



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE POROSIDAD Y PROPIEDADES  
MECÁNICAS EN COMPONENTES CONSTRUIDOS POR MANUFACTURA  
ADITIVA”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ADRIANA ITZEL HERNÁNDEZ CONTRERAS

TUTOR PRINCIPAL: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA (MADiT, ICAT, UNAM)  
CO-TUTOR: DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ (MADiT, ICAT, UNAM)

COMITÉ TUTOR:  
DR. ARMANDO ORTIZ PRADO (FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM)  
DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGÁN (FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM)  
DR. HÉCTOR R. SILLER CARRILLO (UNIVERSITY OF NORTH TEXAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MARZO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ARMANDO ORTIZ PRADO

Secretario: DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGÁN

1<sup>er</sup> Vocal: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

2<sup>do</sup>. Vocal: DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ

3<sup>er</sup> Vocal: DR. HÉCTOR RAFAEL SILLER CARRILLO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT), Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), Universidad Nacional Autónoma de México.

**TUTOR DE TESIS:**  
DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA



A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes, positioned above a horizontal dashed line.

**FIRMA**

Este trabajo fue realizado por medio del proyecto CONACYT LN-314934, LN-232719, LN-271897, LN-280867, LN-294415 e INFR-294752. También mediante el soporte financiero GAPA-UNAM a través del proyecto PAPIME IN106410 y al programa de becas y becas mixtas de CONACYT (CVU 555640). Gracias por el apoyo otorgado.

A mi amado esposo Juan Gustavo, por todo el amor, cariño y ayuda a lo largo de este proceso, te amo siempre.

A mis padres Rosa y Héctor por todo su apoyo y amor siempre incondicional, los amo.

A mis hermanos Jimena, Víctor, Octavio y Liz por todas las risas y el aliento que me ayudaba a seguir.

Al Dr. Leopoldo Ruiz, gracias por permitirme trabajar en este proyecto, gracias por su invaluable asesoría y guía, pero sobre todo gracias por su amistad.

Al Dr. Alberto Caballero, gracias por su apoyo, orientación y consejos sin los cuales el camino habría sido más complicado.

A las doctoras Yara, Verena, Karla, Yareli y Rosaura en las cuales siempre encontré una amiga con sabias palabras de ánimo y aliento.

A mis amigos (hermanos académicos) Luis y Horacio gracias por su amistad, por todo el apoyo y por siempre estar ahí en las buenas y las malas.

Finalmente, pero no menos importante, a todo el equipo que conforman el MADiT: Homero, Montse, Fer, Rodri, Leo, Alan, Dr. Erasmo, Dra. Rocío, Dr. Octavio, Nora, Arturo, Karen, Pablo, Erick, Dani, Luis, Toño, Marcos, Orlando, Tona, Gio, Emmanuel, Beto, y a todos los que pude olvidar una disculpa, gracias por todo.

# CONTENIDO

<b>Prólogo</b> .....	1
<b>1. Antecedentes</b> .....	2
1.1 Definición de la manufactura aditiva .....	2
1.2 Clasificación de la manufactura aditiva .....	2
1.3 Pasos de la manufactura aditiva .....	9
1.4 Potencial y oportunidades de la Manufactura Aditiva .....	11
1.5 La Manufactura Aditiva en la industria.....	12
1.6 Caracterización mecánica de componentes manufacturados aditivamente.....	12
1.6.1 Caracterización mecánica de componentes manufacturados por Extrusión de Material.....	13
1.7 Técnicas de caracterización componentes manufacturados aditivamente .....	17
1.8 Impacto de los poros en el desempeño mecánico .....	20
<b>2. Problemática</b> .....	24
2.1 Hipótesis.....	25
2.2 Objetivo.....	25
2.3 Recursos .....	25
2.4 Alcances .....	25
<b>3. Marco teórico</b> .....	26
3.1 Tomografía Computarizada.....	26
3.1.1 Pasos de la Tomografía Computarizada .....	27
3.1.2 Descriptores en la Tomografía Computarizada .....	31
3.2 Descriptores de poros .....	32
3.3 Pruebas de tracción y normas para caracterización de MA .....	34
<b>4. Desarrollo del estudio</b> .....	36
4.1 Propuesta .....	36
4.2 Manufactura de probetas por medio de ME/FDM .....	36
4.3 Escaneo por Tomografía Computarizada por rayos X .....	37
4.4 Análisis de poros .....	39
4.5 Pruebas de tracción.....	42

<b>5. Resultados y análisis de pruebas de tracción y análisis de poros .....</b>	<b>43</b>
5.1 Resultados de pruebas de tracción .....	43
5.2 Resultados del análisis de poros .....	46
5.2.1 Propuesta y cálculo del descriptor de orientación de poro .....	47
5.2.2 Sensibilidad y especificidad .....	49
5.3 Relación entre orientación del poro y propiedades mecánicas .....	51
<b>6. Discusiones y conclusiones .....</b>	<b>53</b>
Referencias.....	56
Productos académicos .....	68
Artículo de revista .....	68
Artículos de congreso.....	68

# Prólogo

La porosidad de un componente mecánico es uno de los principales temas de estudio en el área de detección de fallas. Esto se debe a que los poros de los componentes tienen un impacto negativo en las propiedades mecánicas ya que propician una baja resistencia, infiltraciones, fragilidad, fracturas tempranas, entre otras deficiencias. Los poros de un componente son comúnmente generados durante el proceso de manufactura donde burbujas de aire o gas quedan atrapadas en la estructura, también surgen a partir de inclusiones o cambios en la temperatura o presión.

A diferencia de técnicas convencionales de sustracción o conformado, los componentes manufacturados mediante Manufactura Aditiva (MA) presentan una estructura mayormente porosa. Esto se debe a que, al construir un componente mediante la adición de material, no siempre se presenta una completa adherencia. Este fenómeno se observa principalmente en componentes manufacturados por procesos de extrusión de filamentos como la Extrusión de Material particularmente en el Modelado por deposición Fundida (FDM) donde, por medio de pruebas de tracción, se ha identificado un bajo desempeño mecánico y anisotropía, fenómenos asociados a los poros. Estos poros son identificados comúnmente por medio de la Tomografía Computarizada (CT) que, al ser una prueba no destructiva, permite el estudio de componentes únicos como lo suelen ser los manufacturados por MA.

