

Modelo MEF basado en CT: Estimación de la influencia de la porosidad en el comportamiento y fallo de componentes de fabricación aditiva

Alejandro Pascual-Molero¹, Soraya Plaza-Pascual², Naiara Ortega-Rodríguez³, Sara Sendino-Mouliet⁴,
Silvia Martínez-Rodríguez⁵

¹Fabricación de Alto Rendimiento, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) - Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), España. Email: alejandro.pascual@ehu.eus

²Fabricación de Alto Rendimiento, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) - Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), España. Email: soraya.plaza@ehu.eus

³Fabricación de Alto Rendimiento, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) - Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), España. Email: naiara.ortega@ehu.eus

⁴Fabricación de Alto Rendimiento, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) - Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), España. Email: sara.sendino@ehu.eus

⁵Fabricación de Alto Rendimiento, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) - Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), España. Email: silvia.martinez@ehu.eus

Resumen

El presente trabajo de investigación pretende proponer un gemelo digital para la predicción del comportamiento y fallo de componentes de fabricación aditiva, atendiendo a las características de las heterogeneidades intrínsecas en la pieza, principalmente porosidades, que aparecen durante el proceso de fabricación de las mismas. Por tanto, la metodología propuesta consiste en la construcción de un modelo MEF basado en CT, así como en el estudio de las características de porosidad obtenidas por CT y su repercusión en la predicción del fallo del componente mediante el modelo MEF. Para ello, se fabrican una serie de probetas de tracción mediante L-PBF, según la norma ASTM E8/E8M. Posteriormente, se realiza la digitalización y el análisis de las mismas mediante CT. Finalmente, se modelizan dichas probetas mediante MEF y los resultados obtenidos se contrastan con los ensayos experimentales de tracción. Asimismo, se analizan casuísticas virtuales para evaluar su influencia utilizando el modelo propuesto.

Palabras clave: CT, MEF, Fabricación Aditiva, Porosidad.

Abstract

This work aims to present a digital-twin for prediction of the mechanical behavior and failure of additive manufacturing components, considering the characteristics of heterogeneities, mainly porosities, which appear during the manufacturing process. Therefore, the proposed methodology is based on the development of a CT-based FEM model, as well as the study of different porosity features by CT analysis and FEM modelling. Their influence on predictions is also evaluated. To this end, tensile test specimens were manufactured by means of L-PBF, according to ASTM E8/E8M. Afterwards, the analysis and digitalization of each specimen were carried out using CT, followed by FEM modelling of each one. Finally, the results obtained by the analysis were correlated with experimental tensile tests. Taking advantage of the virtual model proposed, virtual cases and hypothesis were also analyzed. Hence, the promising future of the proposed methodology is highlighted.

Keywords: CT, MEF, Additive Manufacturing, Porosity.

1. Introducción

El paradigma actual que presenta la industria del transporte, con una tendencia evidente hacia la reducción del peso de los componentes, sin detrimento de las prestaciones y niveles de seguridad de los mismos, representan los principales retos del sector. Asimismo, la demanda de soluciones ágiles e individualizadas para cada paciente impera en el sector clínico. Por consiguiente, los avances en nuevos materiales, técnicas de diseño y procesos de fabricación, presentan credenciales para su consideración en las distintas aplicaciones de estos sectores.

En este contexto, la fabricación aditiva se erige como el proceso de fabricación de mayor idoneidad, dada su característica de adición del material necesario en lugar de sustracción. Dicha cualidad permite la fabricación de complejos diseños generados por las técnicas más vanguardistas como el diseño generativo, biomimético o la optimización topológica. Entre las distintas técnicas de fabricación aditiva, cabe destacar la fabricación aditiva sobre lecho de polvo (L-PBF), dada su capacidad para la fabricación de formas complejas con paredes delgadas y estructuras huecas (paneles de abeja, estructuras en celosía o porosas). Sin embargo, esta tecnología de fabricación no está exenta de la aparición de defectos, entre los que destaca la porosidad [1]. Estos defectos suponen discontinuidades geométricas que generan concentraciones de tensiones alrededor de los mismos, propiciando así el fallo del componente mediante la nucleación, crecimiento y coalescencia de dichos defectos [2]. Por tanto, una correcta estimación de los mismos, así como un análisis de su influencia en el comportamiento del componente se tornan esenciales para su correcta comprensión. De este modo, la caracterización de dichos defectos, teniendo en cuenta aspectos como forma, orientación o espaciado; además de los habituales en este tipo de análisis tales como distribución, porcentaje y tamaño; resulta de gran relevancia en la estimación del estado tensional y, por ende, en el comportamiento del componente.

En consecuencia, la Tomografía Computarizada por rayos X (CT) se posiciona como alternativa a las técnicas de inspección convencionales, dado su carácter no destructivo y su capacidad de análisis de interiores y exteriores de forma simultánea [3]. Asimismo, proporciona la virtualización del objeto inspeccionado permitiendo la caracterización de cada detección. Esta cualidad revela el interés que supone su utilización para la modelización MEF del objeto a estudio, augurando una mayor comprensión del estado tensional derivado de los defectos presentes, así como su influencia en el comportamiento y fallo del componente.

Por consiguiente, el propósito de este trabajo consiste en la generación de un modelo MEF basado en la digitalización mediante CT.

2. Metodología

La metodología propuesta en este trabajo consiste en la construcción de un gemelo digital para la predicción del comportamiento y fallo de componentes fabricados por aditiva en función de la porosidad aparente. Para ello, la propuesta se centra en la construcción de un modelo MEF basado en CT, que permita estimar la influencia de las distintas características de la porosidad en el estado tensional y su repercusión en el comportamiento y fallo de componentes sometidos a esfuerzos de tracción. Este análisis permite, por tanto, establecer criterios para la validación de dichos defectos en función de su aplicación, así como para la toma de acciones de corrección con el objetivo de promover las mejoras pertinentes. Asimismo, el carácter virtual del modelo propuesto, permite el estudio de distintas casuísticas e hipótesis con ánimo de procurar una reducción de las campañas de ensayos.

