

TOMOGRAFÍA COMPUTADA DE RAYOS X APLICADA A ESTUDIOS DE POROSIDAD EN FUNDICIONES DE ALUMINIO

Martín Felcaro ¹, Felipe Díaz ² y Matías Peralta ³

¹ Departamento de Ingeniería Industrial – UTN Facultad Regional Rafaela
Acuña 49, Rafaela, Argentina - martinfelcaro8@gmail.com

² Departamento de Ingeniería Electromecánica – UTN Facultad Regional Rafaela - CONICET
Acuña 49, Rafaela, Argentina – felipe.diaz@frra.utn.edu.ar

³ Departamento de Validación de Equipos y Componentes – INTI Centro Litoral
Ruta Nacional N°34 km 227, Rafaela, Argentina - meperalta@inti.gob.ar

RESUMEN

La tomografía computada de rayos X es una compleja técnica no-destructiva que, a partir de la generación de una imagen 3D del sólido evaluado, brinda información digital muy precisa tanto de las heterogeneidades como de la geometría de dicho sólido. A modo de ejemplo, este trabajo presenta, empleando esta técnica, una metodología para analizar la porosidad cercana a la zona de fractura en una muestra de fundición de Al-Si, solicitada a flexión de 3 puntos. Un total de 1106 poros fueron examinados en 6 regiones de interés, 2 de las cuales contienen a las superficies de fractura. El software utilizado en el pos-procesamiento de las imágenes obtenidas posibilitó el diseño de una estrategia para analizar y comparar la porosidad en dichas regiones (tanto simétricas como adyacentes), lo cual a su vez permitió evaluar la correlación entre la porosidad y el plano de fractura. Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de los poros examinados tienen valores medios de compacidad (rango de 0,3-0,6). Por otra parte, las regiones de interés que contienen a las superficies de fractura muestran marcadas asimetrías en cuanto al conteo general de poros, y también, en cuanto al conteo de poros de diámetro pequeño. Finalmente, a partir de las imágenes 3D de dichas zonas de interés, es posible advertir que la fractura inicia y se desarrolla en un plano de transición entre una zona de elevada porosidad y otra de menor densidad, siendo dicho plano, necesariamente, aquel cuyo momento de inercia es mínimo.

Palabras Clave: Tomografía Computada; Aleación Al-Si; Porosidad; Fractura.

1. INTRODUCCIÓN

La tomografía computada de rayos X (TC) es una técnica no-destructiva que posibilita evaluar la estructura interna de una componente o muestra, con elevada resolución [1-3]. Esta técnica utiliza un especial software para la generación de un modelo 3D del sólido evaluado y para el pos-procesamiento de los datos obtenidos, posibilitando la evaluación cuantitativa de tamaño, forma, cantidad y distribución espacial de defectos, fisuras, poros y/o inclusiones generadas a partir de diferentes procesos de fabricación.

Por otra parte, las aleaciones Al-Si de moldeo, usadas en la producción de componentes industriales con diferentes niveles de resistencia y tenacidad, brindan un amplio rango de propiedades mecánicas, las cuales dependen de la composición química, las condiciones de fundición, la velocidad de solidificación y el tratamiento térmico [4]. Sin embargo, estas aleaciones pueden contener mayor o menor porosidad, lo cual va en detrimento de dichas propiedades. Es importante destacar que estas dependen, fuertemente, de la cantidad, tamaño, forma, y distribución espacial de los poros. En los últimos años, la TC ha sido una importante herramienta no-destructiva para el estudio de los mismos [5]. Cabe destacar que, a partir del pos-procesamiento de una imagen tomográfica 3D, es posible evaluar las características morfológicas de los poros y, además, el número de los mismos por unidad de volumen, la distribución del tamaño real, las distancias vecinas más cercanas y la estructura de distribución espacial, con elevada precisión.

En este trabajo, la TC se aplica al análisis de una muestra de aleación de Al-Si obtenida por moldeo de arena. Es importante destacar que, durante este proceso, se genera porosidad tanto por burbujas de diferentes gases, atrapadas durante el proceso de solidificación, como por cavidades inter-dendríticas causadas durante la contracción asociada a la solidificación [6].

