

Tomografía computada aplicada al estudio de porosidad en fundiciones de Al-Si.

Computed tomography applied to the study of porosity in Al-Si castings.

Presentación: 17/10/2023

Martin Felcaro

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela; Rafaela, Argentina.
martinfelcaro8@gmail.com

Resumen

La tomografía computada de rayos X es una técnica de análisis no-destructiva que permite obtener, a partir del pos-procesamiento de imágenes tridimensionales con un software especial, información detallada del sólido evaluado. Este trabajo presenta una metodología para evaluar porosidad cercana a la zona de fractura en una muestra de fundición de Al-Si, solicitada a flexión de 3 puntos. 1106 poros fueron evaluados mediante 6 regiones de interés (2 contienen a las superficies de fractura). Una vez analizados los poros se diseñó una técnica para obtener las tensiones normales asociadas a la fractura. Los resultados muestran que la mayoría de los poros poseen valores medios de compactación y las superficies de fractura evidencian asimetrías en el conteo general de poros y en el de poros pequeños. De esta manera se podrá determinar la resistencia mecánica en componentes fracturadas y, además, las tensiones normales generadas por sollicitación externa en componentes no fracturadas.

Palabras clave: Tomografía computada de rayos X, Porosidad, Aleación Al-Si, Fractura.

Abstract

X-ray computed tomography is a non-destructive analysis method that allows obtaining detailed information of the evaluated solid by post-processing three-dimensional images with special software. This work presents a methodology to evaluate porosity near the fracture zone in a sample of Al-Si cast iron, subjected to 3-point bending. 1106 pores were evaluated using 6 regions of interest (2 contain the fracture surfaces). Once the pores were analyzed, a technique was designed to obtain the normal stresses associated with the fracture. The results show that most of the pores have medium compactness values and the fracture surfaces show asymmetries in the overall pore count and in the small pore count. In this way, it will be possible to determine the mechanical strength in fractured components and, in addition, the normal stresses generated by external stresses in non-fractured components.

Keywords: X-ray computed tomography, Porosity, Al-Si alloy, Fracture.

Introducción

La tomografía computada (TC) de rayos X es una técnica no-destructiva que posibilita evaluar la estructura interna de un conjunto, componente o muestra, con elevada resolución. Esta técnica utiliza un software especial 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, son materiales que 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 (Glazoff et al., 2018). 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 a partir del pos-procesamiento de las imágenes generadas (Mathew et al., 2021).

En este trabajo, la TC se aplica al análisis de una muestra de aleación de Al-Si obtenida por moldeo de arena. Se evalúan pequeños volúmenes cercanos al plano de fractura y, además, pequeños volúmenes adyacentes a éstos. La generación de la fractura fue llevada a cabo a partir de un ensayo de flexión de 3 puntos, incorporando, de esta manera, la singularidad de esta sollicitación a los estudios previos llevados a cabo a partir de la sollicitación axial.

En los volúmenes mencionados, denominados regiones de interés (ROI), se evaluó la distribución espacial, conteo, tamaño y forma de los poros. Además, se compararon gráficos de dispersión de parámetros de forma en función de parámetros de tamaño. Además, a partir de la distribución espacial de los poros y el diagrama de momento flector inherente al ensayo de flexión, fue posible evaluar la influencia de la porosidad en las secciones transversales más exigidas por la sollicitación externa. Finalmente, se 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) en las secciones transversales críticas (Gere et al., 2009).

Metodología

Material y ensayo de flexión

La única muestra evaluada en este trabajo de aleación de Al-Si posee dimensión longitudinal de 35 mm y 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).

Composición química (% en 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

Tabla 1 - Composición química de la aleación investigada.

Dicha muestra fue ensayada a flexión de 3 puntos hasta su fractura, empleando una prensa hidráulica AMOB Group (PH4C 60T). La Fig. 1a muestra una representación esquemática de dicho ensayo. La carga de rotura resultó ser $P = 80$ kgf. Cabe destacar que, la flexión de 3 puntos genera tanto momento flector (M) como esfuerzo de corte (Q) el cual será de muy bajo valor para el presente caso (Gere et al., 2009), es por esta razón que se desprecia del estudio, ya que no incide en la rotura de la pieza.

La Fig. 1b muestra como varía M para las secciones transversales ubicadas entre ambas cargas $P/2$ (la convención adoptada es de positivo hacia abajo). 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 Fig. 1c ilustra el resultado final de una de las dos partes en las que se dividió la muestra luego de generarse la rotura.

