda, C., & McCollough, C. (2008). Tomografía Computarizada por

Rayos-X: Fundamentos y Actualidad. *Revista Ingeniería Biomédica*, 2(4).

Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de

<http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909->

97622008000200008&script=sci_arttext&tlng=en

Recalde, J. J. (2005). *Vibration Characteristics and Use in Concrete Damage*

Assessment. Raleigh, NC: Department of Civil, Construction, and Environmental

Engineering.

Recalde, J. J. (2009). *Estimating Crack Growth in Temperature Damaged Concrete*.

Raleigh: North Carolina State University.

Recalde, J. J., & Leming, M. L. (2009). Changes in Fluid Penetrability and Mechanical

Properties of Concrete Due to High Temperature Exposure. *Journal of ASTM*

International, 6(6), 13.

Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1965). *Principios básicos del Microscopio Electrónico*

de Barrido. Centro de investigación hospital "La Fe".

APÉNDICE A

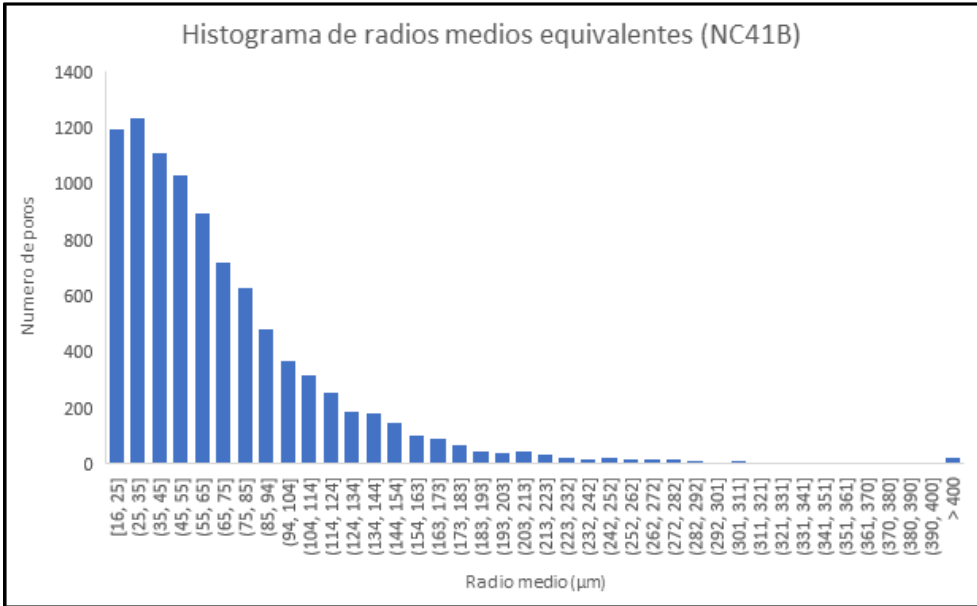
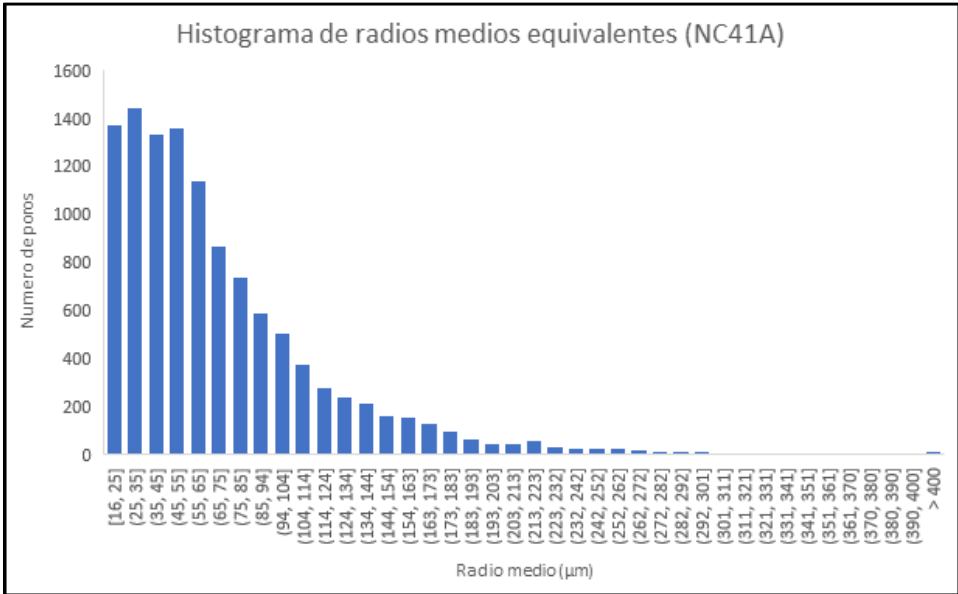
CONTENIDO DIGITAL

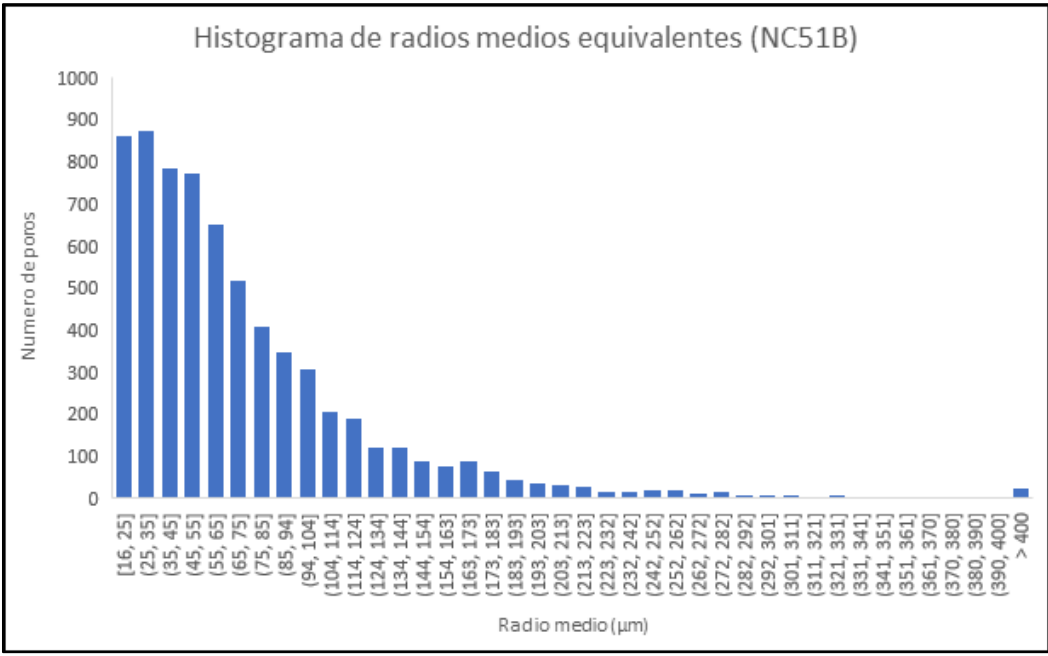
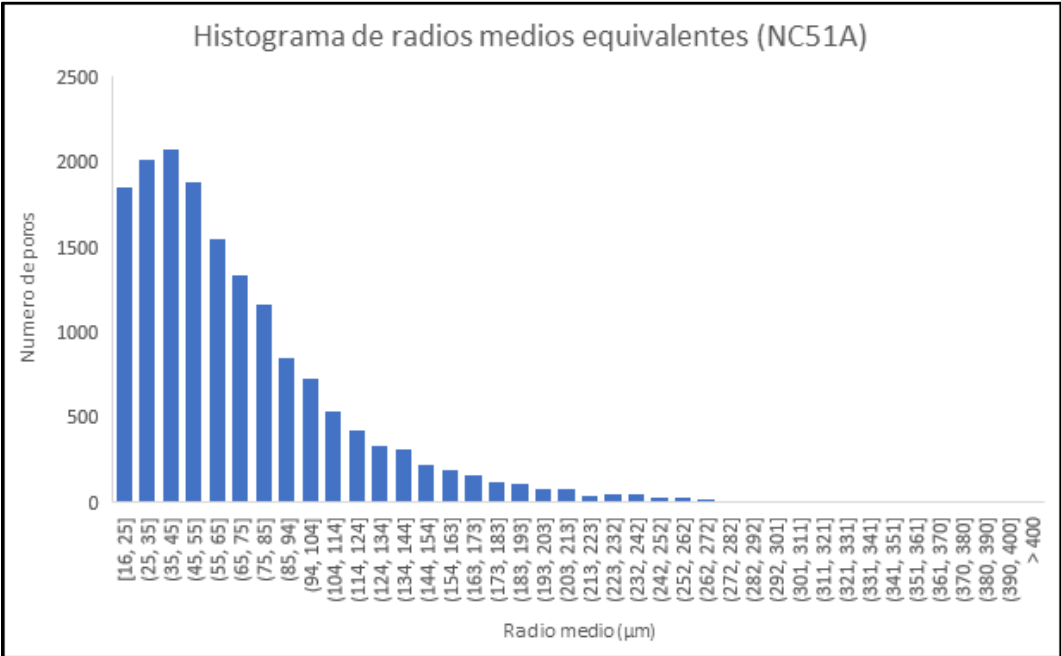
En el CD se encuentran las imágenes obtenidos por Microscopio Electrónico de Barrido, originales y procesadas con fisuras marcadas; y los paquetes de imágenes por tomografías de rayos-X junto a sus respectivos modelos 3D.