El estudio de como la porosidad afecta las propiedades mecánicas de las fundiciones de aluminio puede darse a partir de diferentes enfoques. Por ejemplo, analizando la porosidad volumétrica global y/o evaluando la porosidad cercana al plano de fractura. En el presente estudio, se evalúan pequeños volúmenes cercanos al plano de fractura y, además, pequeños volúmenes adyacentes a éstos. En este trabajo, la generación de la fractura fue llevada a cabo a partir de un ensayo de flexión de 3 puntos, sumando, de esta manera, la singularidad de esta sollicitación a los estudios previos llevados a cabo a partir de la sollicitación axial [7].

En los volúmenes mencionados, denominados regiones de interés (ROI), se evaluó la distribución espacial, conteo, tamaño y forma de los poros; se compararon gráficos de dispersión de parámetros de forma versus tamaño, y gráficos de conteo en función del diámetro equivalente. Además, a partir de la distribución espacial de los poros y de los diagramas de momento flector y esfuerzo de corte inherente al ensayo de flexión, fue posible evaluar la influencia de la

porosidad en las secciones transversales más exigidas por la sollicitación externa. Finalmente, este trabajo propone un procedimiento, vía tomografía, que posibilita determinar la resistencia mecánica de componentes con diferentes grados de porosidad, a partir del decrecimiento del momento de inercia (I_z) [8] en las secciones transversales críticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material y ensayo de flexión

La muestra evaluada en este trabajo es de aleación de Al-Si obtenida vía fundición por moldeo de arena. La dimensión longitudinal es de 40 mm y su sección transversal (no uniforme) de $\sim 8,5 \times 7,5$ mm. La Tabla 1 muestra su composición química, la cual fue obtenida usando un espectrómetro de chispa por emisión óptica Brucker (Q4 Tasman).

Tabla 1. Composición química de la aleación investigada

Composición química (% peso)								
Al	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ti	Cr
Base	5,23	0,66	0,59	0,36	0,36	0,14	0,05	0,03

Dicha muestra fue ensayada a flexión de 3 puntos hasta su fractura, empleando una prensa hidráulica AMOB Group (PH4C 60T). La Figura 1 muestra una representación esquemática de dicho ensayo. La carga de rotura resultó ser $P = 784$ N. Cabe destacar que, la flexión de 3 puntos genera tanto momento flector (M) como esfuerzo de corte (Q) [8] en las secciones transversales de la muestra entre ambas cargas $P/2$. M , a su vez, genera compresión en la mitad superior de la muestra y tracción en la mitad inferior. Por lo tanto, la tensión normal que produce la fractura de la muestra será compresiva si la misma ocurre en la mitad superior, o bien de tracción, si ocurre en la mitad inferior. Por otra parte, Q representa la tendencia al deslizamiento vertical relativo entre secciones transversales próximas. Cabe destacar que las tensiones asociadas a Q son tensiones de corte [8].

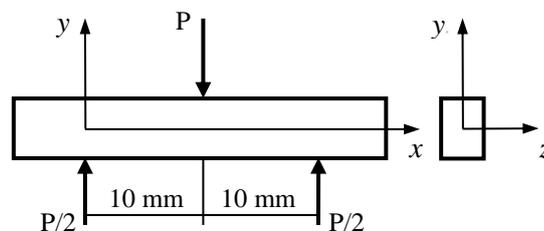


Figura 1: Representación simplificada del ensayo de flexión por 3 puntos

La Figura 2 muestra como varía M para las secciones transversales ubicadas entre ambas cargas $P/2$. La variación es simétrica con respecto a la sección transversal donde se aplica la carga P . Los valores para las secciones transversales asociadas a las cargas $P/2$ son nulos. Por otra parte, la Figura 3 muestra como se distribuye Q para las diferentes secciones transversales. En este caso, Q toma valores constantes para ambas mitades de la muestra. El cambio de signo de Q provocará el cambio de signo de las tensiones de corte asociadas a Q . Es importante destacar que, debido a que estas tensiones son de muy bajo valor, la falla de la muestra será generada por tensiones normales asociadas a M [8].