Por consiguiente, en primer lugar, se realiza el procedimiento experimental del estudio, posteriormente, se procede a la construcción del gemelo digital, su validación con la experimentación y, finalmente, el análisis de distintas casuísticas e hipótesis virtuales.

2.1. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental del presente trabajo se representa de forma esquemática en la Figura 1.

2.1.1. Diseño de probetas

Para la ejecución experimental del estudio, se define el diseño de cuatro probetas de tracción atendiendo a las disposiciones de la norma ASTM E8/E8M (véase Figura 2). Con ánimo de estudiar la influencia de las distintas características de porosidad, tres de ellas (Probeta 2, Probeta 3 y Probeta 4) se definen con porosidad inducida de forma artificial, mientras que la probeta restante (Probeta 1) se diseña sin defectos provocados.

La ubicación de los poros en la probeta se realiza en 10 planos transversales al eje vertical (Z) definidos cada 4 mm. Los poros se localizan a una distancia radial de 2 mm del eje vertical y cada $\pi/2$ rad, procurando una disposición de 4 poros por cada nivel definido. Por tanto, cada probeta con porosidad inducida de forma artificial cuenta con 40 poros definidos por diseño.

Prestando atención al tamaño y forma de los poros diseñados, se establece un mismo volumen para cada poro, mientras que se procura la variación en forma de los mismos entre las distintas probetas. De este modo, los poros se diseñan acorde a la descripción presente en la Figura 2, donde el parámetro β hace referencia a la relación de aspecto, definida mediante la ecuación (1).

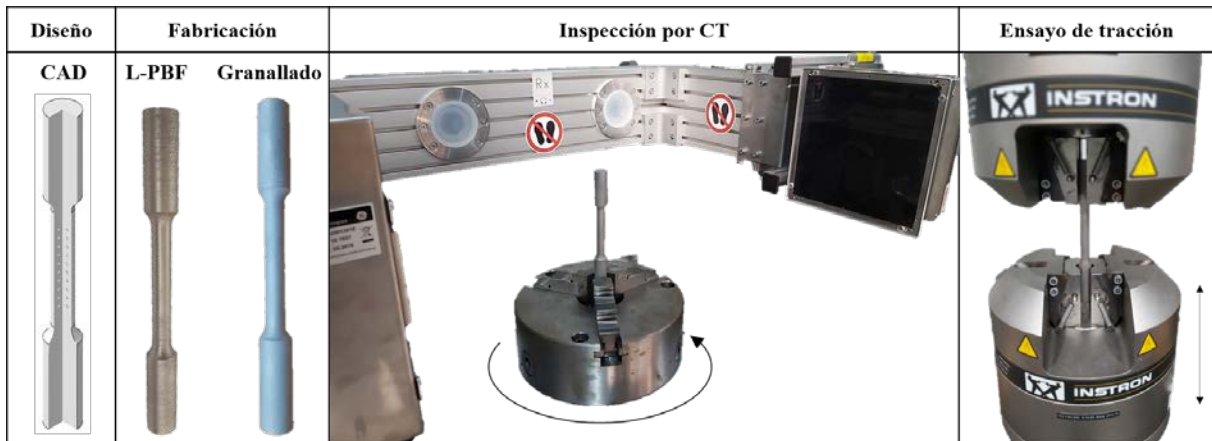


Figura 1. Procedimiento experimental de la metodología propuesta.

$$\beta = \frac{\max(a,b)}{c} \quad (1)$$

2.1.2. Material

El material seleccionado para la ejecución experimental del estudio es Inconel 718. Se trata de una aleación base níquel que presenta una alta resistencia a altas temperaturas, una importante resistencia a la corrosión, a la fatiga y al desgaste, y una buena soldabilidad. Debido a su interesante comportamiento a altas temperaturas, se utiliza ampliamente en el sector aeronáutico, especialmente para los componentes de los motores de las aeronaves, como las cámaras de combustión, los

álabes de las turbinas y los rotores de los turbocompresores. Finalmente, la composición química del material se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del Inconel 718 (% de peso).

Ni	Cr	Fe	Ta + Nb	Mo
50.00 - 55.00	17.00 - 21.00	Balance	4.75 - 5.50	2.80 - 3.30
Ti	Al	Cu	C	Si
0.65 - 1.15	0.20 - 0.80	0.30	0.08	0.35
Mn	B	Co	P	S
0.35	0.006	1.00	0.015	0.015

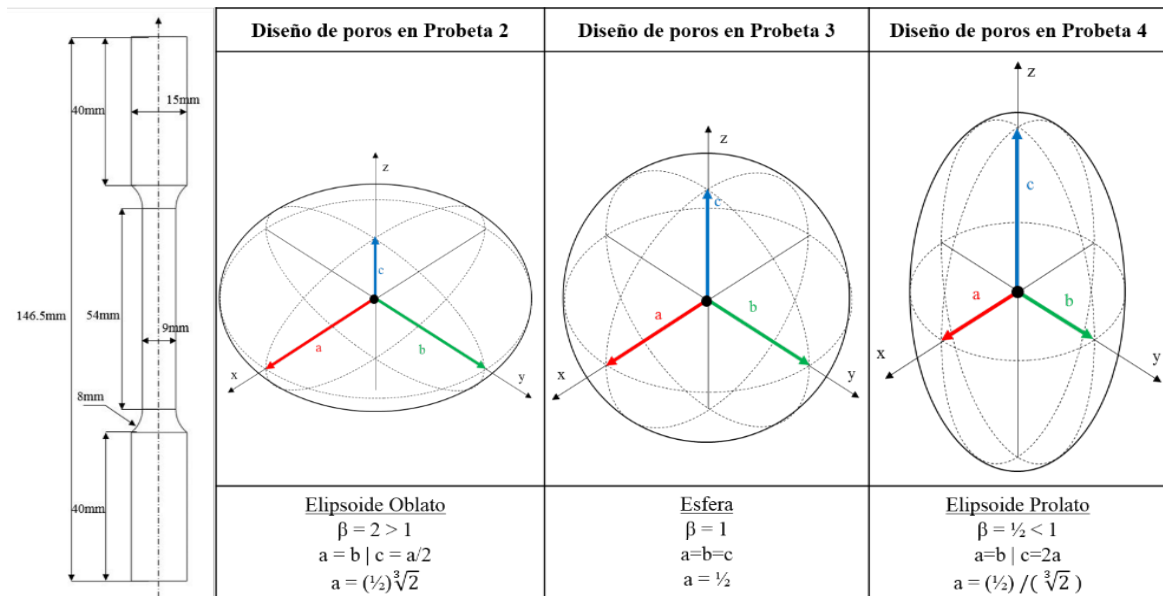


Figura 2. Geometría y dimensiones de las probetas de tracción. Geometría, forma y dimensiones de los poros diseñados en cada probeta.