En este trabajo se estudia la relación entre poros y propiedades mecánicas aplicado a probetas manufacturadas aditivamente, para tal efecto, esta tesis se divide en seis apartados; en el primero se establecen los antecedentes centrados en las generalidades de la MA, una revisión de la literatura enfocada a la caracterización mecánica en MA, técnicas de caracterización de componentes MA y cómo impactan los poros a las propiedades mecánicas de manera general; en el segundo se presenta la problemática, hipótesis, objetivo, recursos disponibles y alcances; el tercero contiene el marco teórico donde se describen a los poros, técnicas de medición de poros enfocadas a la CT, descripción de pruebas de tracción y normas utilizadas en estas pruebas para componentes MA; en el cuarto se realiza el desarrollo del estudio mediante la manufactura de probetas producidas aditivamente, su análisis de poros y su caracterización mecánica por pruebas de tracción; en el quinto se muestran los análisis y resultados de la experimentación; en el sexto se realizan las discusiones y conclusiones y finalmente las referencias y los productos académicos desarrollados a lo largo del doctorado.

# 1. Antecedentes

## 1.1 Definición de la manufactura aditiva

Para la definición de términos referentes a los procesos de la Manufactura Aditiva (MA) en el año 2015 la Organización Internacional de Normalización ISO y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) establecieron la norma ISO/ASTM 52900 [1]. Esta norma define a la MA como el proceso de construcción de un componente por medio de la unión de material, usualmente capa por capa, a diferencia de los procesos convencionales de sustracción o conformado. El componente por construir proviene de un modelo digital obtenido mediante Diseño Asistido por Computadora (CAD) o digitalización.

Es posible referirse a la MA de diferentes maneras, una de ellas es Impresión 3D (*3D Printing*) la cual hace alusión al rociado de tinta por medio de una impresora, lo cual resulta un nombre no del todo correcto; otro nombre es el de Prototipado rápido (*Rapid prototyping*) el cual fue comúnmente utilizado refiriéndose a que era una técnica exclusiva para la manufactura de prototipos, otro nombre es el de Estereolitografía (*Stereolithography*) el cual fue uno de los primeros procesos de MA en desarrollarse [1–3].

## 1.2 Clasificación de la manufactura aditiva

La Manufactura Aditiva es el término que se le da a aquellos procesos de manufactura que, a partir de un modelo digital y de manera automatizada, se realizan por medio de adición de material. Existen diversas formas en que los procesos de MA son clasificados, esto depende del estado de la materia prima que alimenta la máquina (polvo, filamento, láminas, etc.), al tipo de material (polímero, metales, resinas, etc.), u otros [3–5]. Según la norma ISO/ASTM [1], Stavropoulos et. al. [6] y Silva et. al. [7], la MA se clasifica en siete procesos que son: rociado de aglutinante, deposición de energía directa, fusión en cama de polvos, laminado, extrusión de material, rociado de material y fotopolimerización en tina. Esta clasificación está basada en cómo el material es agregado (extrusión, rociado de material, cama de polvos, etc.) y a la forma en que es unido (rociado de aglutinante, fotopolimerización, etc.). Estos siete procesos se describen brevemente a continuación.

### **Rociado de aglutinante (*Binder Jetting BJ*)**

El proceso de BJ normalmente se lleva a cabo con dos materiales, uno en forma de polvo con base cerámica/metálica el cual genera la estructura del componente, y el otro un aglutinante líquido que une el polvo entre sí. Para la construcción de un componente, el polvo metal/cerámico se coloca en una plataforma de construcción, un rodillo nivelador se hace pasar por encima de esta capa de polvo para asegurar la distribución y compactación, después, por medio de una boquilla, un aglutinante es rociado en forma de gotas de manera selectiva, para

generar una capa. La plataforma desciende, dependiendo de la altura de la capa y otra capa de polvo es colocada y compactada por medio del rodillo. De esta manera, capa a capa se construye el componente [8,9]. Tecnologías asociadas a este proceso son *Direct Shell Production Casting* (DSPC), *ZCorp* y *ProMetal*. En la Figura 1 se muestra un diagrama de este proceso.

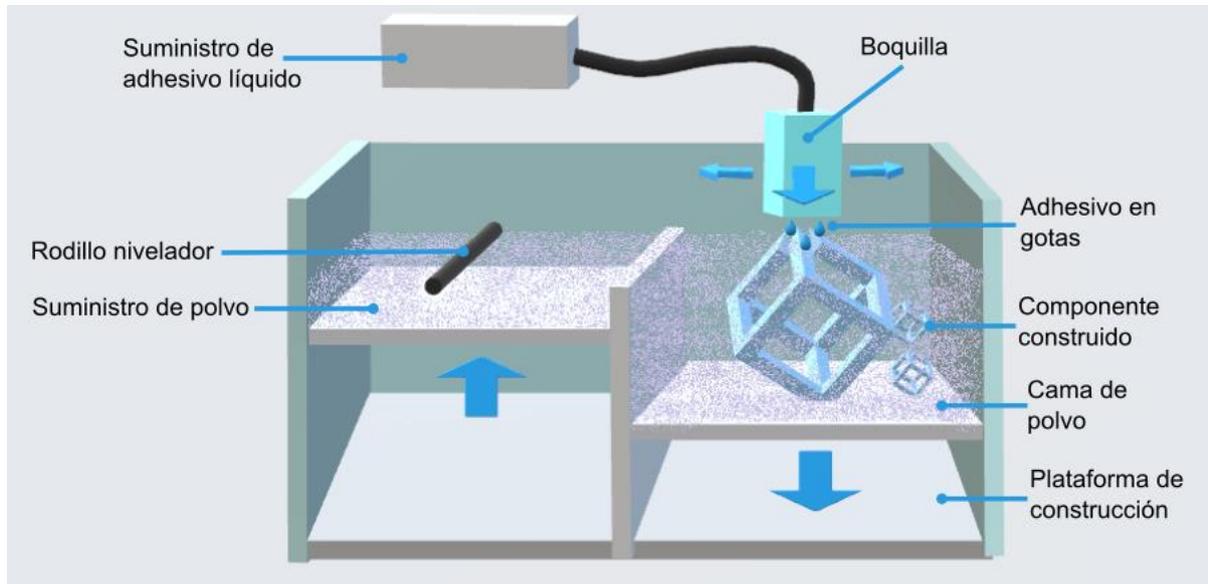


Figura 1. Diagrama del proceso de BJ.