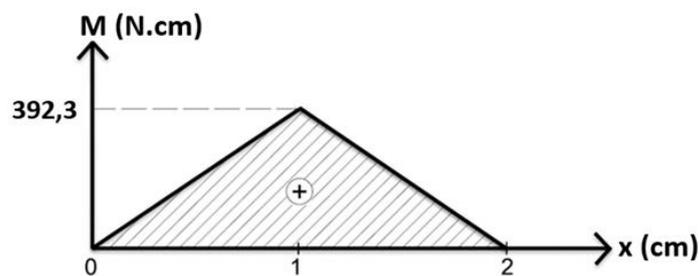


Figura 2: Distribución de momento flector

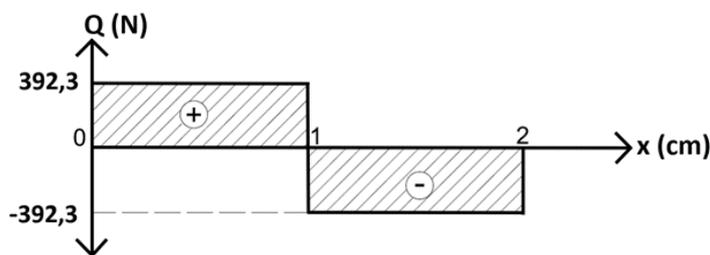


Figura 3: Distribución de esfuerzo de corte

2.2. Parámetros de tomografía y generación de ROIs

Las imágenes de la muestra se obtuvieron empleando un tomógrafo General Electric (Phoenix V |tome| x S 240), usando un voltaje de aceleración de 85 kV y una corriente de filamento de 60 μA . Por otro lado, los parámetros de resolución, magnificación y punto focal fueron 20,6 $\mu\text{m}/\text{vóxel}$, 9,7x y 5,1 μm , respectivamente; con un total de 1000 proyecciones, 3 fotogramas promediados por cada proyección, y un tiempo de escaneo de aproximadamente 1 h. Cabe destacar que, antes de tomografiar la muestra, se llevó a cabo un ajuste dimensional empleando un patrón de distancias del tipo *ball bar* [9,10].

Luego del proceso de tomografiado, reconstrucción y generación del modelo 3D, se llevó a cabo el pos-procesamiento de dicho modelo a fin de generar diferentes ROIs, a partir de las cuales fue posible evaluar la morfología y distribución espacial de los poros. Dicho pos-procesamiento, llevado a cabo usando el software VGSTUDIO MAX 3.0 [11], permitió realizar un estudio exhaustivo de las condiciones de la muestra en las cercanías de la fractura, a fin de establecer una correlación entre los datos de porosidad y la misma.

Las ROIs evaluadas fueron 6 en total, 3 de cada lado de la fractura. La Figura 4 muestra la identificación y espesor de cada ROI. Como muestra esta figura, las ROIs 1A y 1B contienen a las superficies de fractura.

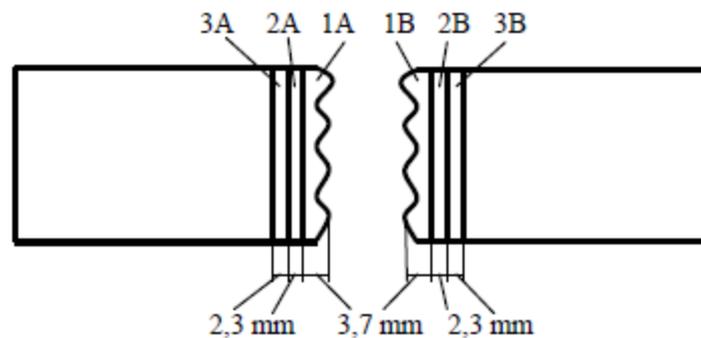


Figura 4: Identificación y espesor de las ROIs

El análisis del tamaño, forma y distribución de los poros en cada ROI se basó en dos parámetros: diámetro equivalente (D) y compacidad (C). D es el diámetro de una esfera que circunscribe al poro. En cuanto a C, esta se define como la relación entre el volumen del poro (V) y el volumen de la esfera circunscripta en dicho poro (V_s), como se presenta en la Ecuación (1) [12]

$$C = \frac{V}{V_s} \tag{1}$$

Si consideramos el tamaño de los poros en función de D, es posible definir tres subpoblaciones para cada ROI: S1, S2 y S3, asociadas a poros pequeños, medianos y grandes, respectivamente. Las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 muestran los valores asociados a cada ROI.