2.1.3. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las probetas se lleva a cabo mediante la técnica de fabricación aditiva sobre lecho de polvo (L-PBF), utilizando el equipo Renishaw AM400 (Renishaw, Wotton-under-Edge, UK). Asimismo, se emplea el software QuantAM (Renishaw, Wotton-under-Edge, UK) para la programación del proceso. Por otro lado, en cuanto a los parámetros de fabricación establecidos, se determina la utilización de una distribución de 15-45 μm de tamaño de polvo, un espesor de capa de 60 μm y una modificación de las trayectorias del láser de 67° entre capas. La orientación de las probetas en la placa de fabricación se establece de forma vertical, con su eje principal en la dirección de construcción del sistema. Finalmente, se aplica un granallado superficial utilizando corindón blanco, mediante el equipo Guyson Euroblsat 4 (Guyson, Skipton, UK).

2.1.4. Inspección por CT

Una vez fabricadas, se procede a la inspección de las mismas mediante CT. Para ello, se recurre al equipo X-Cube Compact (Baker Hughes, Houston, TX, USA). Dadas las características del material y la geometría a inspeccionar, con un espesor máximo en torno a 9mm en la zona de interés, se establecen los parámetros presentes en la Tabla 2, con ánimo de procurar la penetración del objeto a escanear con garantías de alcanzar un contraste suficiente.

Tabla 2. Condiciones de inspección mediante CT.

Condiciones de inspección por CT	
Tamaño de foco [mm]	0.4
Filtros Hardware	1mm Cu + 0.5mm Sn
Voltaje [kV]	195
Intensidad [mA]	2.2
Tiempo de exposición [ms]	100
Proyecciones	750
Magnificación	2.231

2.1.5. Ensayo experimental de tracción

Finalmente, se realizan los ensayos experimentales de tracción mediante el equipo Instron 8801 (Instron, Norwood, MA, USA). Atendiendo a las disposiciones de la norma ASTM E8/E8M, se establece una velocidad de 0.05 s^{-1} para la ejecución de los ensayos.

2.2. Gemelo digital

El procedimiento virtual consiste en la construcción del gemelo digital mediante MEF de las probetas inspeccionadas por CT, teniendo en cuenta la detección de defectos pertinente. Adicionalmente, se procede a la

modelización virtual de casuísticas e hipótesis adicionales, como se ha mencionado previamente, poniendo de manifiesto el potencial del modelo propuesto.

2.2.1. Detección de defectos por CT

El procesamiento de los datos obtenidos en la inspección por CT, con el objetivo de procurar una detección de defectos óptima, se realiza mediante el software específico VGStudio MAX 3.4. El procedimiento establecido para dicho procesamiento de datos se basa en la determinación de la superficie, filtrado de ruido, definición de la región de interés y, finalmente, detección de defectos de porosidad.

El procedimiento comienza con la determinación de la superficie, que se establece en función de las diferencias locales de los valores de gris computados alrededor del contorno inicial definido mediante la técnica de umbralización ISO50 (véase ecuación 2).

$$\text{Valor umbral} = \frac{M_b + M_f}{2} \quad (2)$$

donde M_b hace referencia a la media del valor de gris del fondo y M_f a la media de grises del objeto inspeccionado.

Adicionalmente, se realiza un filtrado de ruido mediante la comprobación de las conexiones ente los elementos detectados. De este modo, se procura la reducción tanto del ruido fuera del objeto como de todas las detecciones computadas en el interior del objeto.

El siguiente paso definido en el procedimiento consiste en la selección de la región de interés a analizar, especialmente interesante para la reducción de los datos de computo en los próximos pasos del procedimiento, dotando de una mayor eficiencia computacional.

Finalmente, se procede a la detección de defectos, en este caso porosidades, que implica una disminución en los niveles de gris resultantes de la inspección. Para la detección se recurre al algoritmo VGEasyPore del software empleado, que identifica los vóxeles como defectos en base al valor de gris local de cada uno de ellos en comparación al valor umbral de contraste local especificado.

Una vez realizado el procedimiento, la caracterización de la detección de defectos tanto en tamaño, forma y localización de los mismos, además de en porcentaje y distribución, se consideran esenciales para la estimación de su influencia en el comportamiento y fallo de los componentes. Por ende, se determina el análisis de las siguientes características de porosidad en la detección:

- Volumen de cada poro detectado.

- Área proyectada en el plano normal a la dirección de la carga (XY).
- Relación de aspecto (β), definida en la ecuación (1), utilizando las dimensiones del rectángulo/caja envolvente en cada dirección (XYZ) de cada defecto detectado.
- Mínima distancia entre poros, evaluada como la longitud mínima entre las superficies de las esferas circunscritas de los poros más cercanos.
- Mínima distancia al borde, calculada como la mínima longitud entre la superficie del poro detectado y el borde de la probeta.