### Deposición de energía directa (*Direct Energy Deposition DED*)

Este proceso utiliza como materia prima principalmente materiales metálicos y está dirigido a actividades tales como revestimientos, reparación y construcción de componentes. En este proceso, el material se encuentra en forma de micro-alambre o polvo el cual es suministrado a la construcción por medio de una boquilla de inyección. Para realizar la unión, el material es fundido por un láser controlado por medio de un lente, como resultado, se genera un pozo de fusión lo que causa una sinterización con el material precedente. La boquilla y el láser siguen una trayectoria a lo largo de la construcción hasta que una capa es generada. Cuando el proceso es aplicado a la construcción de un componente, estos pasos se repiten hasta generar todas las capas [8,10], en la Figura 2 se muestra un diagrama del proceso.

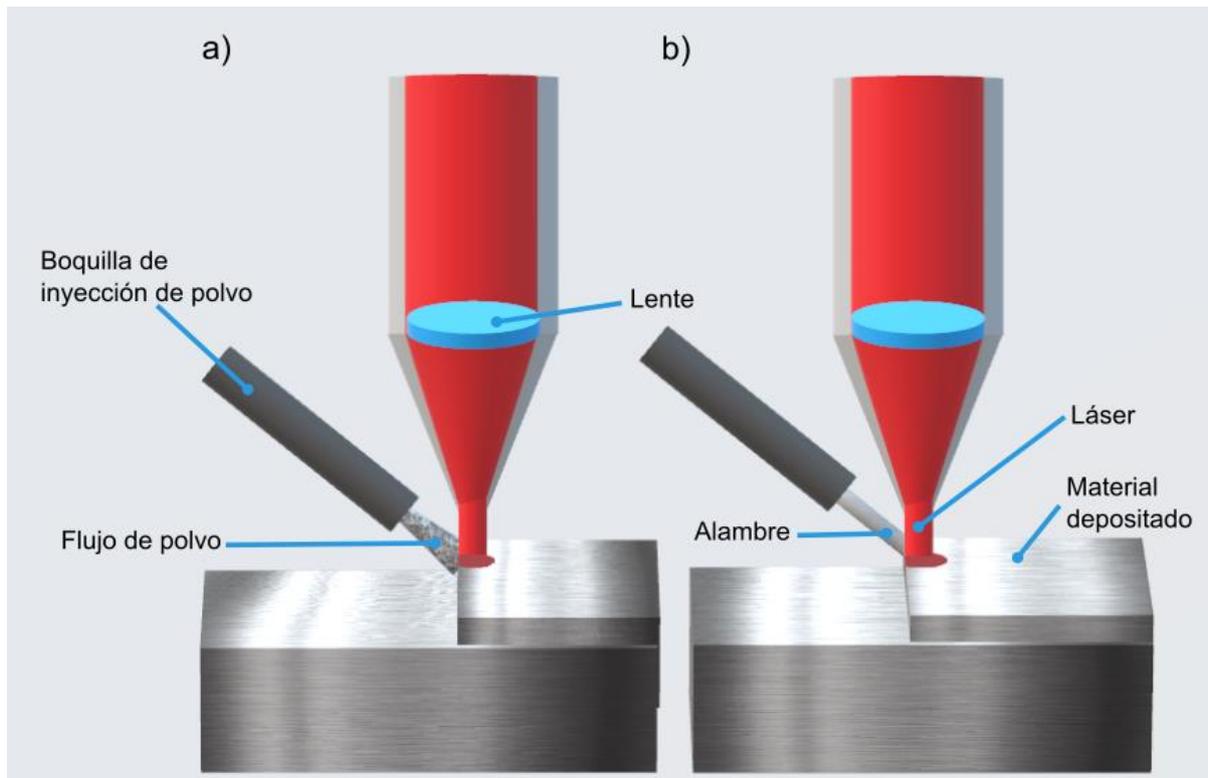


Figura 2. Diagrama del proceso de DED con el material en estado de a) polvo y b) alambre.

Las tecnologías relacionadas a este proceso son: fabricación de estructuras diseñadas por láser (LENS), formación láser (*LasForm*), fabricación ligera directa (DLF), deposición directa de metal (DMD), consolidación láser, fabricación de forma libre por láser (LFF), entre otras [8,11].

### **Fusión en cama de polvos (*Powder Bed Fusion PBF*)**

Los materiales para manufacturar componentes por medio de este proceso son variados, éstos pueden ser metales, polímeros, cerámicos o compuestos. En este proceso, el polvo se encuentra contenido en un tanque del cual, por medio de un rodillo o navaja, es suministrado a la plataforma de construcción en forma de una capa delgada, luego, un láser con velocidad controlada funde el polvo de manera selectiva lo que genera un pozo de fusión y una unión entre el material. Una vez que la temperatura del material disminuye, una nueva capa de polvo es esparcida sobre el material previamente sinterizado, el proceso se repite hasta generar todas las capas [8,12,13]. Algunas tecnologías basadas en este proceso son el sinterizado selectivo por láser (SLS), fusión selectiva por láser (SLM) y fusión por rayo de electrones. Un diagrama general de este proceso puede observarse en la Figura 3.