Tabla 2. Subpoblaciones en ROI 1A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
S1	0-1	0-0,4	64	26	249
S2	0-1	0,4-0,6	128	51	
S3	0-1	0,6-1,4	57	23	

Tabla 3. Subpoblaciones en ROI 1B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
S1	0-1	0-0,4	14	9	159
S2	0-1	0,4-0,6	98	61	
S3	0-1	0,6-1,4	47	30	

Tabla 4: Subpoblaciones en ROI 2A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	43	25	175
2	0-1	0,4-0,6	99	56	
3	0-1	0,6-1,4	33	19	

Tabla 5: Subpoblaciones en ROI 2B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	18	11	157
2	0-1	0,4-0,6	111	71	
3	0-1	0,6-1,4	28	18	

Tabla 6: Subpoblaciones en ROI 3A

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	45	25	177
2	0-1	0,4-0,6	85	48	
3	0-1	0,6-1,4	47	27	

Tabla 7: Subpoblaciones en ROI 3B

Subpoblación	Compacidad	Diámetro (mm)	Conteo	Conteo (%)	Conteo total
1	0-1	0-0,4	32	17	189
2	0-1	0,4-0,6	113	60	
3	0-1	0,6-1,4	44	23	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis cuantitativo de porosidad

La Figura 5 muestra gráficos de dispersión de poros, donde se evalúa C (forma) en función de D (tamaño). Esta figura muestra que, para las ROIs evaluadas, la mayoría de los poros son de compacidad media (0,3-0,6) y de tamaño medio (0,4-0,6 mm de diámetro).