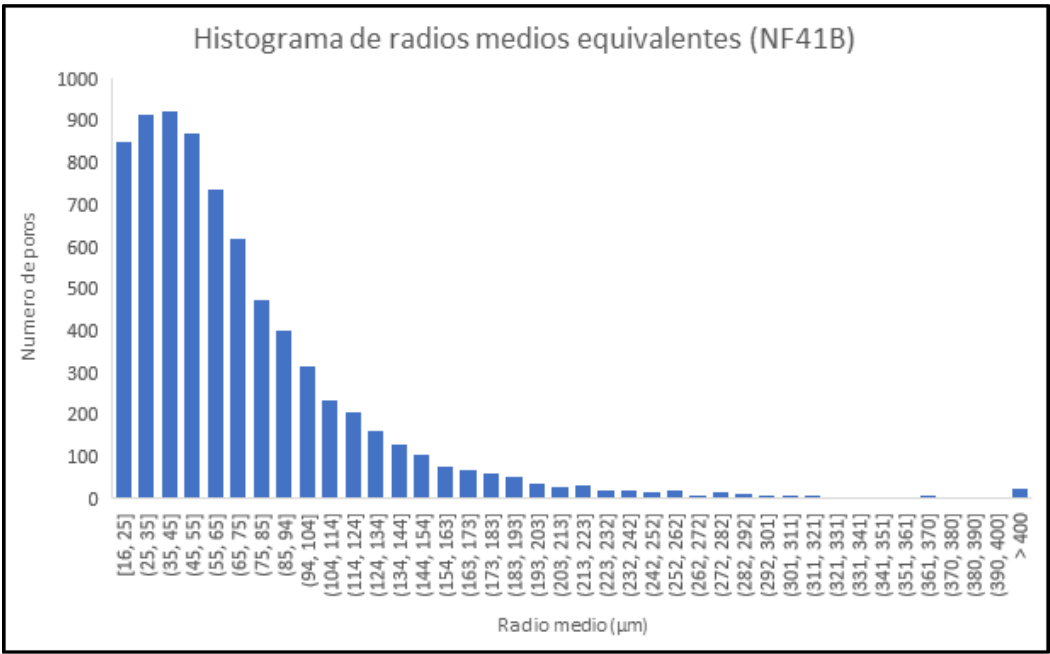
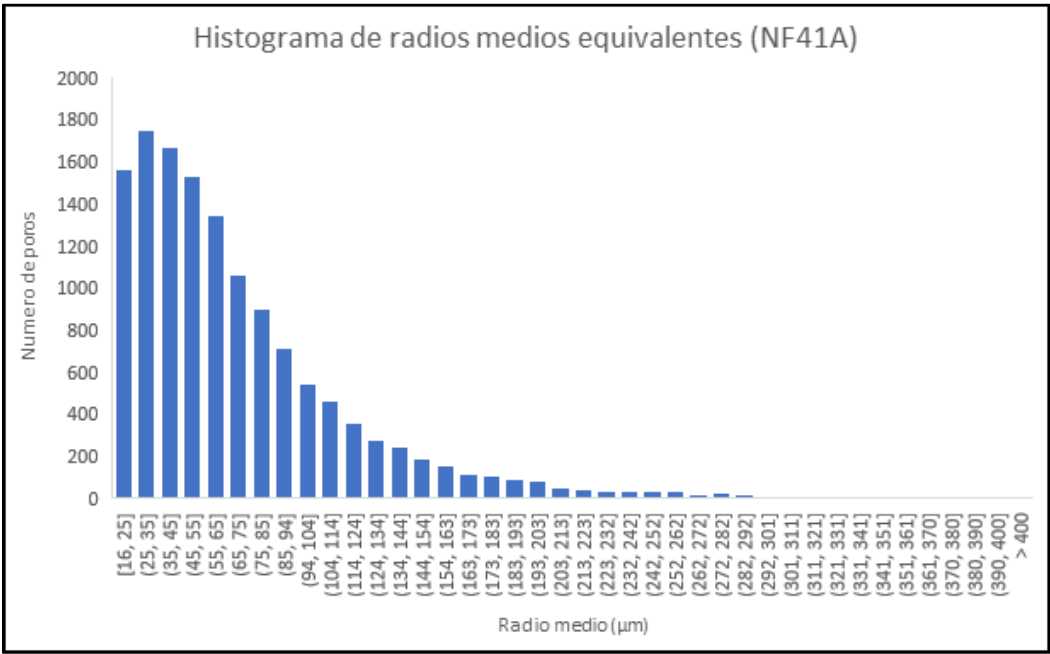
APÉNDICE B

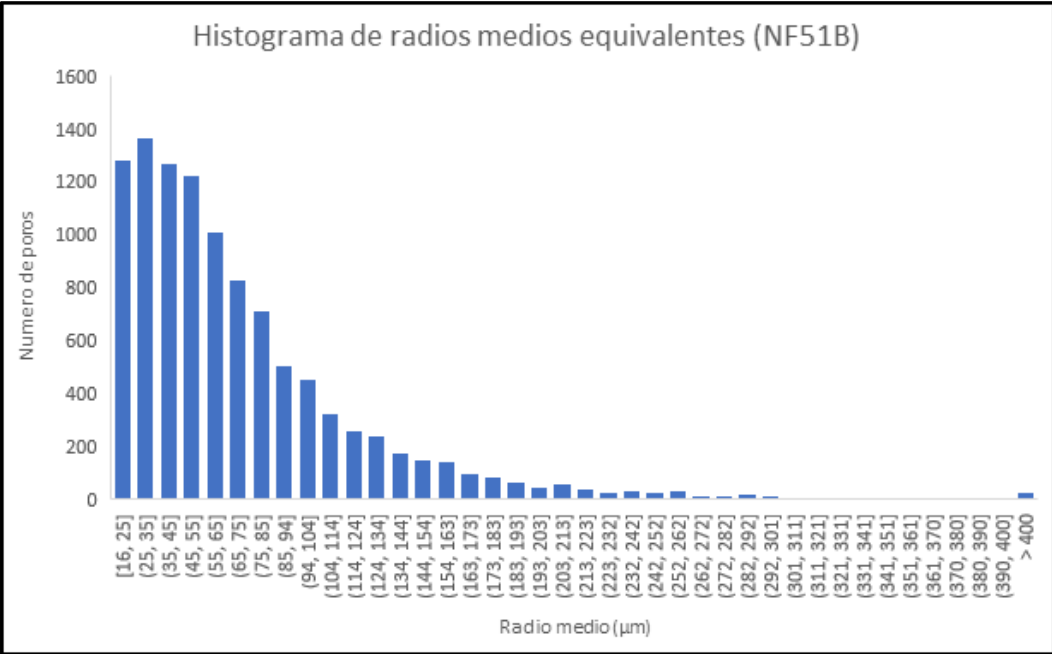
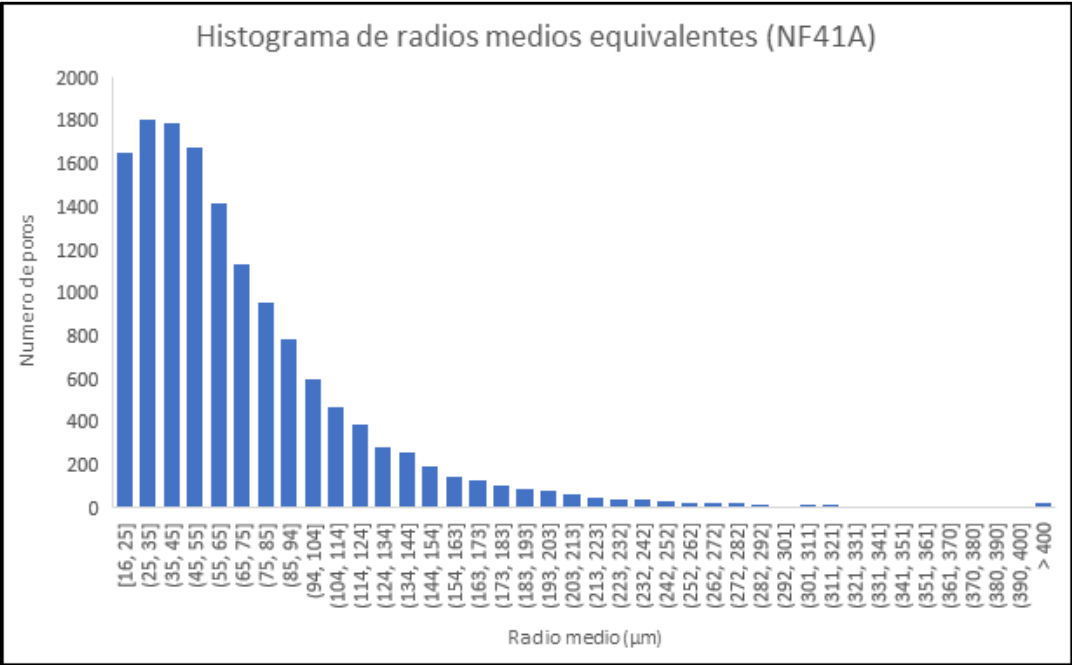
HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN DE VACÍOS