2.2.2. Modelización por MEF

La modelización mediante MEF se lleva a cabo utilizando el software ABAQUS 6.14. Como se ha mencionado, la geometría del modelo viene definida por la inspección CT. En consecuencia, la discretización del dominio definido por dicha geometría se puede realizar mediante distintas técnicas, generalmente agrupadas según el tipo de discretización proporcionada, estructurada o no estructurada. En este último grupo destacan los métodos basados en *Delaunay*, *Advancing Front* o *Octree*, que proporcionan discretizaciones con elementos tetraedros (3D). En este caso, dada la complejidad geométrica del modelo y para dotar de mayor fiabilidad al mismo, se emplean este tipo de técnicas con elementos de segundo orden (C3D10M).

Por otro lado, las propiedades del material se definen según el ensayo de tracción realizado en la Probeta 1 (sin defectos detectados), utilizando 0.29 como coeficiente de poisson [4]. La densidad del material se establece en $8.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [5]. Finalmente, la fractura se define atendiendo a la teoría de daño dúctil desarrollada en el marco de los mecanismos de daño continuo [6]. Se trata de un modelo fenomenológico basado en la nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades. En este método, el concepto de daño es dependiente de parámetros como la triaxialidad, el ángulo Lode y el ratio de deformación plástica equivalente; denotando cierta sensibilidad al estado tensional aparente [7]. Por consiguiente, su utilización se encuentra justificada para el planteamiento propuesto de MEF basado en CT, puesto que se tienen en cuenta las geometrías de los defectos internos, así como el estado tensional derivado de los mismos.

Finalmente, las condiciones de contorno se definen acorde al ensayo realizado, restringiendo las rotaciones en Z en ambos extremos e imponiendo el desplazamiento en Z de un extremo, mientras el otro permanece constante en posición Z.

2.2.3. Casuísticas e hipótesis virtuales

Una vez definido el modelo y contrastada su validación con la experimentación, se procede a la resolución de casuísticas e hipótesis virtuales mediante el mismo, con ánimo de abarcar un mayor rango de posibilidades y analizar su repercusión en el comportamiento de los componentes. Para ello, las casuísticas virtuales se definen con el objetivo caracterizar la influencia del tamaño y la forma de un único defecto en cada supuesto planteado. Asimismo, con ánimo de procurar un análisis fiable de la influencia de las distintas características a estudio, así como facilitar la comparativa entre los resultados obtenidos, se define el análisis en el régimen de comportamiento elástico del material, para un mismo instante de deformación.

Para el análisis de los resultados, se presta especial atención al campo tensional generado alrededor de los defectos, que alcanza máximos en el ecuador de los mismos, en función de la aplicación de la carga, y determina el comportamiento y posterior fallo del componente. En consideración de dicho fenómeno, cabe destacar que los resultados se analizan en dicha sección transversal del ecuador del defecto (véase Figura 3). Para dicho propósito, se consideran la triaxialidad (η) y la componente de tensión σ_{33} (en la dirección de la carga), como las variables a analizar en el estudio. La triaxialidad (η), definida mediante la ecuación (3), hace referencia al ratio entre la tensión hidrostática (σ_m) y la tensión equivalente de Von Mises ($\bar{\sigma}$), donde σ hace referencia al tensor de tensiones, mientras σ_1 , σ_2 y σ_3 a las tensiones principales.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\frac{1}{3}\text{tr}(\sigma)}{\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}} \quad (3)$$

Este parámetro de triaxialidad (η) resulta de gran interés para el análisis del estado tensional, puesto que representa la relación entre la tensión hidrostática y deviatora [8]. Además, su repercusión en la estimación del fallo del componente es considerable [9], como se describe en el apartado anterior.

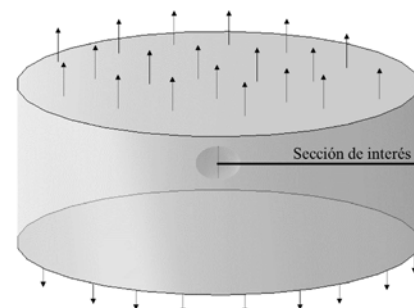


Figura 3. Esquema de las casuísticas virtuales. Posición de los defectos y sección de interés para la representación de resultados.

3. Resultados

3.1. Detección de defectos por CT

La representación de los resultados obtenidos en el proceso de detección de defectos mediante la inspección por CT, tanto de las probetas originales como tras el ensayo de tracción, se presenta en la Figura 4.

disminuciones del 0.041% (Probeta 2), 0.116% (Probeta 3) y 0.138% (Probeta 4) obtenidas en la inspección.

Por otro lado, la comparativa entre la inspección de las probetas originales y tras el ensayo de tracción revela cierta información de interés, especialmente en cuanto a la detección de nuevos defectos y el crecimiento de los detectados previamente. Este último se analiza en