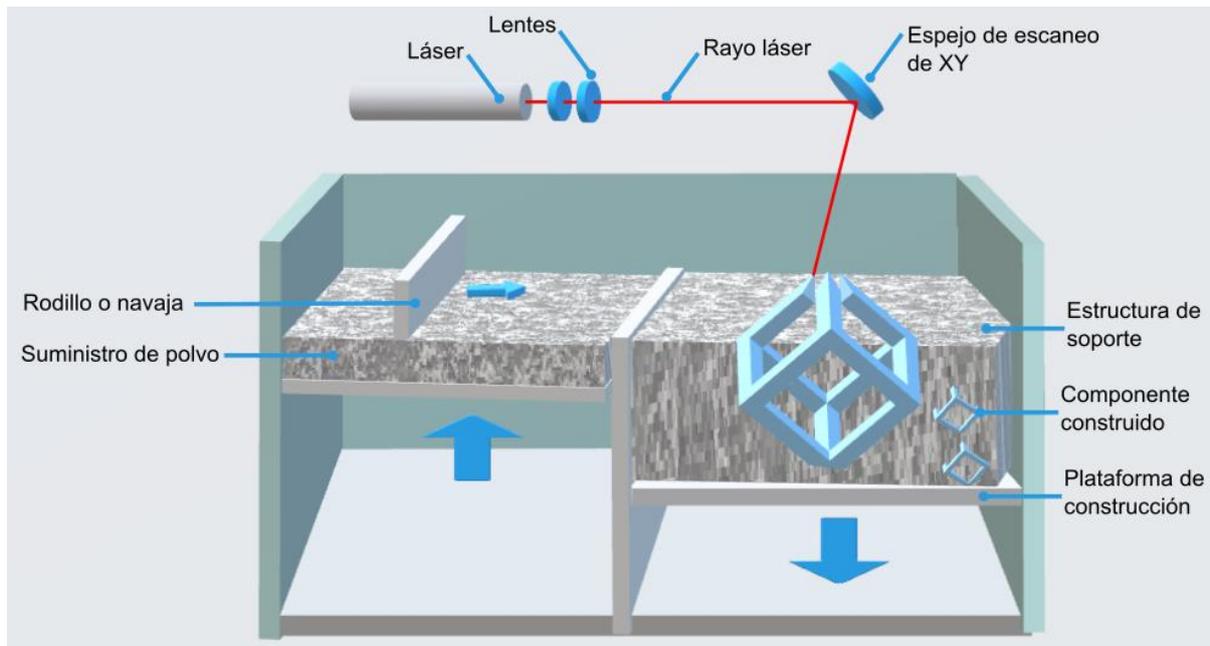


Figura 3. Diagrama del proceso de PBF.

### Laminado (*Sheet Lamination SL*)

En este proceso se usan hojas, láminas o rollos de diferentes materiales, entre los materiales más usados se encuentra el papel, metales y otros. Para la manufactura de un componente, el material es colocado sobre una plataforma de construcción, por medio de cuchillas o de láser el material es cortado para formar la geometría de una capa. El material sobrante es retirado y posteriormente, nuevo material es colocado sobre el corte previo, el material añadido puede ser unido por medio de adhesivos, ultrasonido, cambios térmicos o compresión. Una vez unidos, el nuevo material es cortado y el proceso se repite hasta la finalización del componente [8,14,15]. Las tecnologías de este proceso se clasifican dependiendo de la herramienta para unir o cortar las láminas, algunas de ellas son: consolidación ultrasónica (UC), manufactura de objetos laminados (LOM), Tecnología de laminación de papel (PLT), etc. Un diagrama genérico de este proceso puede verse en la Figura 4.

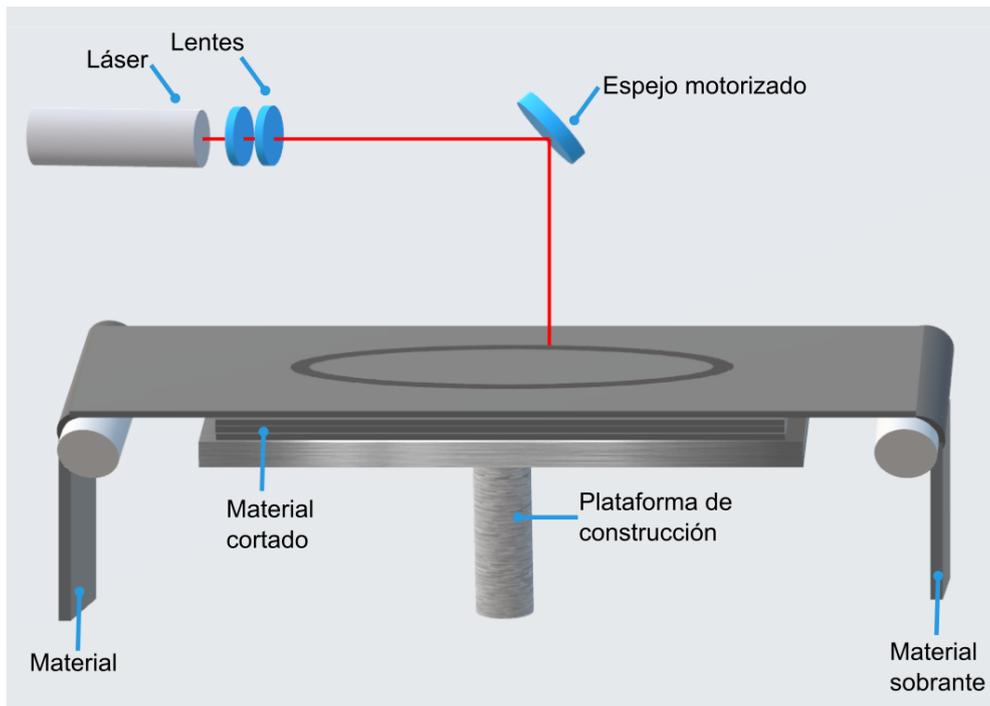


Figura 4. Diagrama del proceso de SL.