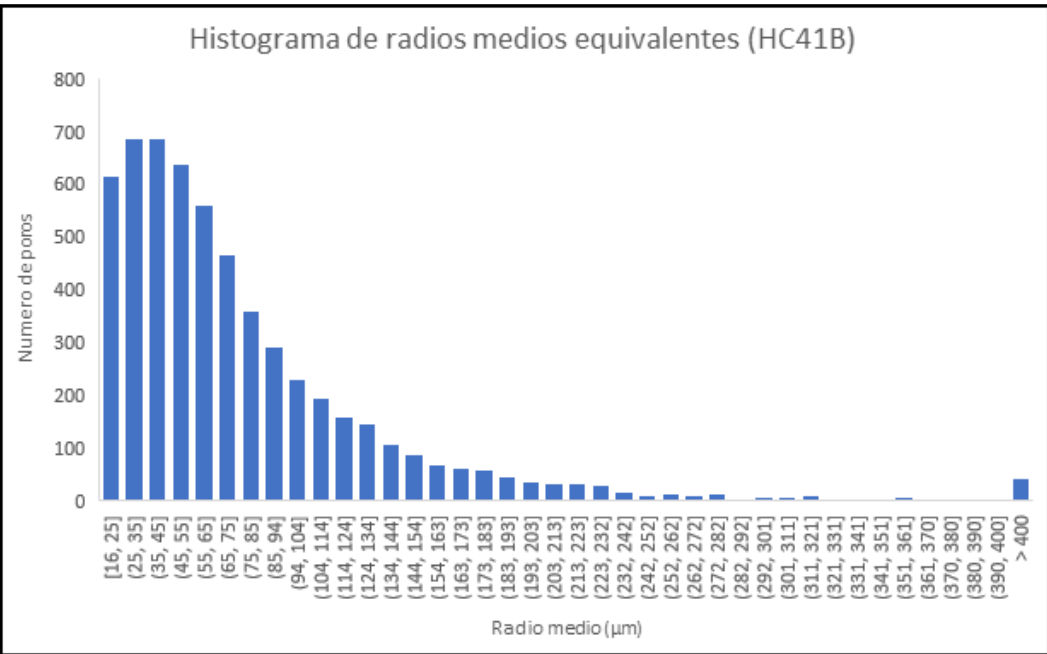
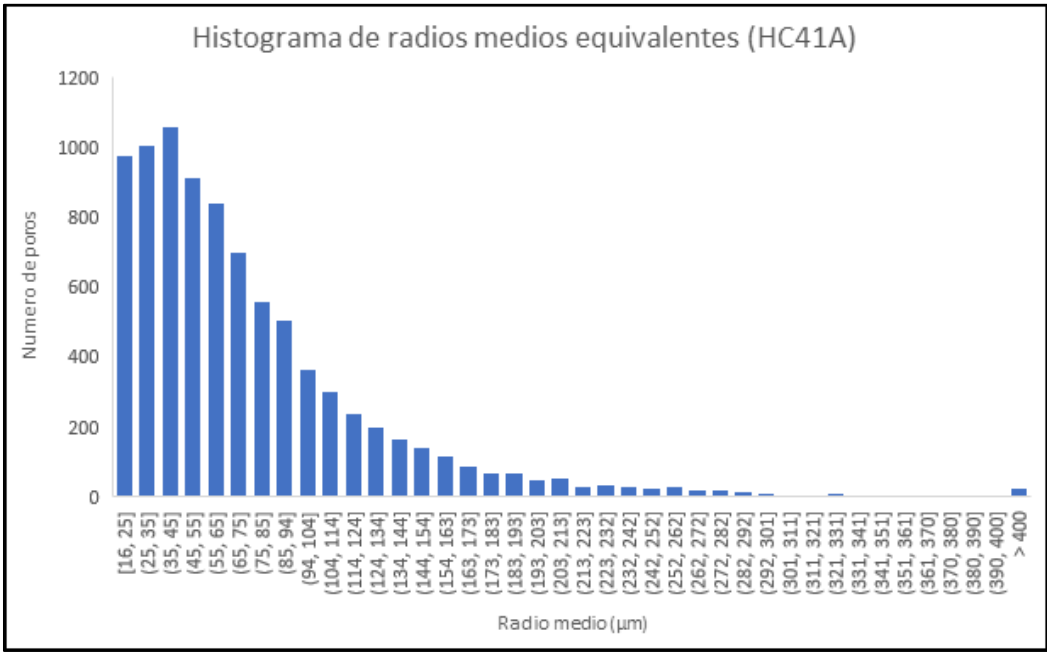
A continuación, se presentan los histogramas de distribución de vacíos obtenidos para cada espécimen en base a su radio medio equivalente en micrómetros.

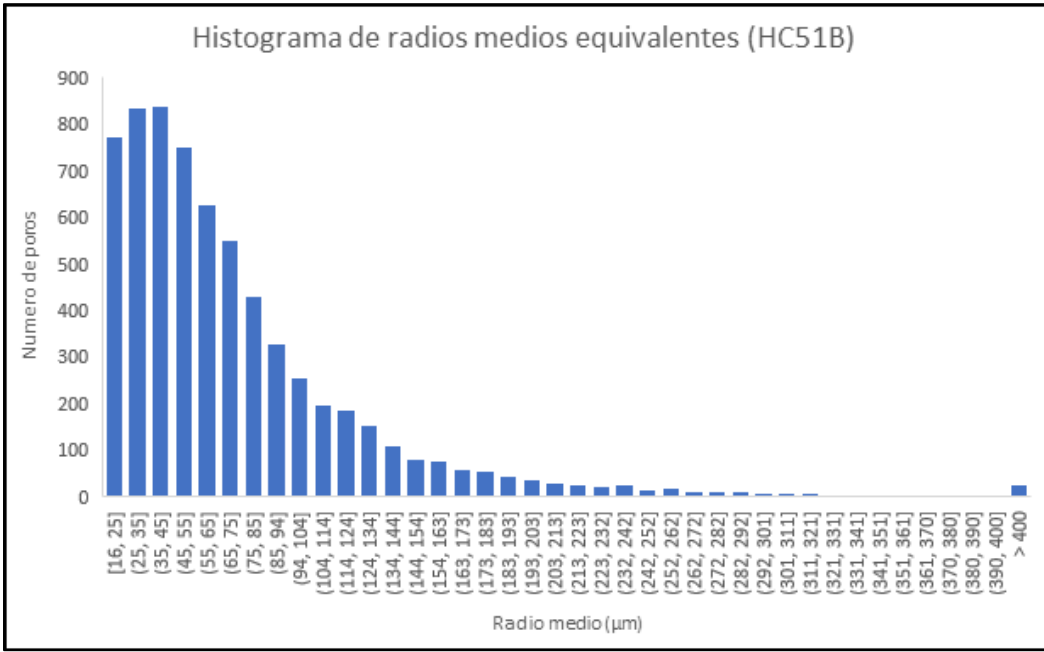
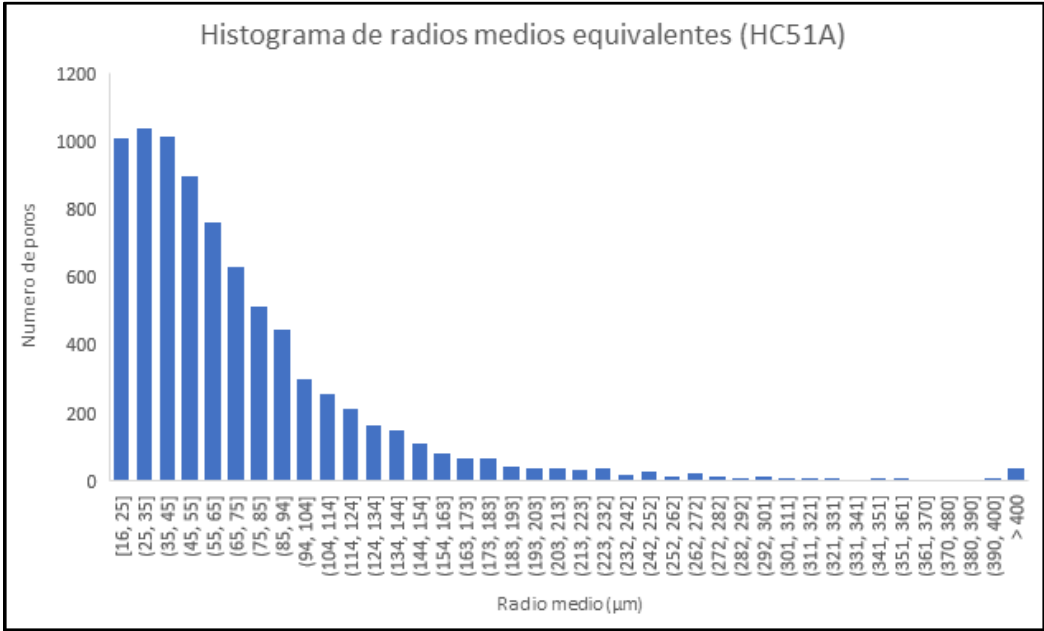