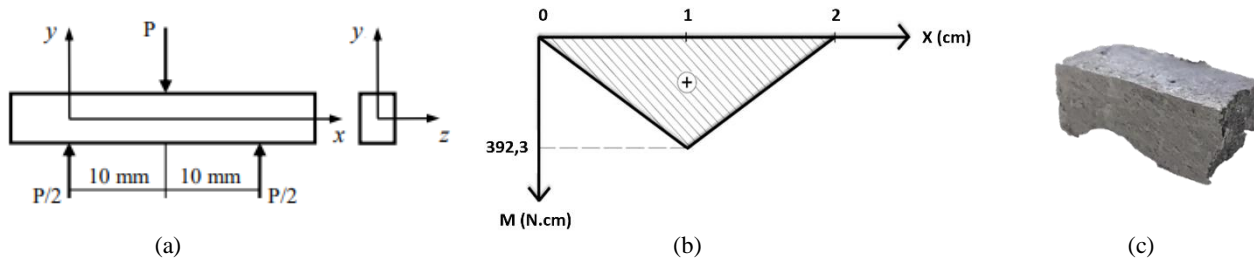


Figura 1 – (a) Esquema del ensayo de flexión (b) diagrama de momento flector (c) muestra fracturada.

Parámetros de tomografía y evaluación vía 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 μ A. Por otro lado, los parámetros de resolución fueron $\sim 20,6 \mu\text{m}/\text{vóxel}$, una magnificación $M = 9,7x$, y un tamaño de punto focal $F = 5,1 \mu\text{m}$; 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*.

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, 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 Fig. 2 muestra la identificación y espesor de cada ROI. Como evidencia esta figura, las ROIs 1A y 1B contienen a las superficies de fractura.

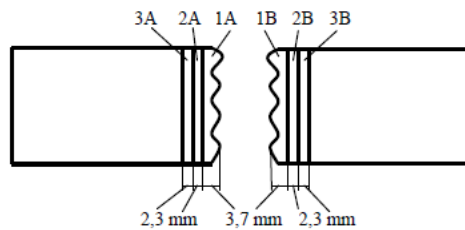


Figura 2 – Identificación y espesor de las ROIs.

El análisis del tamaño, forma y distribución de los poros en cada ROI se basó en dos parámetros: diámetro equivalente (D) y compacidad (C). El diámetro equivalente es el diámetro de una esfera que circunscribe al poro. La compacidad se define como la relación entre V y el volumen de la esfera circunscripta en dicho poro (V_s), como se presenta en ec. (1) (Díaz et al., 2021).

$$C = V/V_s \quad [1]$$

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 (0-0,4mm), medianos (0,4-0,6mm) y grandes (0,6-1,4mm), respectivamente:

- ROI 1A: 64 pequeños (26%), 128 medianos (51%) y 57 grandes (23%). Total 249 poros.
- ROI 1B: 14 pequeños (9%), 98 medianos (61%) y 47 grandes (30%). Total 159 poros.
- ROI 2A: 43 pequeños (25%), 99 medianos (56%) y 33 grandes (19%). Total 175 poros.
- ROI 2B: 18 pequeños (11%), 111 medianos (71%) y 28 grandes (18%). Total 157 poros.

- ROI 3A: 45 pequeños (25%), 85 medianos (48%) y 47 grandes (27%). Total 177 poros.
- ROI 3B: 32 pequeños (17%), 113 medianos (60%) y 44 grandes (23%). Total 189 poros.

Resultados y discusión

Análisis cuantitativo de porosidad

La Fig. 3 muestra gráficos de dispersión de poros, donde se evalúa la compacidad (forma) en función del diámetro equivalente (tamaño). Se muestra que, para las ROIs evaluadas, la mayoría de los poros son de tamaño mediano (0,4-0,6 mm de diámetro).