### Extrusión de material (Material Extrusión ME)

Los materiales usados en este proceso se encuentran en forma de: filamentos en rollo, pastas o pellets, donde los más frecuentes son polímeros termoplásticos (acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), policarbonato (PC), ácido poliláctico (PLA), nylon, etc.), cerámicas (zirconia, arcilla, etc.), cementos, entre otros. Para la construcción de un componente, el material es extruido a través de una boquilla que se encuentra sobre un cabezal, éste se mueve a lo largo de una plataforma de construcción en un plano  $xy$ . El material se deposita en forma de filamentos formando el contorno de la capa y luego este contorno es rellenado por filamentos colocados en zigzag, de esta manera los filamentos se unen entre sí para generar la geometría de la capa. Cuando se manufacturan componentes con partes en cantiléver o agujeros, material de soporte es depositado para sostener la estructura, este material es después removido de manera manual y química. Los filamentos depositados se unen con la capa precedente, luego la plataforma de construcción baja dependiendo de la altura de la capa y se repite el proceso hasta formar el componente completo [8,16,17]. Algunas tecnologías asociadas al proceso de extrusión de material son: el modelado por deposición fundida (FDM), la fabricación de filamentos fundidos (FFF) y la manufactura aditiva de gran área (BAAM) [18–20]. Un diagrama de este proceso puede verse en la Figura 5.

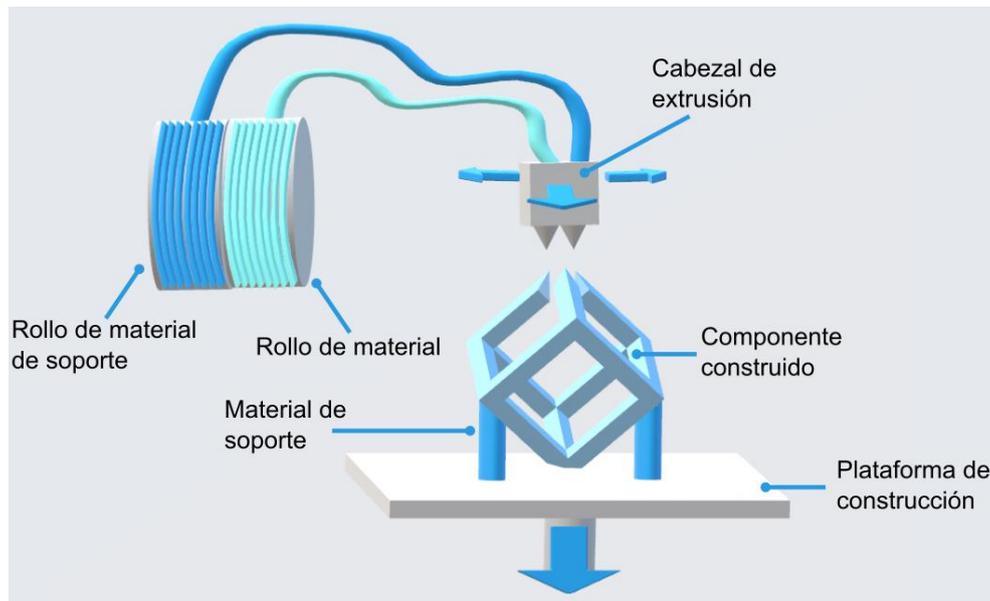


Figura 5. Diagrama del proceso de ME.

### Rociado de material (*Material Jetting MJ*)

En este proceso se utilizan materiales fotosensibles (aquellos que reaccionan y endurecen en presencia de luz ultravioleta) como lo son cerámicas (sílice, alúmina, etc.), resinas fotopoliméricas (de acrilato, metacrilato, epóxicas, etc.) o hidrogeles (polietilenglicol, óxido de polietileno, etc.) [21–23]. Para llevar a cabo este proceso, el material en estado líquido es rociado por cabezales a una plataforma de construcción. Las gotas depositadas son inmediatamente curadas por medio de lámparas de luz ultravioleta dispuestas a los costados de los cabezales. Los cabezales, junto con las lámparas, se desplazan sobre la plataforma hasta generar una capa. Una vez la capa está formada, la plataforma baja para que una nueva capa sea depositada, así hasta finalizar el componente. En este proceso también se utiliza material de soporte para sostener estructuras en cantiléver, agujeros, etc. [8,24]. Una de las tecnologías asociadas a este proceso es el *Photopolymer Jetting* o *PolyJet*. En la Figura 6 se muestra un diagrama genérico del proceso de MJ.

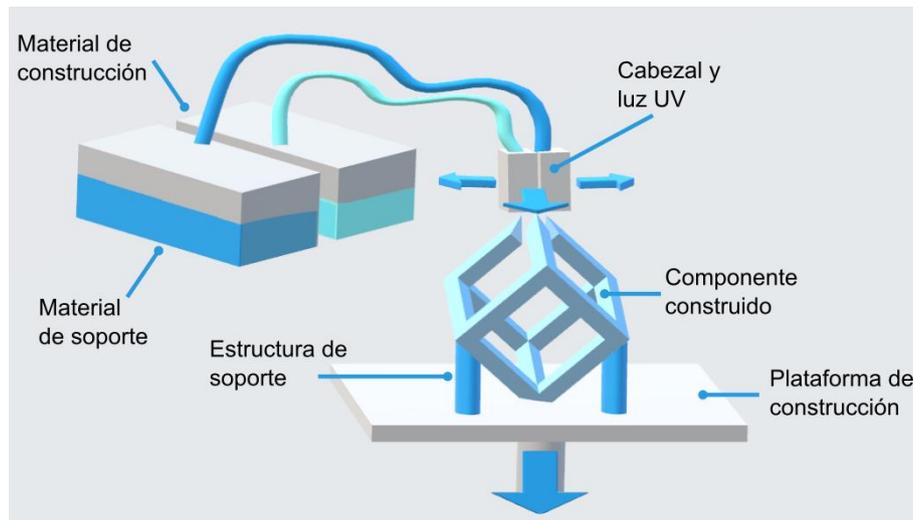


Figura 6. Diagrama del proceso de MJ.