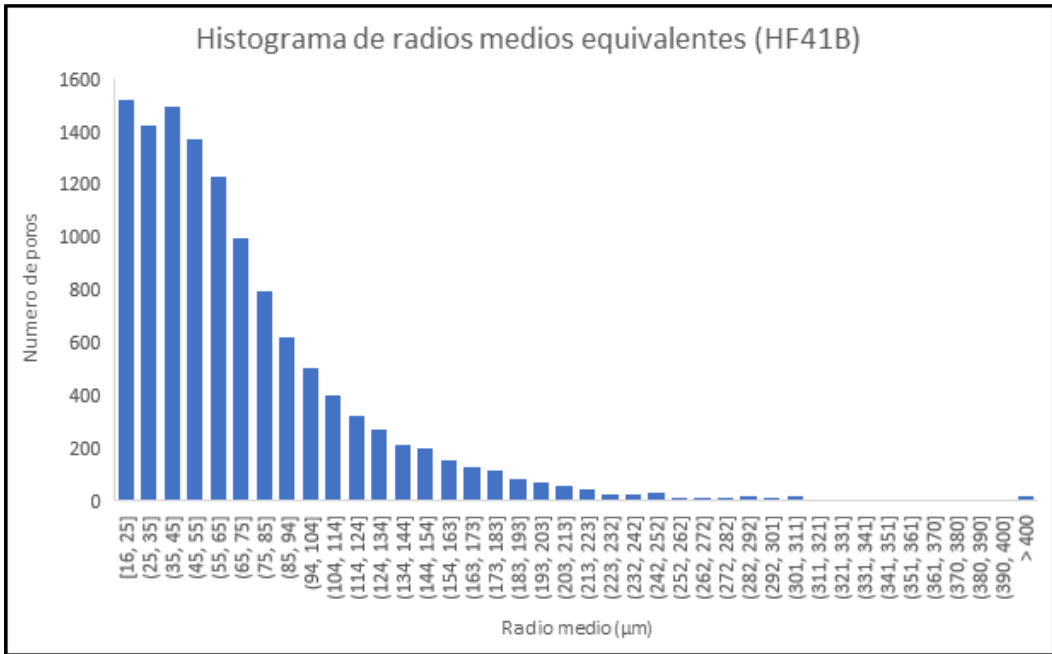
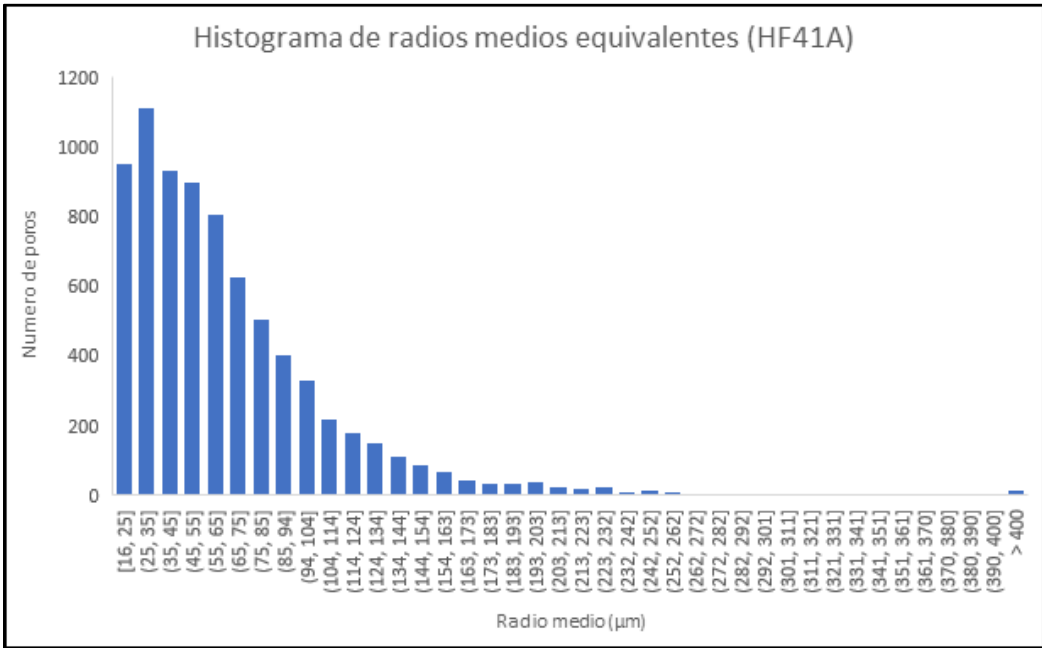


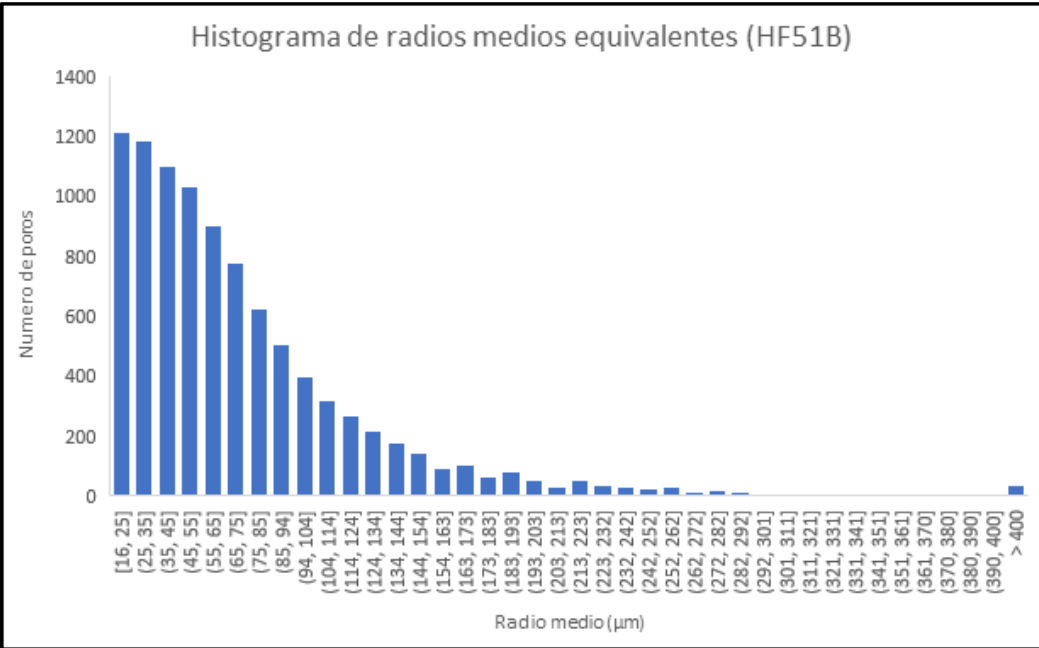
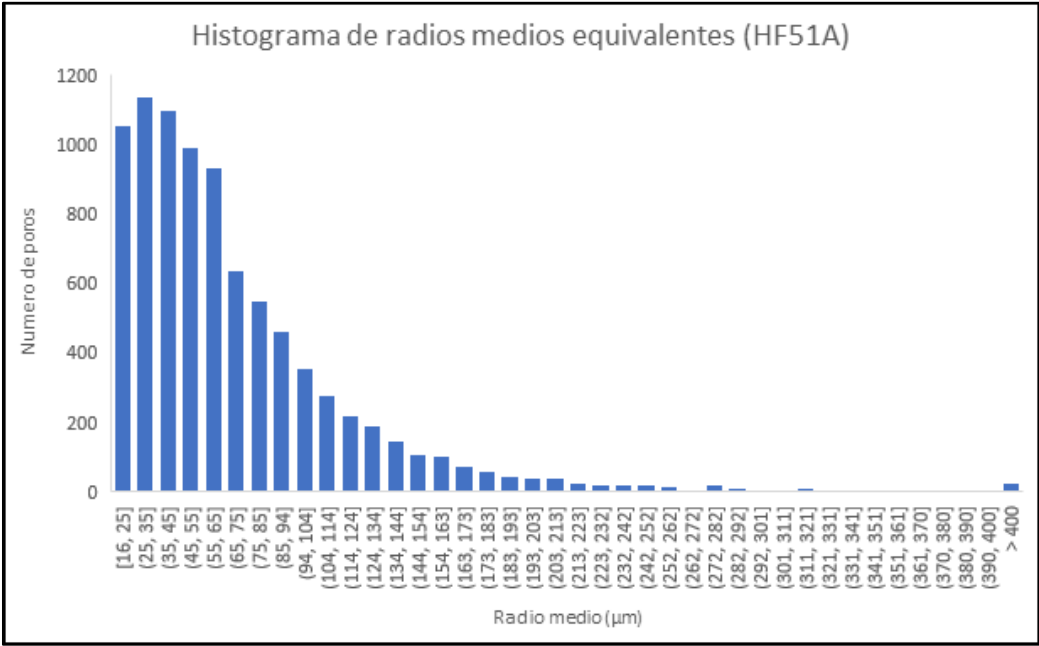