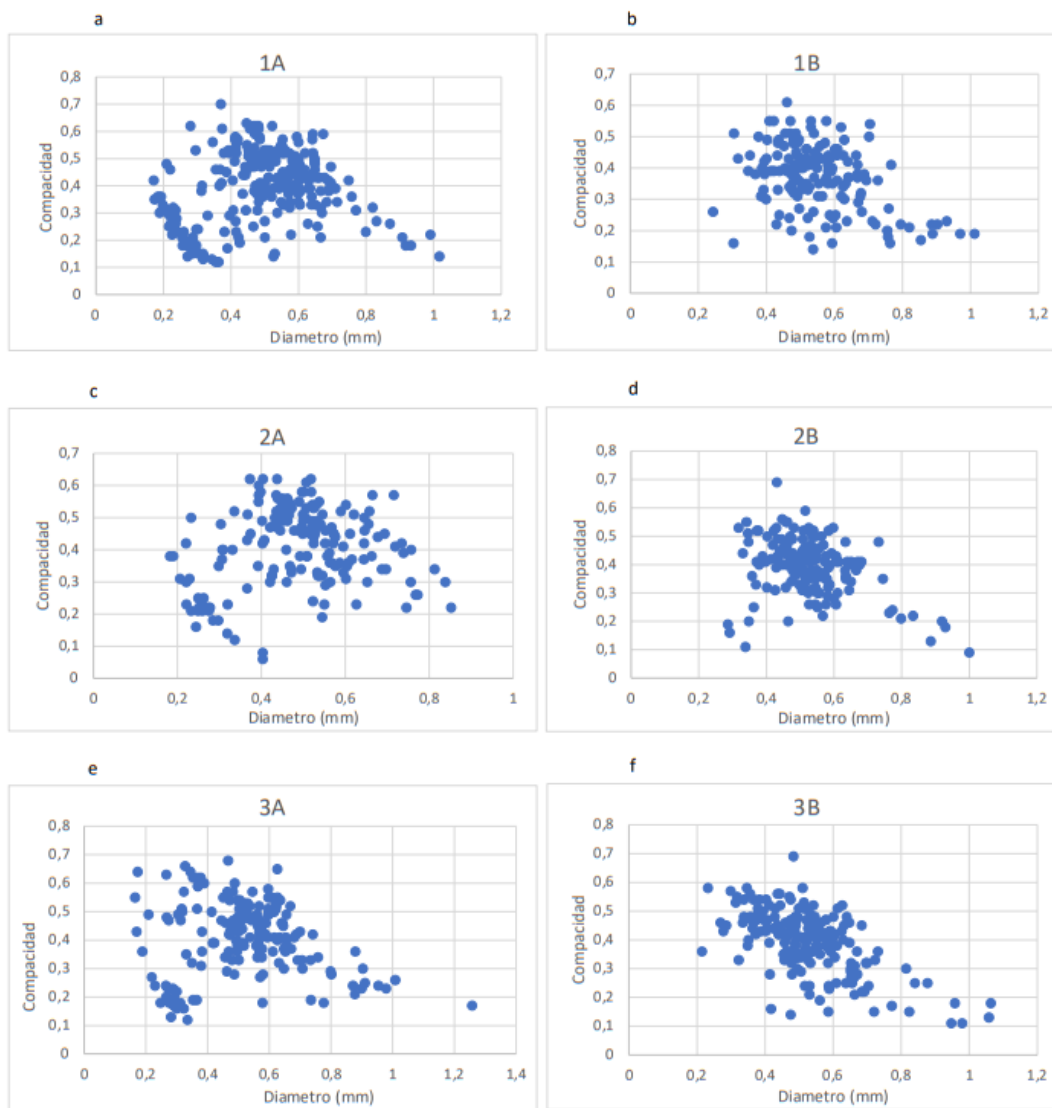


Figura 3 - Distribución de compacidad vs diámetro en las diferentes ROIs.

Con respecto a los poros pequeños, se detectó una asimetría al comparar el volumen A (Figs. 3a, c y e) con el B (Figs. 3b, 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 superficie 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 estos 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 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 la ROI 1A.

Correlación entre porosidad y fractura

Para establecer una hipótesis que explique cuál será 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. Teniendo en cuenta que Iz representa la rigidez de forma de una sección transversal (Hibbeler, 2015), un plano (sección transversal) que contenga gran cantidad de poros que lo atraviesen disminuirá sensiblemente su Iz. La ec. (2) muestra la influencia del Iz en cuanto a la generación de tensiones normales asociadas a M (Hibbeler, 2016).

$$\sigma_x = - \frac{M y}{I_z} \quad [2]$$

En esta expresión, y es la ordenada del punto evaluado con respecto al eje z de la sección transversal, el cual es eje baricéntrico (ver Fig. 1a). 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, es decir, 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 .

Cabe mencionar que, como muestra la Fig. 1(b), M disminuye linealmente a partir del plano de aplicación de la carga P, donde el mismo es máximo. En cambio, la modificación de Iz a lo largo de la componente es más compleja, ya que depende de la cantidad, tamaño y ubicación de los poros.

En cuanto al plano de fractura, este será aquel más afectado por la combinación de M elevado e Iz bajo, como es posible deducir de la ec. (2), en este caso se encuentra en una región central de la pieza, pero no en el plano exacto en el que se aplica la carga, sino en uno que ve mucho más disminuido su Iz.

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 pos-procesamiento de la presente técnica, sería posible estimar la variación de Iz con respecto al eje x, y como consecuencia, conocer los valores de σ_x generados en las secciones transversales críticas.