### Fotopolimerización en tina (*Vat Photopolymerization*)

En este proceso se utilizan materiales fotocurables como los mencionados en la descripción del proceso de rociado de material. En este proceso, el material se encuentra en estado líquido en una tina sobre una plataforma de construcción. Existen dos maneras de curar y endurecer el material; en la primera, una proyección de luz con la forma de la geometría de la capa es proyectada sobre la tina, esto hace que la resina se endurezca con la forma proyectada; en la segunda manera, un láser es proyectado de manera selectiva sobre la resina, trazando la trayectoria que forma la geometría de la capa. Una vez la capa se ha formado, la plataforma baja y esta capa es cubierta con la resina que aún permanece líquida. Para nivelar la resina, se pasa una navaja por encima o se deja que la misma resina se asiente, y una nueva capa es formada [8,24]. En la Figura 7 se muestra un diagrama de este proceso.

Como se mencionó, este proceso puede llevarse a cabo por medio de dos métodos de curado, la tecnología basada en el curado por láser es la estereolitografía (SLA), mientras que existen dos tecnologías que curan por proyección de luz en forma de la capa, el procesamiento de luz digital (DLP) y la polimerización con 2 fotones (TPP) [25–27].

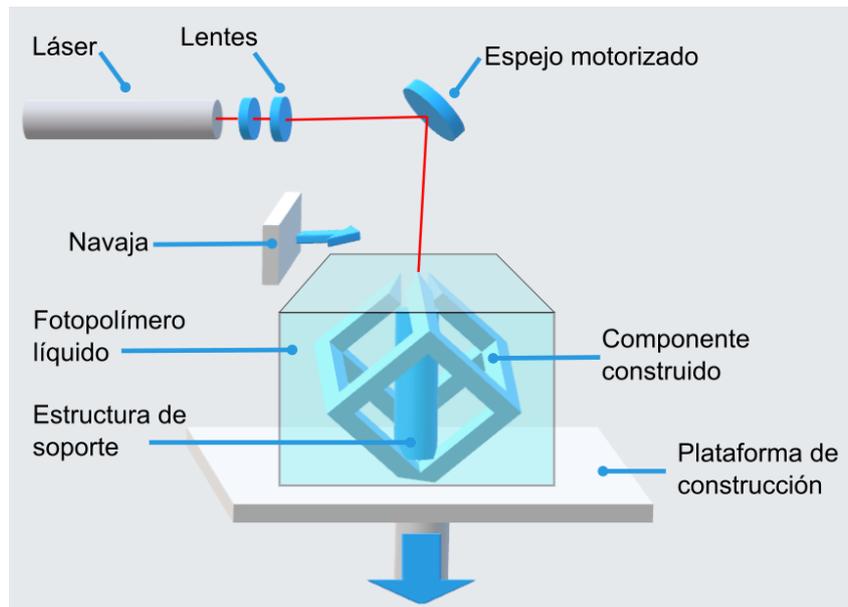


Figura 7. Proceso de Fotopolimerización en tina.

### 1.3 Pasos de la manufactura aditiva

No obstante la variedad de procesos que componen la manufactura aditiva, se han definido ciertos pasos que son comunes a todos estos procesos y tecnologías. Según Gibson [28], Vaneker et. al. [29] y Medellín-Castillo et. al. [30], la MA puede ser resumida en 8 pasos (Figura 8) los cuales se resumen a continuación:



Figura 8. Pasos de la MA.

**Paso 1: CAD.**

El componente es diseñado y modelado por medio de CAD o por medio de ingeniería inversa utilizando la digitalización.

**Paso 2: Conversión a archivo “.stl”.**

El archivo digital del componente es convertido a un archivo “.stl” (*Standard Tessellation Language*) que es una extensión estándar en la MA; este tipo de archivo describe las superficies externas cerradas del componente a manufacturar por medio de la teselación que es cubrir una superficie con una o más figuras geométricas sin superposiciones ni espacios entre ellas, en estos archivos generalmente se usan triángulos. Esta teselación es también la base para el cálculo de las capas del componente.

**Paso 3: Transferencia a sistema de MA y manipulación de archivo .stl.**

El archivo digital “.stl” es transferido al equipo de MA. En este paso se realizan ajustes de parámetros asociados a la tecnología a utilizar tales como la definición de las capas o rebanadas en las que será seccionado el componente a partir del archivo “.stl”, es decir, la altura de capa, orientación de construcción con respecto a la plataforma de construcción, posicionamiento en la plataforma de construcción, tamaño, entre otras.

**Paso 4: Ajuste de máquina.**

La máquina de MA es preparada para la construcción, se realizan ajustes referentes a parámetros como la carga del material, fuente de energía, tiempos de construcción, etc.

**Paso 5: Construcción.**

Se lleva a cabo la construcción del componente adicionando material capa a capa hasta terminar el proceso. Generalmente las máquinas de MA son automáticas y pueden realizar las construcciones sin necesidad de supervisión, una revisión superficial puede ser necesaria para evitar errores en la construcción debido a falta de material, de energía o problemas en el *software*.

**Paso 6: Retiro de pieza.**

Una vez terminado el proceso de construcción es necesario retirar el componente de la plataforma de construcción, esto requiere de interacción con la máquina, teniendo en cuenta la seguridad de operación.

**Paso 7: Post-proceso.**

Cuando el componente es removido de la máquina, generalmente es necesario realizar un post-proceso como puede ser limpieza de material excedente, acabado superficial, tratamientos térmicos, pintura, etc.

**Paso 8: Aplicación.**

Una vez que los post-procesos necesarios se llevaron a cabo, el componente puede ser usado para la aplicación correspondiente.

## 1.4 Potencial y oportunidades de la Manufactura Aditiva

La Manufactura Aditiva ha sido considerada como revolucionaria dado el potencial que ofrece en áreas que van desde el diseño con la reducción de interpretación de planos, hasta el área del impacto ambiental con la reducción del desperdicio y el material residual. Amplios y variados son los aspectos de este conjunto de procesos que los hacen atractivos para la industria y el comercio reduciendo cadenas de valor, así como ahorro en tiempos de proceso y costos. Según diversos autores [5,28,31–36], algunos de los potenciales de la MA son la libertad de forma, manufactura de lotes pequeños, personalización, ahorro de tiempos y costos, manufactura en una etapa, incremento en la productividad, permite la optimización topológica, no es necesario el uso de varios equipos, cortas cadenas de proceso, manufactura de mecanismos ensamblados, manufactura de componentes multimaterial, amplio intervalo de materiales, alta resolución, manufactura de mini componentes robustos, manufactura in situ, entre otros.