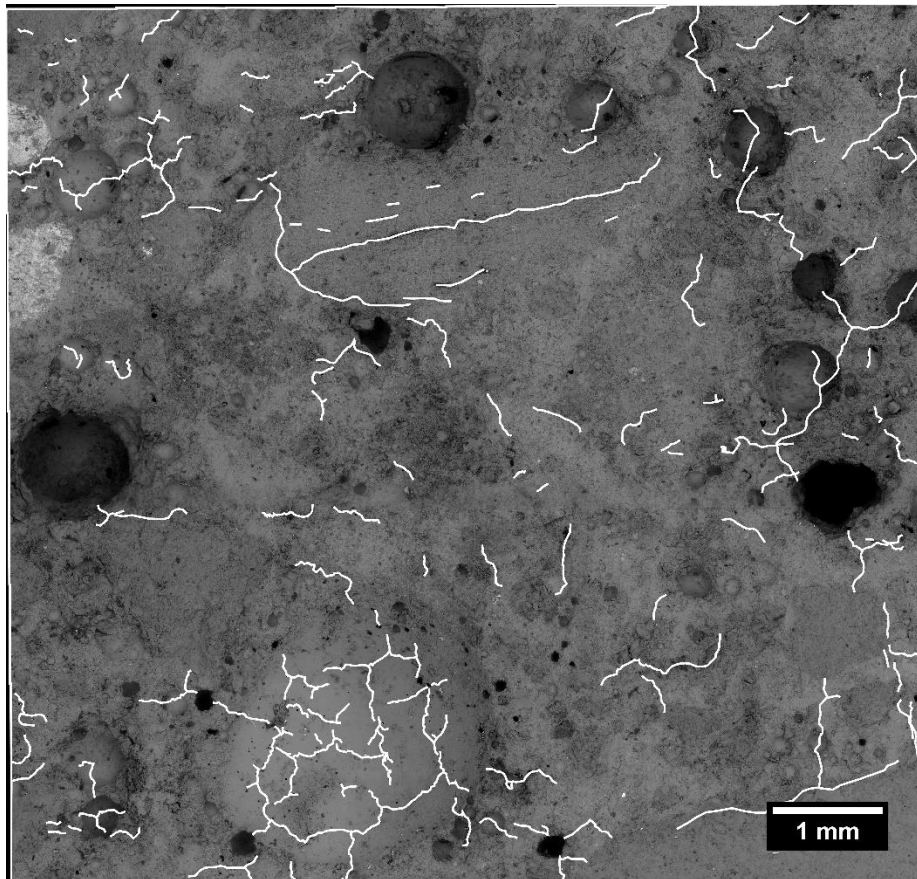




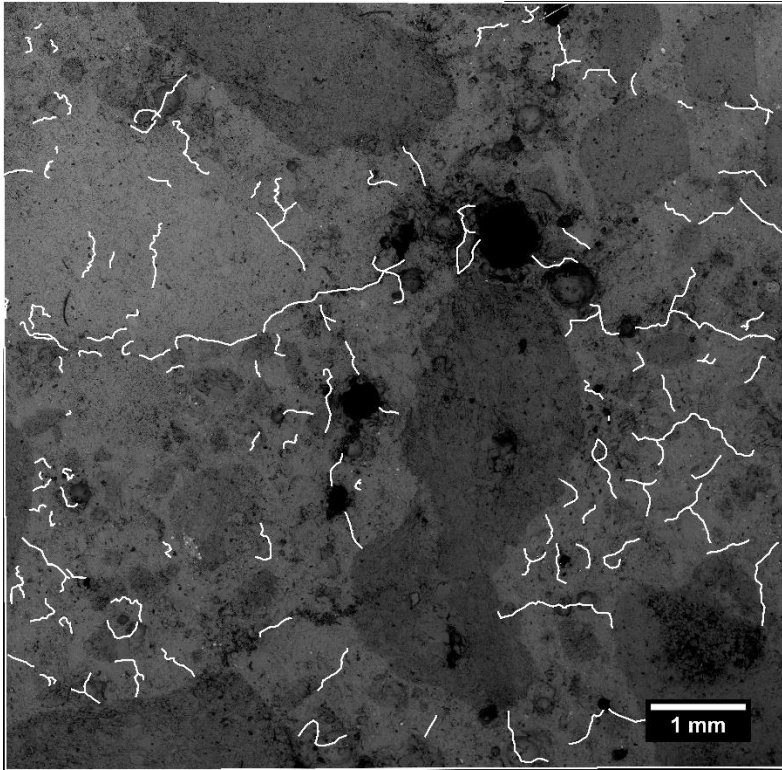
APÉNDICE C

IMÁGENES DE SEM COMPLETAS

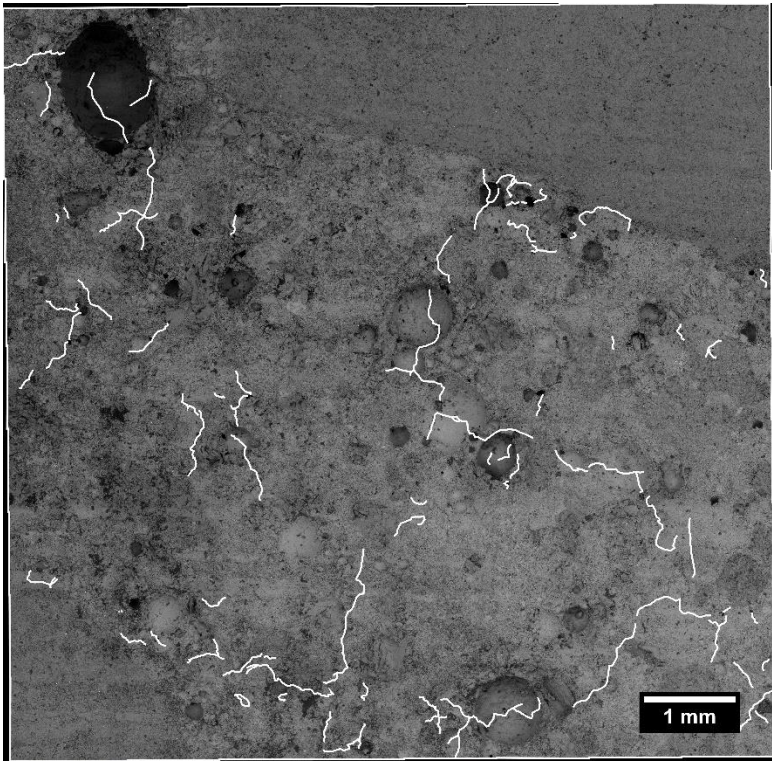
A continuación, se presentan las imágenes obtenidas a través del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), procesadas por el algoritmo de medias no locales (NLM), y con las microfisuras marcadas para cada espécimen.