La Fig. 4 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, como se preveía, hay una singular concentración de poros en los bordes superior e inferior, los cuales generan una elevada disminución en el Iz.

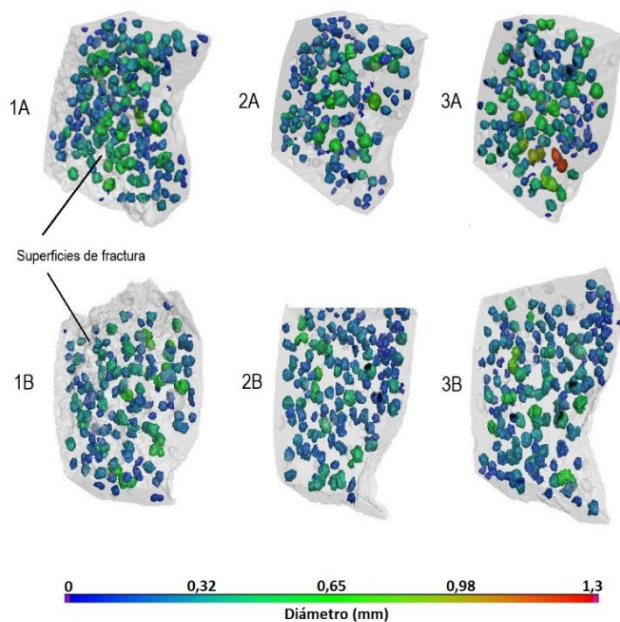


Figura 4 - Distribución de porosidad en cada ROI.

Es altamente probable que la falla haya iniciado en el borde superior, donde la densidad de poros es elevada, en particular, de poros pequeños. La ROI 1B indicaría, debido a que posee menor porosidad, que la falla estaría ocurriendo en un plano límite, de transición, donde una elevada densidad de poros deja lugar a un volumen donde la densidad disminuye, en especial en los bordes.

Conclusiones

En este trabajo se emplea la técnica de TC a fin de 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 posibilitó la segmentación del volumen evaluado en 6 ROIs, 2 de las cuales contienen a las superficies de fractura. Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de los poros, en cada ROI evaluada, valores medios de compactidad (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, en cuanto al conteo de poros de diámetro pequeño y, además, en cuanto a su distribución espacial. Estos resultados posibilitaron advertir que la fractura estaría ocurriendo, dentro de una zona central de la pieza debido a las mayores tensiones generadas por momento flector, en un plano de transición entre una zona de alta densidad de poros y otra de menor densidad, más precisamente en un plano donde la porosidad, sobre todo la cercana a los bordes, hace mínimo al Iz. Por otra parte, dicha fractura iniciaría en el borde superior de dicho plano, donde σ_x es máximo.

Como trabajo futuro, se plantea el desarrollo de una rutina que posibilite, a partir de datos de TC, la obtención del Iz para secciones transversales 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 bibliográficas

Díaz F.V., Peralta M.E., Fernandino D.O. (2021). "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.

Gere J.M., Goodno B.J. (2009). *Mechanics of Materials*. Toronto, Cengage Learning.

Glazoff M.V., Khvan A., Zolotarevsky V.S., Belov N.A. (2018) *Dinsdale A. Casting Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Metallurgy, 2nd edition*. Oxford, Butterworth-Heinemann.

Hanke R., Fuchs T., Salamon M., Zabler S. (2016) "X-ray microtomography for materials characterization". *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Eds.: Hübschen G., Altpeter I., Tschuncky R., Herrmann H., 45-79.

Hibbeler R. (2015). *Engineering Mechanics: Statics, 14th Edition*. London, Pearson.

Hibbeler R. (2016). *Mechanics of Materials*. London, Pearson.

Hiller J., Maisl M., Reindl L.M. (2012). "Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications". *Meas. Sci. Technol.*, 23, 1-18.

Maire E., Withers P.J. (2014) "Quantitative X-ray tomography". *Int. Mater. Rev.*, 59, 1-43.

Mathew J., Williams M.A., Srirangam P. (2021). "X-ray computed tomography studies on porosity distribution in vacuum induction cast Al-7Si alloys". *JOM*, 73, 3866–3872.

Rueckel J., Stockmar M., Pfeiffer F., Herzen J. (2014). "Spatial resolution characterization of an X-ray microCT system". *Appl. Radiat. Isot.*, 94, 230-234.

Volume graphics. "VGSTUDIO MAX". (2023). Disponible en: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm.html>.

Zwanenburg E.A., Williams M.A., Warnett J.M. (2022). "Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems". *Precision Eng.*, 77, 179-193.