A pesar de la larga lista de los potenciales de la MA, ésta también posee una amplia área de oportunidades y mejoras. Dado los numerosos parámetros a modificar, diversos materiales y equipos existentes, una estandarización se ha vuelto una tarea larga y complicada [33,37,38]. Aunado a lo anterior, los componentes manufacturados mediante MA muestran irregularidades en su estructura como porosidades, fracturas, pobre acabado superficial, por mencionar algunos [31,33]. Irregularidades como los poros generan un desempeño mecánico de entre 65% y 90% comparado con componentes manufacturados por métodos convencionales [39–41]. Generalmente, los componentes MA poseen también propiedades anisotrópicas [39,42–46].

Todas estas áreas de oportunidad han sido ampliamente identificadas [5,31–33,47–49], otras de esta son: variación en propiedades mecánicas, existencia de esfuerzos residuales, alta porosidad, necesidad de post-procesos para reducción de porosidades, mejora de acabado superficial, reducción de esfuerzos residuales, etc., limitaciones de tamaño, pobre acabado superficial, algunos procesos requieren de costosos sistemas para mantener un ambiente inerte o sistemas de seguridad, entre otros.

Estas características de la MA, principalmente la que se enfoca al desempeño mecánico de componentes, son susceptibles de estudio dado que suponen un área de oportunidad para un mejor entendimiento, así como para una mayor y mejor explotación de las tecnologías de MA disponibles y para su aplicación en la industria.

## 1.5 La Manufactura Aditiva en la industria

La MA ha llamado la atención durante décadas, pero no fue hasta años recientes que ha alcanzado una mayor notoriedad. La actividad de fusiones y adquisiciones, el incremento de nuevos proveedores, la evolución de tecnologías ya existentes y el desarrollo de nuevas, ha elevado a la MA de ser una serie de tecnologías para prototipos a unas listas para la producción. Tal desarrollo la ha hecho más atractiva para nuevos participantes e inversiones, inyectando mayor dinamismo tanto a la demanda como a la oferta [50].

Dado este impulso, diversos sectores han implementado a la MA en sus procesos, algunos de ellos son el aeroespacial, el automovilístico, el de alimentos, el médico, el de envasado de productos, el químico, el electrónico, entre otros. De los anteriores, el aeroespacial tiene la mayor experiencia en el uso de la MA dada la posibilidad de la reducción de material necesitado para la construcción de componentes, optimización de productos (en términos de peso y consolidación) y principalmente la reducción del tiempo de construcción. Otros sectores con menos experiencia con MA como la construcción, el transporte y logística, han mostrado un interés en la inversión de MA debido a que su aplicación podría resultar en un completamente nuevo modelo de negocios [50–52].

Según un estudio realizado en 2018 [53] el proceso de Extrusión de Material utilizando materiales termoplásticos, es el proceso que tiene el mayor mercado para MA con ingresos de \$3.7 billones de dólares en ese año, siendo la tecnología MA más popular [54–56] y la mayor fuente de ingresos según un estudio realizado en 2019 [57] donde 40% de compañías alrededor del mundo, incluido México, afirmaron que Extrusión de Material es el proceso que mayor ingresos aporta.

## 1.6 Caracterización mecánica de componentes manufacturados aditivamente

Como se mencionó en el apartado 1.4, el comportamiento mecánico de los componentes manufacturados mediante Manufactura Aditiva es uno de los grandes retos a resolver. Esto ha llevado al desarrollo de estudios para la caracterización de probetas de MA por medio de pruebas mecánicas de fatiga, flexión y tracción, siendo esta última la más utilizada. En procesos de Extrusión de Material, particularmente en tecnologías como la FDM, se han identificado propiedades mecánicas de termoplásticos (ABS, PLA, nylon) como el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_c$ ) y módulo de Young ( $E$ ) de entre 20% y 70% menores que en procesos como el moldeo

por inyección [39,58,59], a diferencia de otras tecnologías como el SLM, donde aleaciones metálicas (titanio, níquel, Inconel) tienen un  $\sigma_c$  30% mayor a las manufacturadas por procesos como la fundición o forja de metal [60–63]. También, ME presenta alta anisotropía, es decir, sus propiedades mecánicas como  $\sigma_c$  y  $E$  cambian dependiendo del eje ortogonal en las que son medidas con una variación de hasta 87%, mientras que otras como el Rociado de Material es de alrededor de 8%. En la Tabla 1 se muestra una comparación de diferentes procesos y tecnologías de MA.

Tabla 1. Comparación entre diferentes procesos y tecnologías de MA [26,58–67]

Proceso	Materiales	Comparación de $\sigma_c$ y $E$ con procesos tradicionales	Porcentaje de anisotropía de $\sigma_c$ y $E$ (variación de propiedades en ejes ortogonales)	Porosidad
Extrusión de Material, FDM	ABS, PLA y Nylon	entre 20% y 70% menor	entre 30% y 87%	hasta 23%
Fusión en cama de polvos, SLM y SLS	Titanio, Níquel e Inconel	30% mayor	~ 10%	hasta 1%
Rociado de material, PolyJet	Polipropileno (PP), ZrO <sub>2</sub> y Fullcure 705	Similar	entre 8% y 20%	hasta 3%
Fotopolimerización en tina, DLP	Resina (Accura amethyst), Zirconio	Similar	~ 10%	hasta 5%

De la Tabla 1 es posible observar que el proceso de Extrusión de Material, particularmente la tecnología FDM, posee un desempeño mecánico menor en comparación con procesos tradicionales, altas porosidades, y sobre todo, posee una anisotropía elevada en comparación con los demás procesos, esto lo hace susceptible a estudiar de manera profunda, dado lo mostrado en la Tabla 1 y su amplio uso e importancia en la industria; a continuación, se describe una revisión de la literatura de las propiedades mecánicas de probetas manufacturadas mediante el proceso de Extrusión de Material.