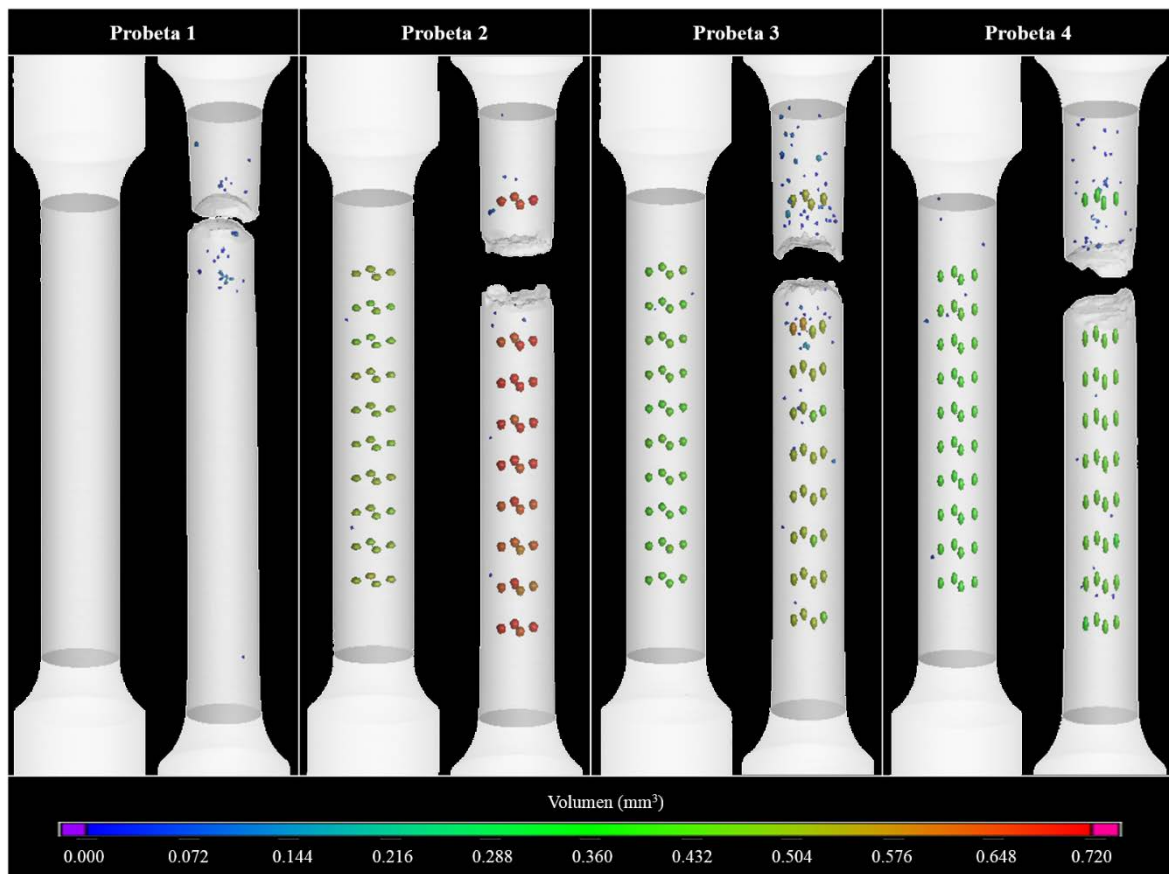


Figura 4. Análisis de porosidad por CT de las probetas originales y tras el ensayo de tracción. Representación con escala de colores en función del volumen de cada poro detectado.

En la Probeta 1 no se han detectado defectos mediante el procedimiento propuesto, coincidiendo con el propósito del estudio. Asimismo, se puede afirmar la detección de los 40 poros provocados en cada una de las probetas restantes, amén de la presencia de otros no intencionados y derivados del propio proceso de fabricación. Adicionalmente a los poros diseñados, se detectan dos poros en las probetas 2 y 3, mientras que la Probeta 4 muestra 7 poros de esta clase.

Por otro lado, hay que destacar la reducción en volumen de los poros detectados, bien derivado del propio proceso de fabricación y material empleados, o bien del proceso de detección establecido. Las diferencias se contrastan con el porcentaje de porosidad definido por diseño de 0.610% en la región de interés, frente a las

la Figura 5. Como se aprecia, los poros inducidos de forma artificial sufren un incremento de volumen aproximado del 37.5% (Probeta 2), 17.1% (Probeta 3) y 3.2% (Probeta 4) de media. Asimismo, la relación de aspecto (β) media muestra una reducción en valor absoluto de 0.540, 0.335 y 0.156, respectivamente. Estas características denotan el alargamiento de los poros en la dirección de aplicación de la carga y su estrechamiento en dirección transversal, procurando una deformación del mismo hacía formas de elipsoide prolato. Este fenómeno, tanto el crecimiento en volumen como la reducción en relación de aspecto (β), demuestra una relación considerable en función de la forma original del poro, denotando un fomento de dicho efecto a medida que aumenta la relación de aspecto (β) inicial. Por tanto, se considera que esta situación se ve propiciada

por el estado tensional generado alrededor de los poros, definido en parte por la forma de los mismos.

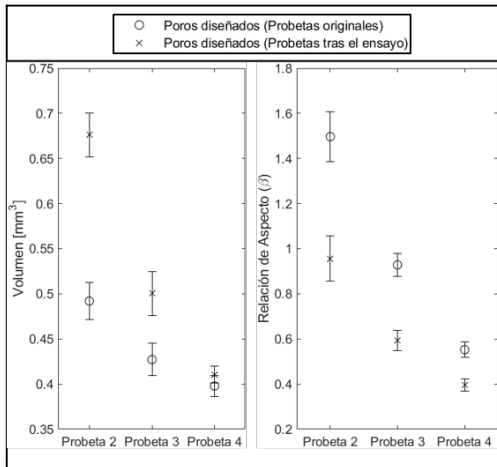


Figura 5. Comparativa de volumen y relación de aspecto (β) entre los poros diseñados de las probetas originales y tras el ensayo. Resultados de media y desviación estándar.

Por consiguiente, además de los poros diseñados, el presente estudio se encuentra condicionado por la aparición de los defectos no intencionados en las probetas originales. Con el objetivo de estimar la influencia de las distintas características de porosidad, tanto de los poros diseñados como no diseñados, se precisa de un análisis de porosidad más exhaustivo, teniendo en cuenta los resultados de cada poro en cada característica definida. Estos resultados se presentan en la Figura 6, destacando además el nivel en el eje Z donde finalmente se produce la fractura.

Los resultados revelan la presencia de dos poros adicionales próximos a niveles con poros definidos por diseño en la Probeta 2. Ambos poros revelan características similares en tamaño, forma y distancia al borde, sin embargo, la distancia mínima con alguno de los poros diseñados se encuentra reducida en 0.485 mm por el poro representado en azul, próximo al nivel de poros diseñados donde se produce la fractura final.

En el caso de la Probeta 3, también se detectan dos poros no intencionados, con tamaño y forma prácticamente iguales. Las diferencias principales se encuentran en las características referentes al espaciado, presentando una distancia mínima de 0.784mm entre poros y una distancia al borde mínima de 1.314mm, respectivamente. Por tanto, la presencia de estos poros en torno al mismo nivel de poros diseñados promueve la fractura final en dicho nivel.