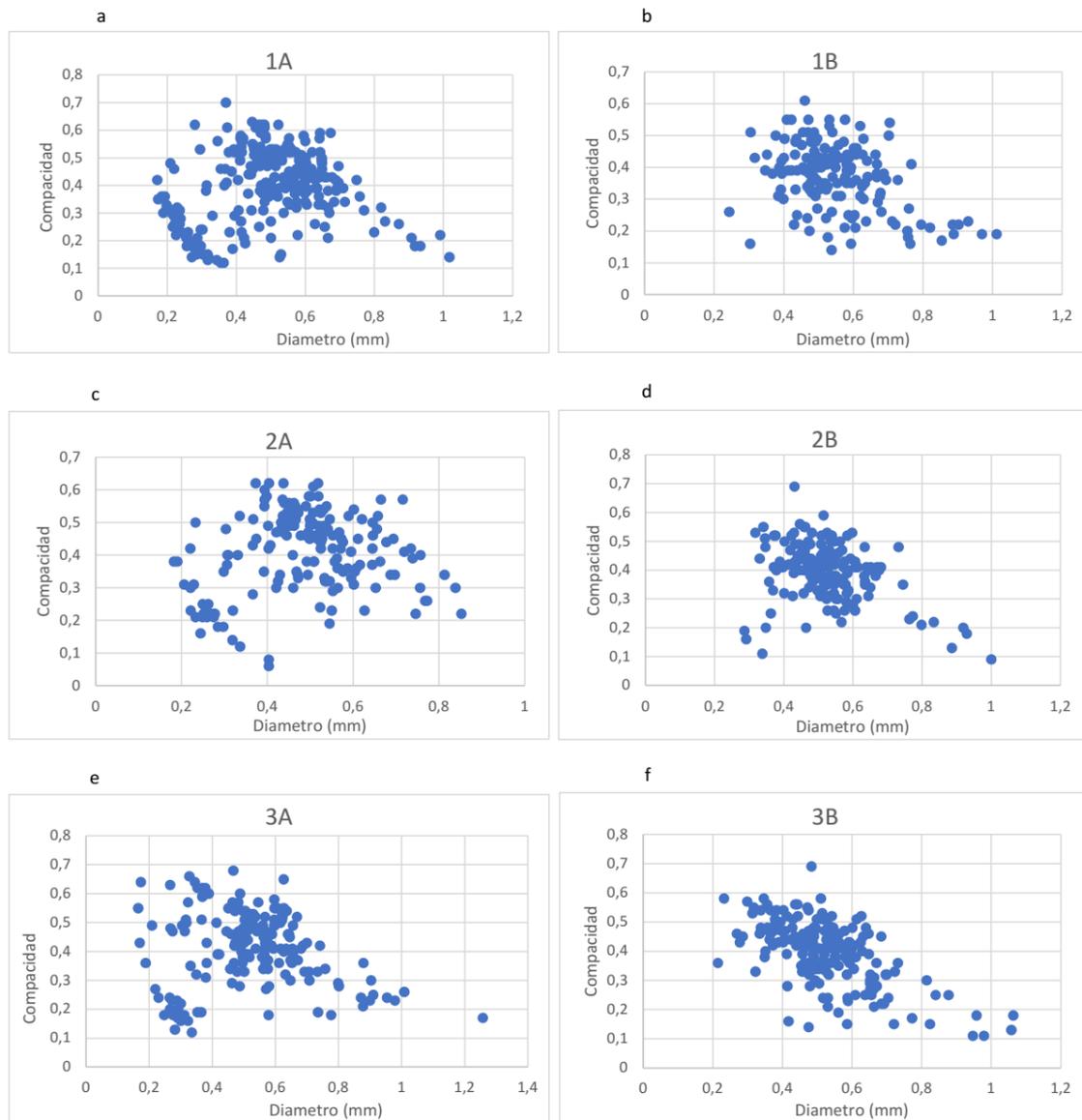


Figura 5: Distribución de compacidad vs diámetro en las diferentes ROIs

Con respecto a los poros pequeños, se detectó una asimetría al comparar el volumen A (Figuras 5a, c y e) con el B (Figuras 5b, d y f). Las ROIs del volumen A muestran mayor concentración y conteo de poros pequeños con relación a las del volumen B. La diferencia de conteo es máxima en las zonas cercanas a la superficies de fractura (ROIs 1A y 1B). Además, la población de poros pequeños aumenta, en el volumen B, con la distancia al plano de fractura.

En cuanto a los poros grandes, la mayoría de los mismos se encuentran en el rango de 0,6 a 0,8 mm, siendo una población muy pequeña la asociada a poros con valores mayores a dicho rango,

y prácticamente nula aquella que sobrepasa el valor de 1 mm. El comportamiento es similar para las ROIs que corresponden a ambos volúmenes (A y B).

Es importante notar que, la ROI 1A, adyacente a la superficie de fractura, contiene el mayor número de poros (249). La diferencia con el resto de las ROIs es relevante ya que la misma se halla en el rango de 60-90 poros (el conteo de estas ROIs se halla en el rango de 157-189 poros). La diferencia mencionada estaría asociada a la población de poros pequeños, la cual es elevada en ROI 1A.

Este análisis se confirma a partir de la Figura 6, la cual muestra, para cada ROI, el conteo en función de D. Esta figura muestra la diferencia de conteo para poros pequeños entre las ROIs del volumen A y las del B. El comportamiento para los poros de mayor tamaño es similar en ambos volúmenes.

3.2. Correlación entre porosidad y fractura

Para llevar a cabo una evaluación que posibilite explicar el plano donde se produce la fractura, es necesario analizar la porosidad cercana a la misma. La ROI 1A, de elevado conteo, incluye al plano de fractura, el cual sería atravesado por un número elevado de poros.

Ocurre que, en un plano (sección transversal de la muestra) que contenga gran cantidad de poros que lo atraviesen, su I_z disminuirá sensiblemente. Es importante notar que I_z representa la rigidez de la forma de dicha sección transversal [13]. La Ecuación (2) muestra la influencia del I_z en cuanto a la generación de tensiones normales asociadas a M [14]

$$\sigma_x = -\frac{M \cdot y}{I_z} \quad (2)$$

En esta expresión, y es la ordenada del punto a evaluar con respecto al eje z de la sección transversal, el cual es baricéntrico (ver Figura 1). Por lo tanto, despreciando las tensiones de corte por ser de muy bajo valor, la fractura siempre iniciará en la zona más alejada del eje z , necesariamente en el borde superior o inferior de la sección transversal. Por lo tanto, interesa en particular, la porosidad cercana a dichos bordes para la estimación del valor máximo que alcanza σ_x . En cuanto al plano de fractura, será aquel más afectado por la combinación de M elevado e I_z bajo, como es posible deducir de la Ecuación (2). El plano más afectado será entonces aquel cuyo M sea elevado y, además, cuya porosidad más alejada al eje z sea máxima, ya que, para tal caso, I_z disminuirá una cantidad elevada, como es posible deducir a partir de su expresión [8]