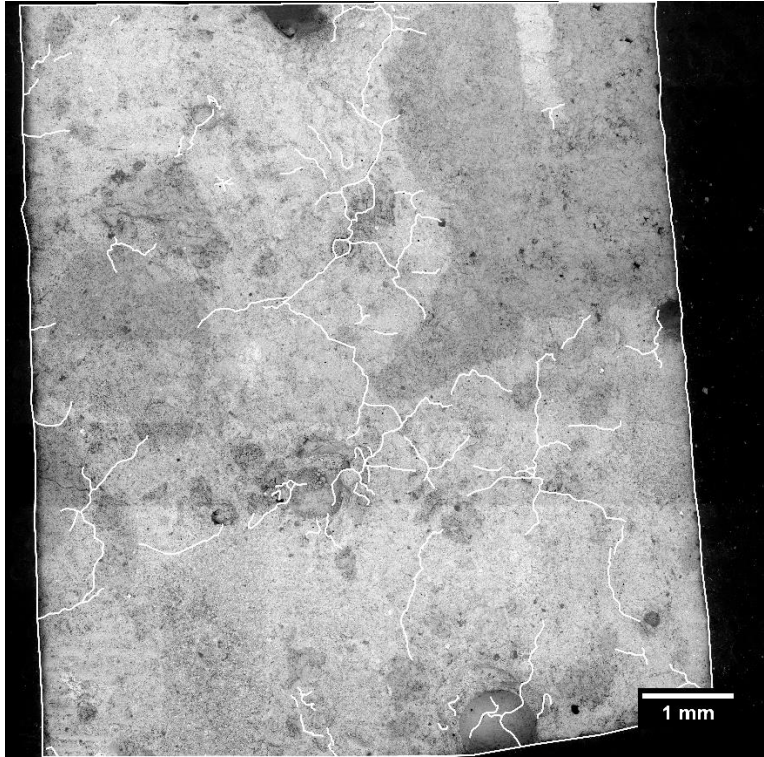
Muestra NC41A



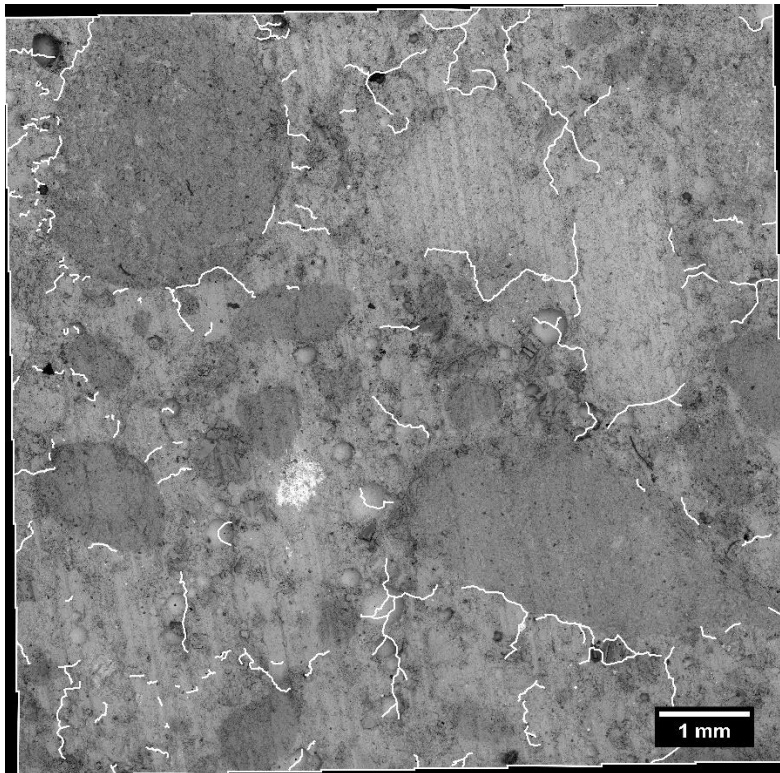
Muestra NC41B



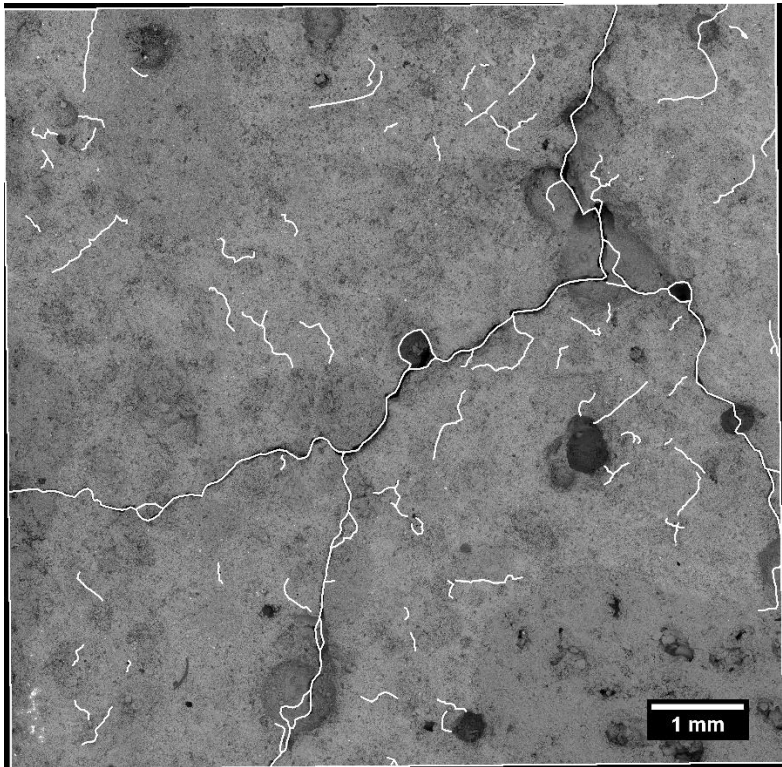
Muestra NC51A



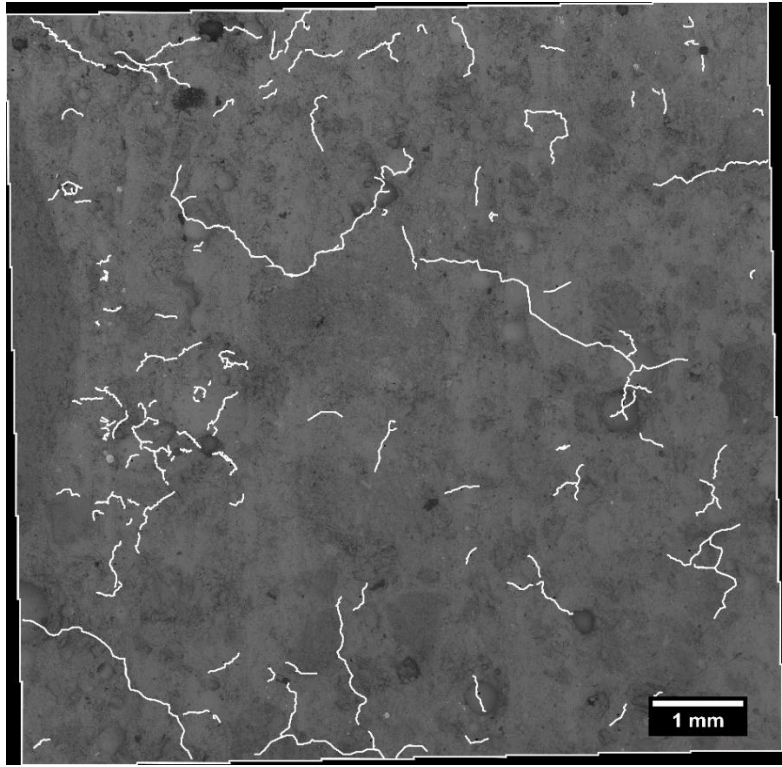
Muestra NC51B



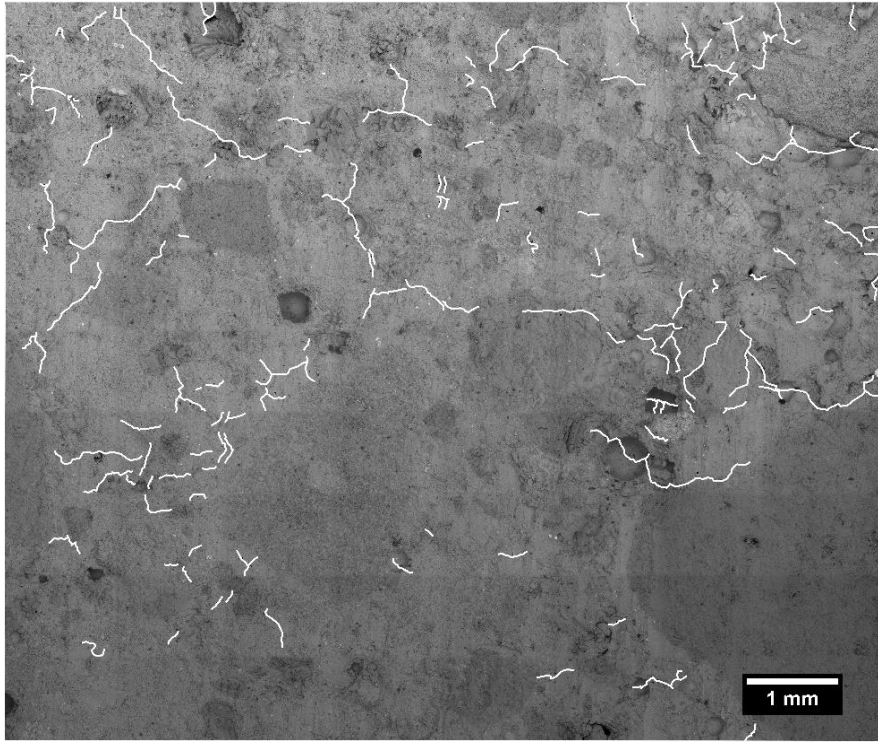