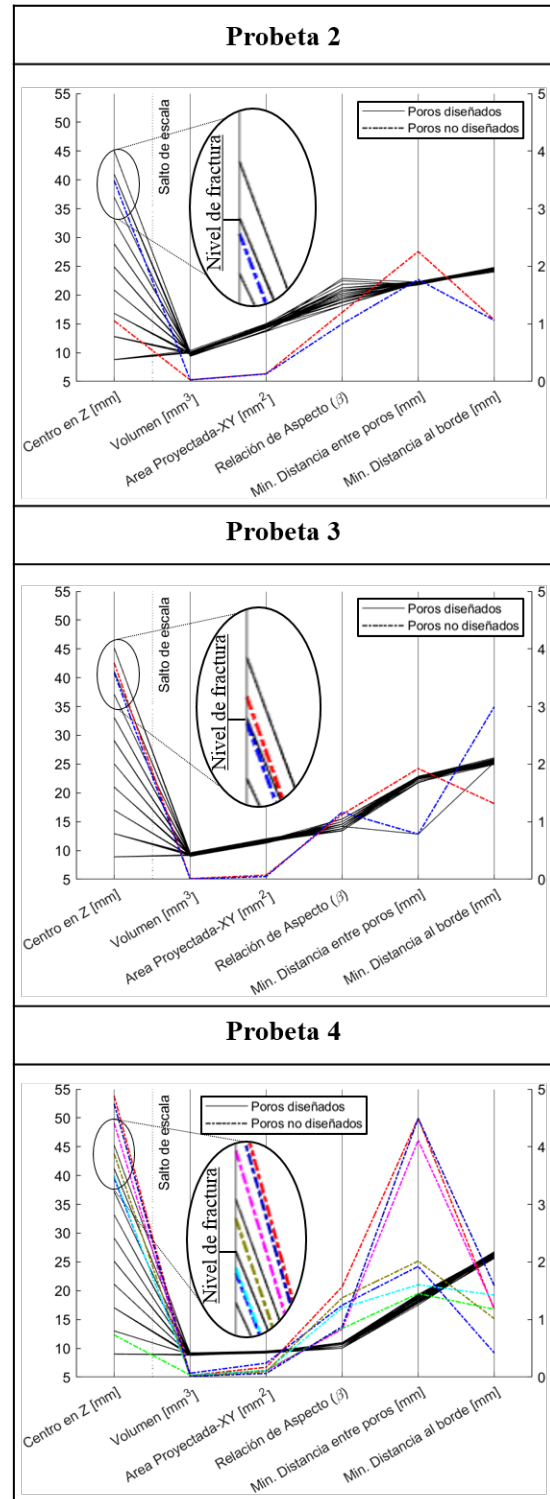


Figura 6. Resultados del análisis de porosidad por CT de las probetas originales. Representación de las distintas características de cada poro, tanto diseñados (líneas continuas negras) como no diseñados (líneas discontinuas a color). Nivel de fractura indicado.

Finalmente, la Probeta 4 presenta siete defectos no provocados que fomentan la fractura anticipada de la probeta. En este caso, los tres poros no diseñados alrededor del nivel de fractura identificado destacan principalmente por sus relaciones de aspecto en un intervalo de 1.200-1.377, las distancias mínimas entre poros de 1.604-2.014 y las distancias al borde con valores entre 0.420-1.424, que representan algunos de los resultados más perjudiciales del estudio en cada característica. Por ende, la fractura final del componente se produce en dicho nivel estudiado.

3.2. Ensayos experimentales de tracción

Los resultados del ensayo de tracción de cada probeta a estudio se presentan en la Figura 7.

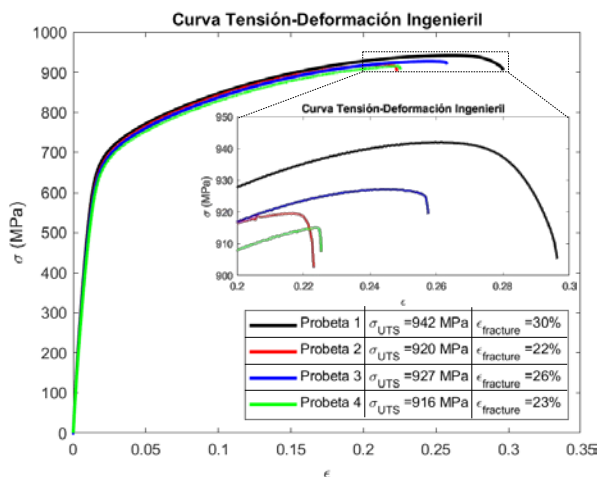


Figura 7. Curvas Tensión-Deformación de cada probeta. Resultados de resistencia última y elongación a fractura.

Las curvas de Tensión-Deformación Ingenieril demuestran un comportamiento similar entre las distintas probetas, especialmente en la zona elástica y plástica. Sin embargo, la zona de estricción y rotura final presenta ciertas discrepancias a tener en cuenta, propiciando la consideración de la resistencia última y la elongación a fractura como los principales indicadores de la influencia de la porosidad en el comportamiento del componente, en este caso de estudio. Los resultados de las tres primeras probetas demuestran resultados coherentes, demostrando la influencia de los poros presentes en las mismas. Por el contrario, la Probeta 4 manifiesta un comportamiento singular posiblemente derivado de los poros no inducidos en la probeta.

Asimismo, en la Figura 8 se presentan las superficies de fractura de cada probeta, que describen una fractura moderadamente dúctil en forma de copa-cono. En consecuencia, la forma plana radial descrita desde el centro de la probeta hasta cierta distancia del borde se produce

por la coalescencia de los poros en el plano normal a la dirección de la carga, mientras que la forma cónica descrita en los bordes se genera por las tensiones cortantes. Por consiguiente, se determina que la fractura comienza en ese plano normal a la dirección de la carga. En definitiva, la fractura final se deriva del estado tensional acaecido, demostrando que la concentración de tensiones provocada por los defectos de porosidad propicia la fractura final del componente.