$$I_z = \int_A y^2 \cdot dA \quad (3)$$

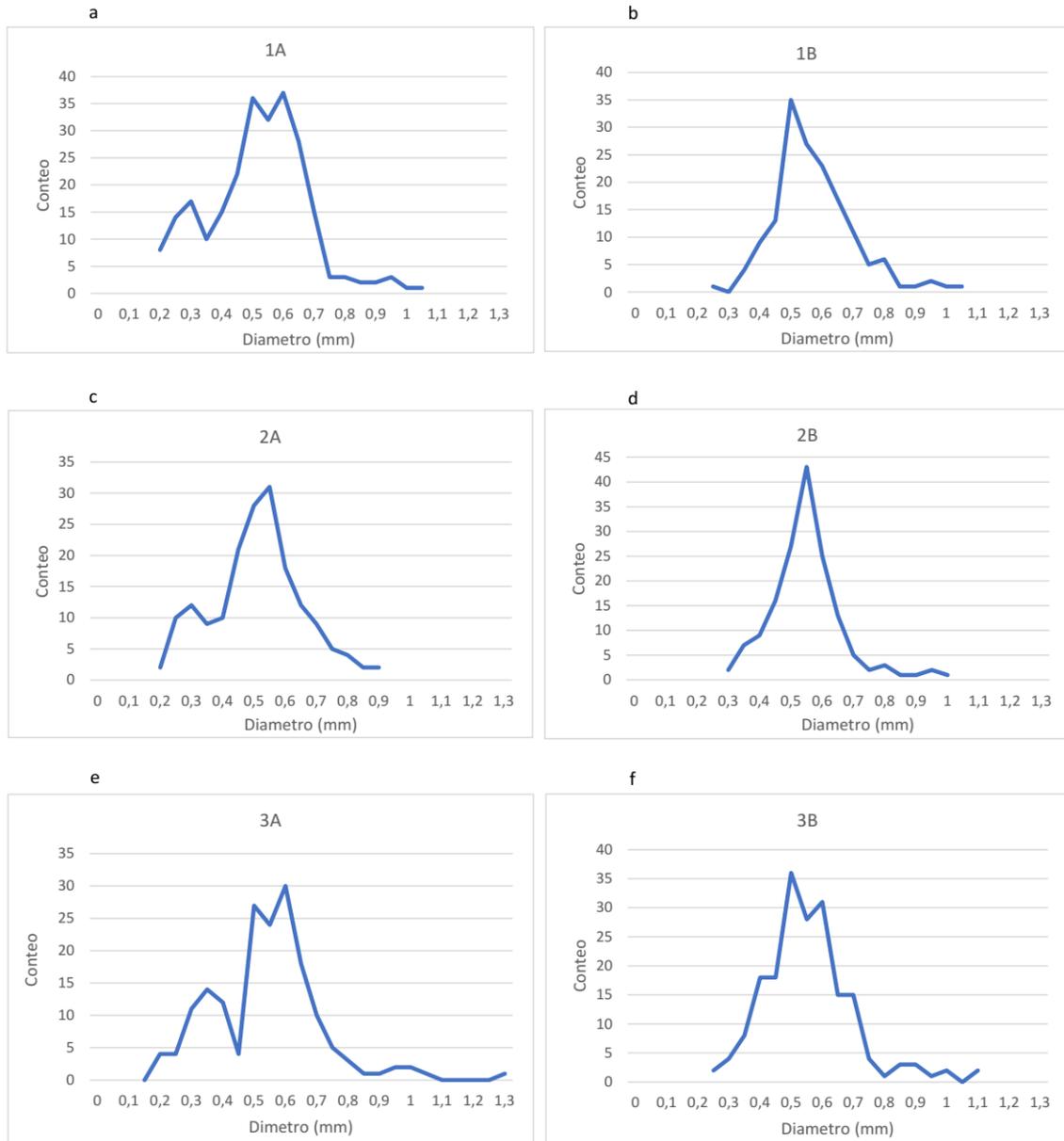


Figura 6: Conteo en función del diámetro de poro para las diferentes ROIs

Cabe mencionar que, como muestra la Figura 2, M disminuye linealmente a partir del plano de aplicación de la carga P , donde el mismo es máximo. En cambio, la modificación de I_z a lo largo de la muestra es más compleja, ya que depende de la cantidad, tamaño y ubicación de los poros.