Muestra NF41A



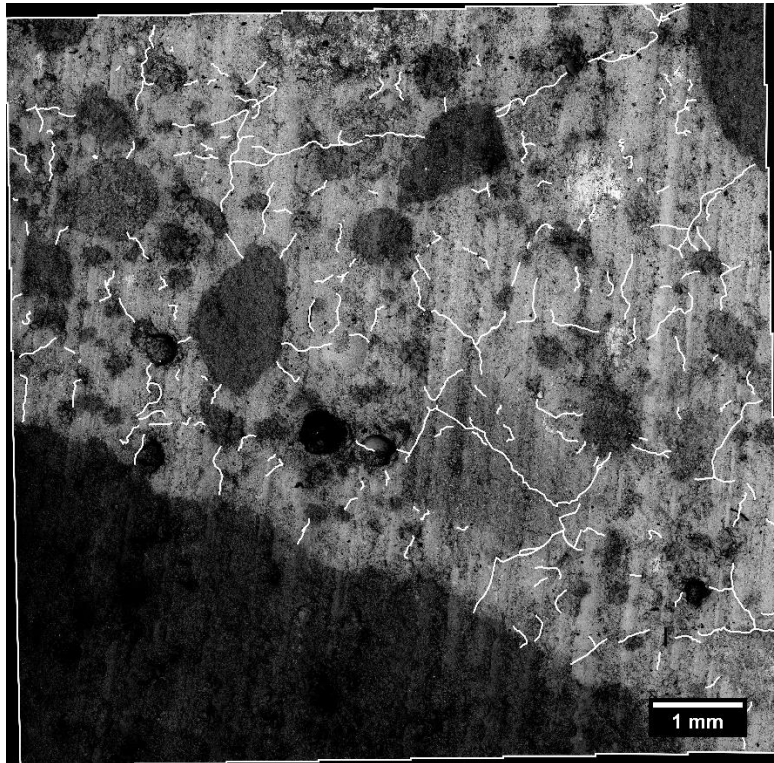
Muestra NF41B



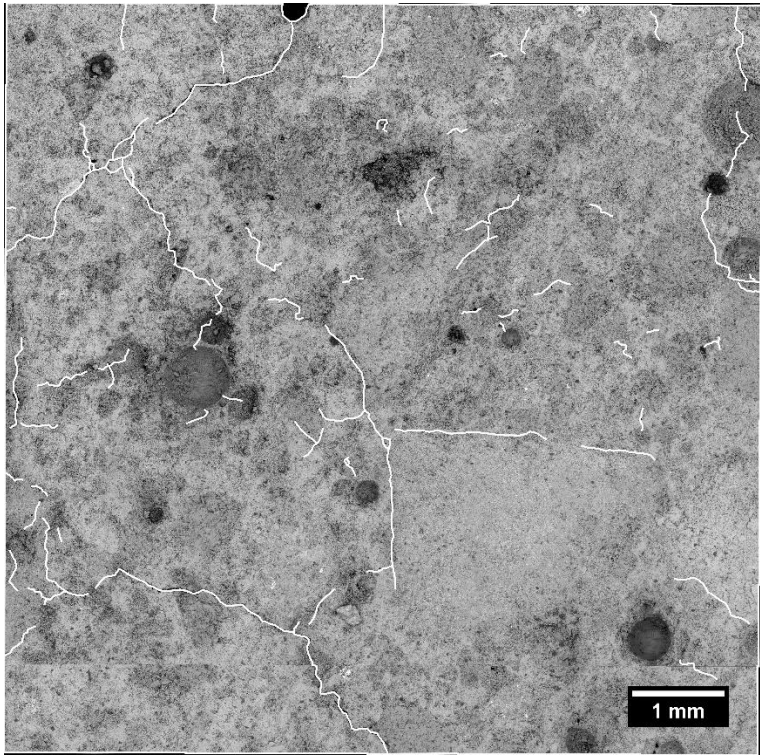
Muestra NF51A



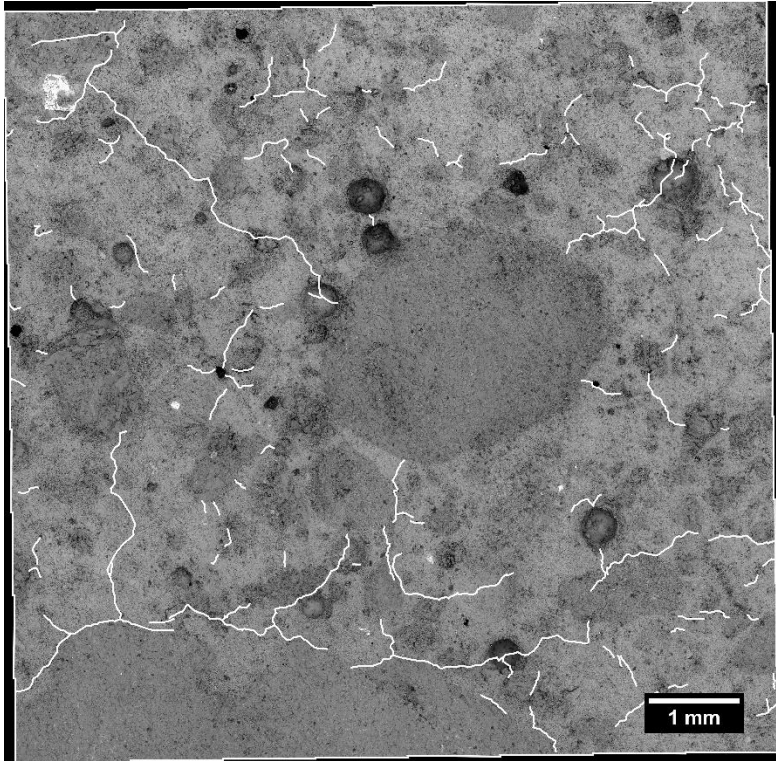
Muestra NF51B



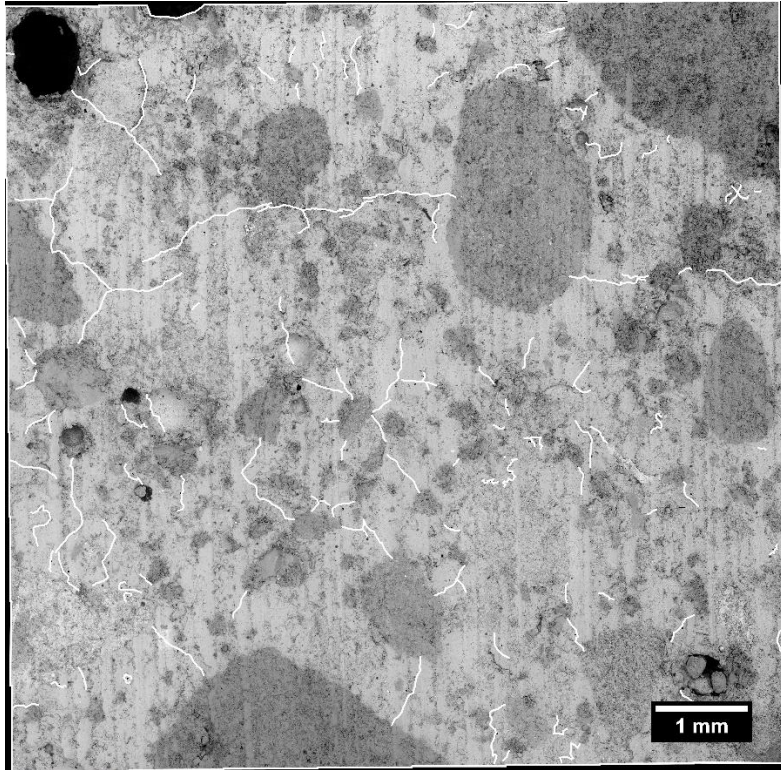
Muestra HC41A