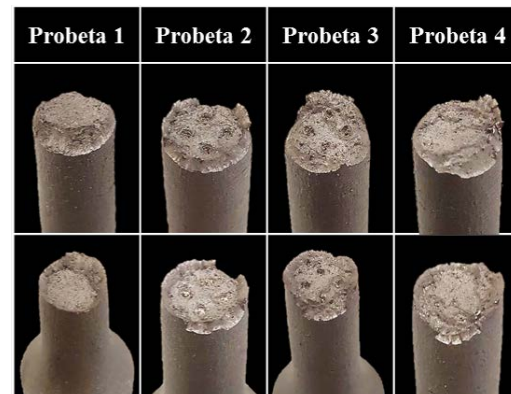


Figura 8. Imagen de la superficie de fractura de las probetas tras el ensayo de tracción.

3.3. Gemelo digital

3.3.1. Ensayos virtuales de tracción

Con ánimo de procurar cierta eficiencia en el coste computacional del sistema y dada la similitud entre los distintos niveles de poros diseñados, así como la repercusión de los poros no inducidos por diseño en el nivel de fractura, se ha optado por la modelización de dichos niveles de interés únicamente. Los resultados obtenidos revelan un ajuste considerable con errores de predicción en resistencia última y elongación a fractura menores de 2.5% y 4%, respectivamente (véase Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de resistencia última y elongación a fractura obtenidos mediante los ensayos virtuales.

Probeta	1	2	3	4
σ_{UTS} (MPa)	951.6	921.0	936.5	927.1
$\epsilon_{fractura}$ (%)	29.7	22.9	25.9	23.4

Asimismo, los resultados de simulación se presentan en la Figura 9, denotando la influencia de la triaxialidad en el inicio y propagación de la fractura, localizada en los puntos donde dicho parámetro alcanza sus máximos.

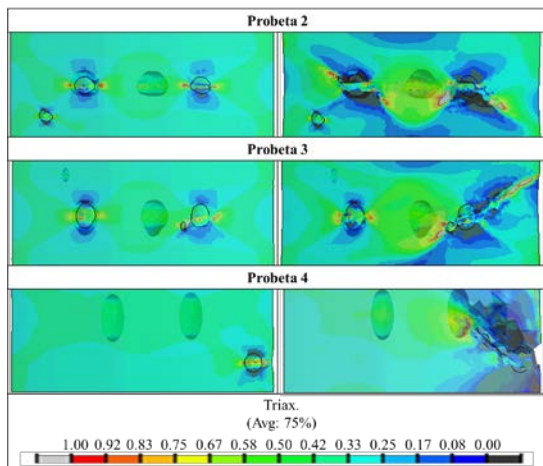


Figura 9. Resultados de simulación de las probetas 2, 3 y 4 en función de la triaxialidad. Representación detallada del inicio del fallo (columna izquierda) y su propagación (columna derecha).

En consecuencia, se considera que el modelo propuesto otorga cierta fiabilidad en la estimación del estado tensional derivado de los defectos internos, así como en la predicción del fallo final inducido por dichos defectos.

3.3.2. Casuísticas e hipótesis virtuales

En consideración de lo dispuesto en el apartado (2.2.3. *Casuísticas e hipótesis virtuales*) y dada la fiabilidad contrastada del modelo propuesto (3.3.1. *Ensayos virtuales de tracción*), se establece la resolución de las casuísticas e hipótesis virtuales definidas. Como se ha mencionado anteriormente, en aras de comparación de las distintas casuísticas, el análisis se centra en el estado tensional derivado de cada situación virtual definida en un mismo instante de deformación. Para ello y por facilidad y eficiencia de computo, se determina un estado de deformación de 0.011%, considerando el análisis tensional en el rango de comportamiento lineal del material. Asimismo, los resultados se representan en la sección de interés definida previamente.

En primer lugar, se procede al análisis de la influencia del tamaño del defecto en la distribución de tensiones alrededor del mismo. En la Figura 10, se representan dichos resultados para casos de poros esféricos ($\beta=1$). Como se puede apreciar, a medida que aumenta el tamaño del poro, las tensiones aumentan ligeramente y la concentración localizada de las mismas abarca un área mayor. Esta situación se confirma con los resultados de triaxialidad, donde el parámetro alcanza máximos similares para todos los casos de estudio, pero el área encerrada bajo la curva aumenta con el incremento del tamaño de dicho defecto, demostrando el efecto mencionado.