A partir de la distribución, tamaño, forma y posición precisa de los poros con respecto a un sistema de ejes coordenados, lo cual puede llevarse a cabo empleando el software de procesamiento de la presente técnica, sería posible estimar la variación de I_z con respecto al eje

x , y como consecuencia, conocer los valores de σ_x generados en las secciones transversales críticas.

La Figura 7 muestra la distribución espacial de los poros en las ROIs evaluadas. La ROI 1A muestra que la porosidad se halla muy concentrada en la zona cercana al plano de fractura. En particular, hay una singular concentración de poros en el borde superior, lo cual genera una elevada disminución en el I_z . Es altamente probable que la falla haya iniciado en dicho borde superior, donde la densidad de poros es elevada, en particular, de poros pequeños. La ROI 1B indicaría, debido a que contiene menor porosidad, que la falla estaría ocurriendo en un plano límite, de transición, donde de un lado hay elevada densidad de poros (ROI 1A) y del otro, baja densidad (ROI 1B), en especial en los bordes.

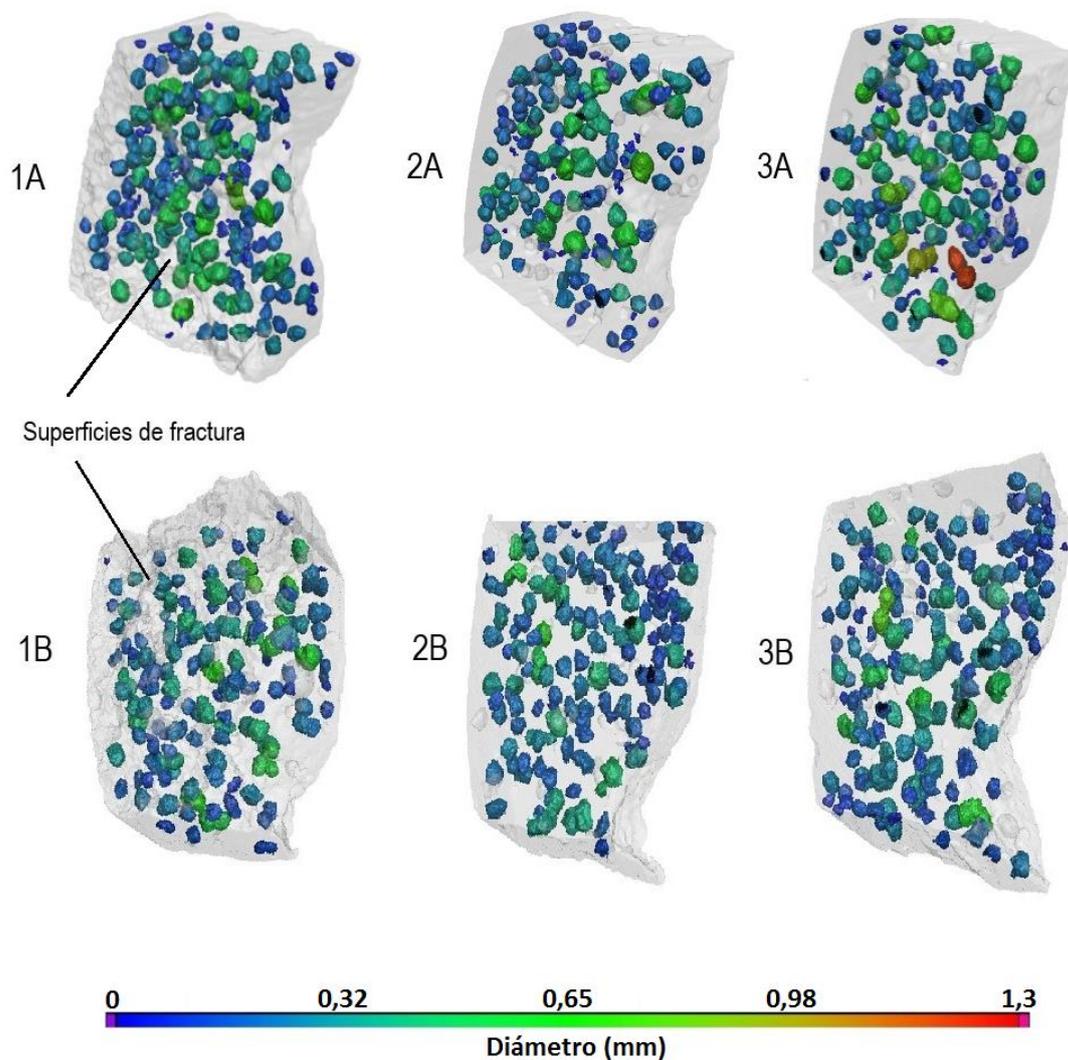


Figura 7: Distribución de porosidad en cada ROI

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se utiliza TC para evaluar la porosidad cercana a la fractura, en una muestra de fundición de Al-Si solicitada a flexión de 3 puntos. El software de pos-procesamiento empleado posibilitó la segmentación del volumen evaluado en 6 ROIs, 2 de las cuales contienen a las superficies de fractura. Los resultados obtenidos muestran en la mayoría de los poros, de cada ROI evaluada, valores medios de compacidad (rango de 0,3-0,6), y también, valores medios de tamaño (0,4-0,6 mm de diámetro). Por otra parte, en las ROIs asociadas a las superficies de fractura, es posible advertir marcadas asimetrías en cuanto al conteo general de poros, al conteo de poros de diámetro pequeño y, además, a su distribución espacial. Estos resultados posibilitaron evaluar la fractura, la cual ocurriría en un plano de transición entre una zona de alta densidad de poros y otra de menor densidad, necesariamente en un plano donde la porosidad, sobre todo la cercana a los bordes, hace mínimo al I_z . Por otra parte, la fractura iniciaría en el borde superior de dicho plano, donde σ_x es máximo.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos es posible advertir la gran utilidad de la técnica propuesta para examinar cuantitativamente la porosidad cercana a superficies de fractura, lo cual podría llevarse a cabo en cualquier tipo de material poroso.