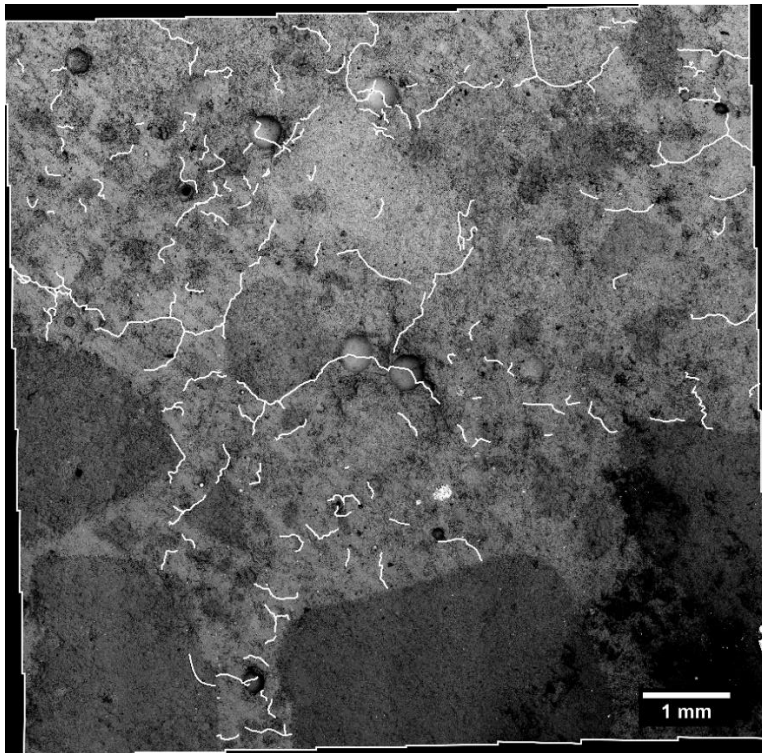
Muestra HC41B



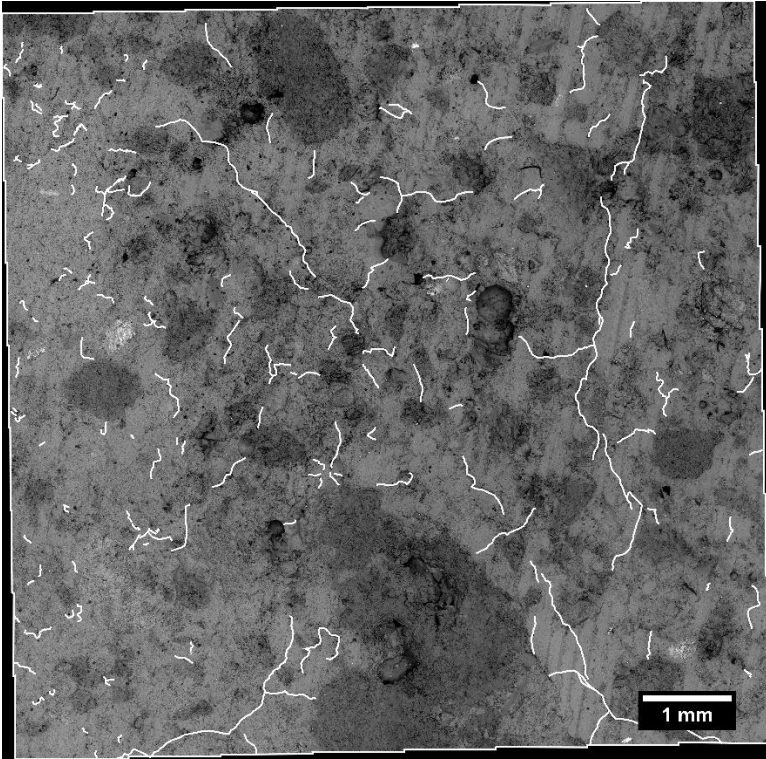
Muestra HC51A



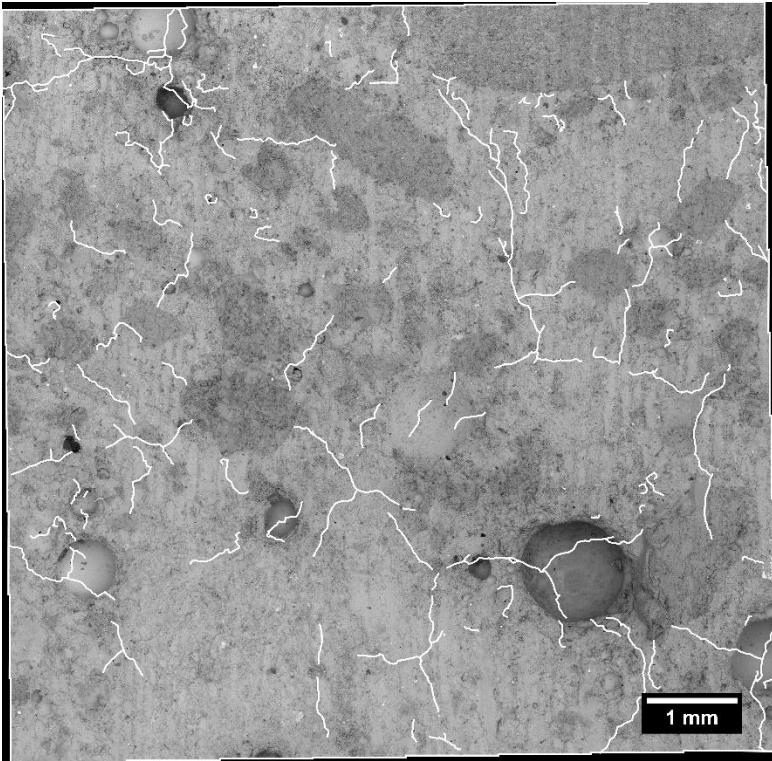
Muestra HC51B



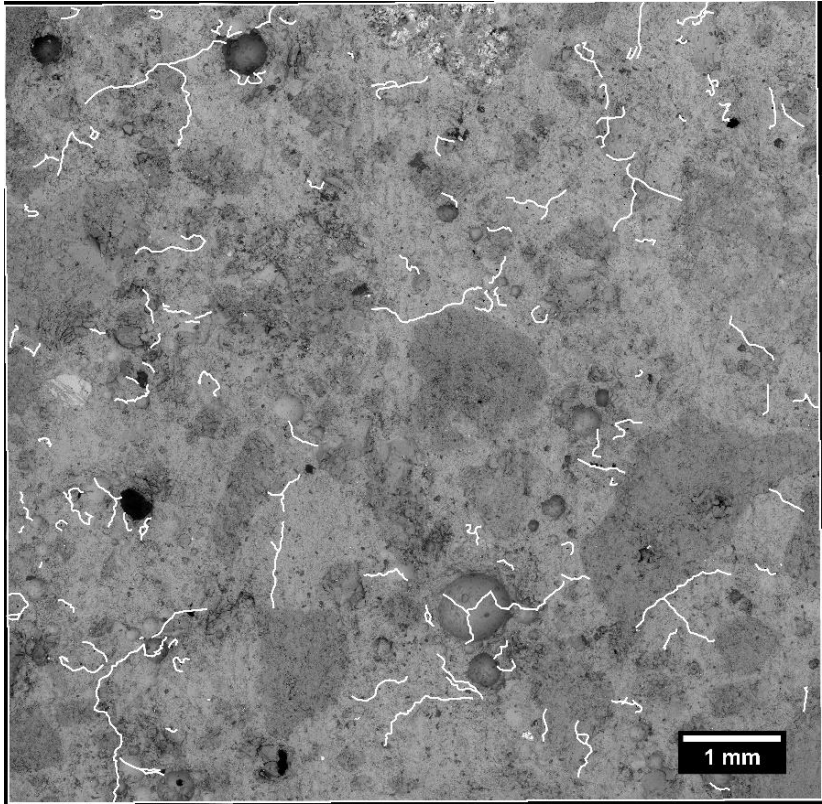
Muestra HF41A



Muestra HF41B



Muestra HF51A



Muestra HF51B