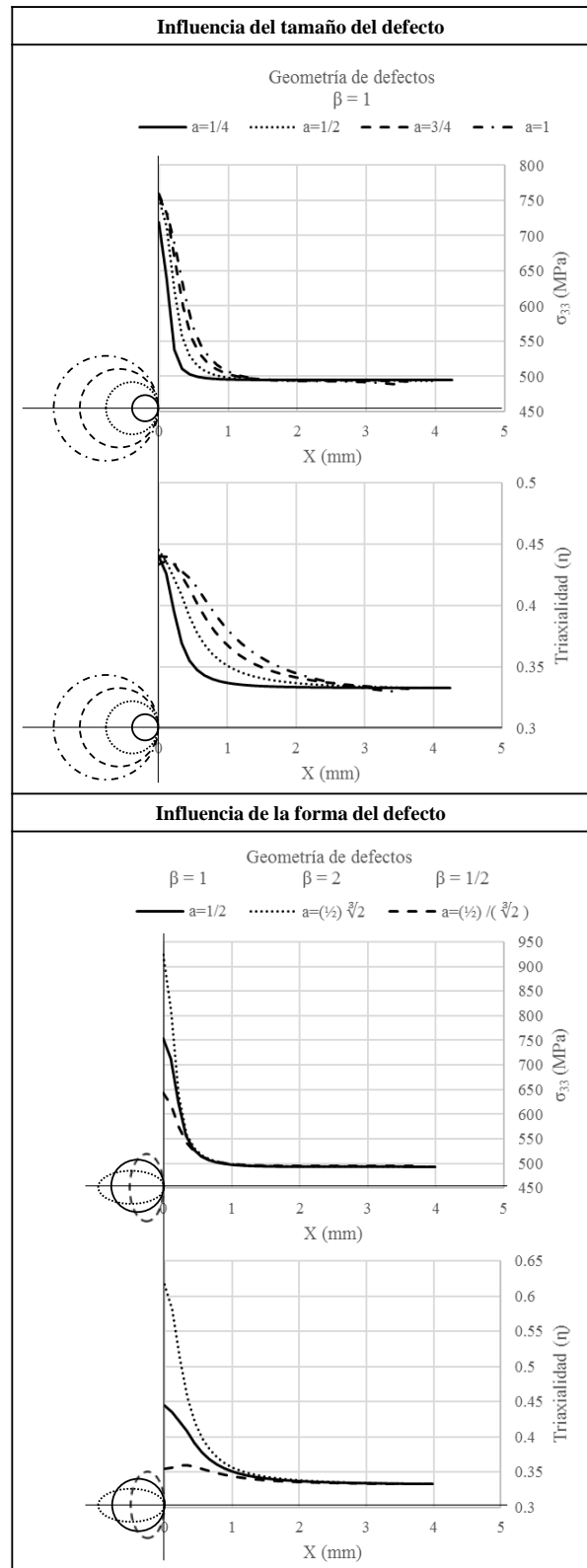


Figura 10. Análisis del efecto del tamaño y la forma del defecto en el campo tensional. Representación de la componente de tensión σ_{33} y la triaxialidad (η) en la sección de interés.

Por otro lado, con ánimo de analizar la influencia de la forma del defecto, en la Figura 10 se representan dichos resultados para casos de poros esféricos ($\beta=1$), oblatos ($\beta=2$) y prolatos ($\beta=1/2$). Cabe resaltar que dichos poros se han configurado para mantener el mismo volumen entre ellos. Los resultados presentes revelan una influencia considerable de la forma del poro en la distribución de tensiones. La reducción de la relación de aspecto definida (β), procura una disminución de las tensiones alrededor del defecto. Asimismo, el parámetro de triaxialidad presenta el mismo efecto, cuya disminución implica una mayor ductilidad y propicia el fallo por cizallamiento correspondiente. El incremento de este parámetro debido al aumento de la relación de aspecto (β) fomenta la tendencia hacia estados tensionales predominantemente hidrostáticos, que conducen a fallos por fractura frágil debido a este fenómeno [10]. Por consiguiente, se estima de gran interés la caracterización de la forma del defecto, dada su implicación en la distribución de tensiones, comportamiento y fallo del componente.

4. Conclusiones

El presente trabajo de investigación propone un modelo MEF basado en CT, para la estimación de la influencia de la porosidad en el comportamiento y fallo de componentes de fabricación aditiva, concretamente de Inconel 718. En consideración de la metodología propuesta y los resultados obtenidos, se destacan las siguientes conclusiones:

El análisis de porosidad mediante CT permite la caracterización de cada defecto, teniendo en cuenta tamaño, forma y posición. Su repercusión radica en la influencia de dichos aspectos en el estado tensional generado, que provoca el crecimiento y coalescencia de dichos defectos y conduce al fallo final del componente.

El aumento del volumen, la forma (incrementando el parámetro definido de relación de aspecto (β)) y el área proyectada en el plano normal a la dirección de la carga, así como la reducción del espaciado entre poros o la distancia al borde del componente, favorecen la concentración de tensiones y, por ende, procuran un aumento de la triaxialidad (η), fomentando así el fallo final.

Asimismo, cabe destacar el comportamiento de los defectos a medida que avanza el ensayo, demostrando un aumento en volumen y la reducción en relación de aspecto (β) en función de la forma original del poro, denotando un fomento de dicho efecto a medida que aumenta la relación de aspecto (β) inicial.

Finalmente, se considera que el modelo propuesto ofrece garantías en la predicción del comportamiento y fallo del componente sometido a esfuerzos de tracción. Los errores alcanzados tanto en resistencia última

como en elongación a fractura son inferiores al 2.5% y 4%, respectivamente.

5. Agradecimientos

Ayuda PID2020-118478RB-100 financiada por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033. Asimismo, esta investigación ha sido financiada por el grupo del Gobierno Vasco IT 1573 -22.

6. Referencias

- [1] B. Zhang, Y. Li, and Q. Bai, "Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review," *Chinese J. Mech. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 515–527, May 2017.
- [2] A. Y. Al-Maharma, S. P. Patil, and B. Markert, "Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 12, 2020.
- [3] A. du Plessis, I. Yadroitsava, and I. Yadroitsev, "Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights," *Mater. Des.*, vol. 187, p. 108385, 2020.
- [4] R. Barros *et al.*, "Laser Powder Bed Fusion of Inconel 718: Residual Stress Analysis Before and After Heat Treatment," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 1290, 2019.
- [5] S. Solutions, "Material Data Sheet Ni-Alloy IN718 / 2.4668," pp. 2–5, 2019.
- [6] H. Hooputra, H. Gese, H. Dell, and H. Werner, "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminium Extrusions," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9, no. 5, pp. 449–464, 2004.
- [7] Y. Bai and T. Wierzbicki, "A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence," *Int. J. Plast.*, vol. 24, no. 6, pp. 1071–1096, 2008.
- [8] J. Peng, P. Zhou, Y. Wang, Q. Dai, and D. Knowles, "Stress Triaxiality and Lode Angle Parameter Characterization of Flat Metal Specimen with Inclined Notch-Jian Peng, Peishuang Zhou, Ying Wang, Qiao Dai, David Knowles and Mahmoud Mostafavi.pdf," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 1627, 2021.
- [9] C. Tekoglu, "Void coalescence in ductile solids containing two populations of voids," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 147, pp. 418–430, 2015.
- [10] V. D. Nguyen, T. Pardoen, and L. Noels, "A nonlocal approach of ductile failure incorporating void growth, internal necking, and shear dominated coalescence mechanisms," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 137, p. 103891, 2020.