Como trabajo futuro, se plantea el desarrollo de una rutina que posibilite, a partir de datos de TC, la obtención del I_z para secciones trasversales críticas, lo cual a su vez permitirá obtener la resistencia mecánica en piezas fracturadas y, además, los valores de σ_x asociados a la sollicitación externa, para piezas no fracturadas.

REFERENCIAS

- [1] Hanke R., Fuchs T., Salamon M., Zabler S. *X-ray microtomography for materials characterization*. In: Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, Eds.: Hübschen G., Altpeter I., Tschuncky R., Herrmann H., 45-79, 2016.
- [2] Maire E., Withers P.J. *Quantitative X-ray tomography*. Int. Mater. Rev., 59, 1-43, 2014.
- [3] Rueckel J., Stockmar M., Pfeiffer F., Herzen J. *Spatial resolution characterization of an X-ray microCT system*. Appl. Radiat. Isot., 94, 230-234, 2014.
- [4] Glazoff M.V., Khvan A., Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Dinsdale A. *Casting Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Metallurgy, 2nd edition*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
- [5] Mathew J., Williams M.A., Srirangam P. *X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys*. JOM, 73, 3866–3872, 2021.
- [6] Osmond P., Le V.D., Morel F., Bellett D., Saintier N. *Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys: from the specimen to the structure*. Proc. Eng., 213, 630-643, 2018.

- [7] Cuyás J.C., Mugica G. W., Tovio D. O., Gonzales A. C. *Relación entre porosidad y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio de moldeo. Estado del conocimiento*. Rev. Metal. Madrid, 38, 139–149, 2002.
- [8] Gere J.M., Goodno B.J. *Mechanics of Materials*. Cengage Learning, Toronto, 2009.
- [9] Zwanenburg E.A., Williams M.A., Warnett J.M. *Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems*. Precision Eng., 77, 179-193, 2022.
- [10] Hiller J., Maisl M., Reindl L.M. *Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications*. Meas. Sci. Technol., 23, 1-18, 2012.
- [11] Volume graphics. Disponible en: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html>. Se accedió el 6 de junio de 2023.
- [12] Díaz F.V., Peralta M.E., Fernandino D.O. *Study of sphericity and compactness parameters in spheroidal graphite iron using X-ray micro-computed tomography and image processing*. J. Nondestruct. Eval., 40, 1-10, 2021.
- [13] Hibbeler R. *Engineering Mechanics: Statics, 14th Edition*. Pearson, London, 2015.
- [14] Hibbeler R. *Mechanics of Materials*. Pearson, London, 2016.