### 1.6.1 Caracterización mecánica de componentes manufacturados por Extrusión de Material

En 2002, para comparar el desempeño mecánico entre probetas manufacturadas aditiva y tradicionalmente, Ahn et. al. [39] experimentaron con probetas de ABS manufacturadas por dos procesos: FDM y moldeo por inyección. Todas las probetas fueron sometidas a pruebas de tracción, como resultado se identificó que los valores de  $\sigma_c$  de las probetas de FDM era aproximadamente 30% menor que el de las probetas inyectadas. Esta diferencia fue identificada

también por Masood et. al. [58] en 2010, tras realizar la misma comparación esta vez con probetas de policarbonato, ellos observaron una diferencia de entre el 20% y 30% del  $\sigma_c$  siendo mayor el valor de las probetas inyectadas.

Estudios más recientes realizados en 2018 por Askanian et. al. [68] mostraron que, probetas de ácido poliláctico (PLA) manufacturadas por FDM tienen un valor de  $E$  30% menor comparado con una probeta de inyección. Mientras que, en 2019, Lay et. al. [59] observaron que, probetas de ABS, PLA y nylon manufacturadas por FDM tienen un valor de  $\sigma_c$ ,  $E$ , elongación a la ruptura y esfuerzo al impacto 48%, 50%, 48% y 78% respectivamente menor al de probetas inyectadas con los mismos materiales.

Según diversos autores [39,58,69–71], la razón por la que el desempeño mecánico de las probetas manufacturadas por ME es una fracción de aquellas manufacturadas mediante procesos tradicionales es debido a la variación de los parámetros de construcción. Estos parámetros son principalmente la orientación de construcción, el ángulo de deposición de filamentos y el espacio entre filamentos.

El parámetro “orientación de construcción” se refiere a la orientación que se le da al componente a manufacturar con respecto a la plataforma de construcción. Para la manufactura de probetas estandarizadas para pruebas de tracción, las orientaciones más comunes son *edge*, *flat* y *upright*. En la Figura 9 se muestran estas orientaciones donde la plataforma de construcción es el plano  $xy$  y el eje  $z$  es la dirección de construcción. La variación de la orientación de construcción ha mostrado generar anisotropía en los valores de propiedades mecánicas como el de esfuerzo de tracción ( $\sigma_t$ ),  $\sigma_c$  y  $E$  [42,70,72,73].

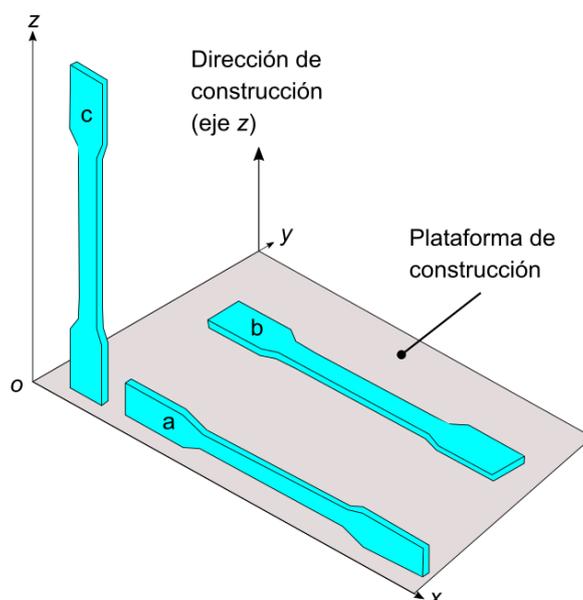


Figura 9. Orientaciones de construcción donde “a” es *edge*, “b” es *flat* y “c” es *upright*.

Estudios basados en la caracterización mecánica de probetas de ABS construidas mediante ME han mostrado que, la orientación *edge*, tiene un mejor desempeño que *flat* y ésta a su vez mayor

que *upright* [69,74,75]. Estas caracterizaciones identificaron que *edge* tiene un valor promedio de  $\sigma_c$  de entre 16% y 87% más que *flat* y *upright* respectivamente y un valor promedio de  $E$  de entre 4% y 12% nuevamente mayor que *flat* y *upright*. Se observaron también características propias de cada orientación; las probetas *upright* mostraron rupturas abruptas por fragilidad acompañadas de una pequeña deformación y baja resistencia debida a una débil unión entre capas, mientras que las probetas *flat* resultaron ligeramente más rígidas y menos resistentes en comparación con *edge*. Finalmente, en las probetas *edge*, se observó un comportamiento mayormente elástico, una mayor resistencia a la fractura y una estructura menos porosa debido a un mejor acomodo del material depositado.

La porosidad es la medida que determina un volumen en donde no existe material dentro de un elemento, siendo una fracción del volumen total, esta medida se encuentra entre 0 y 1, o como un porcentaje de entre 0% y 100% [76]. La porosidad en función de la orientación de construcción ha sido identificada también por otros autores donde este parámetro determina el porcentaje de porosidad en los componentes, esto debido a una falta de unión entre filamentos que se presenta más frecuentemente en unas orientaciones que en otras [77,78]. El aumento de la porosidad en los componentes genera una disminución en valores de propiedades como el  $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  y  $E$  [39,71].

Otro parámetro asociado a la porosidad es el “espacio entre filamentos”; como su nombre lo dice, este parámetro define la distancia entre filamentos depositados, su valor puede variar dependiendo del material, así como de la geometría del componente [8]. Diversos autores [17,39,58,79] han determinado que la variación de este parámetro impacta la resistencia del componente. Cuando este parámetro incrementa ( $> 0$  [mm]) genera huecos en la estructura lo cual eleva el porcentaje de porosidad y disminuye drásticamente su resistencia; por otro lado, cuando este valor es de 0 [mm] o menor, la porosidad es reducida, lo que incrementa su resistencia. Sin embargo, aunque un componente se construya con un espacio entre filamentos de 0 [mm] o negativo, el desempeño mecánico sigue siendo menor que el de componentes hechos por procesos convencionales. Lo anterior se debe a una falta de cohesión entre filamentos que causan en el componente una porosidad de hasta un 23% [71,78,80]. En la Figura 10 se observan filamentos depositados con diferentes espacios entre filamentos.

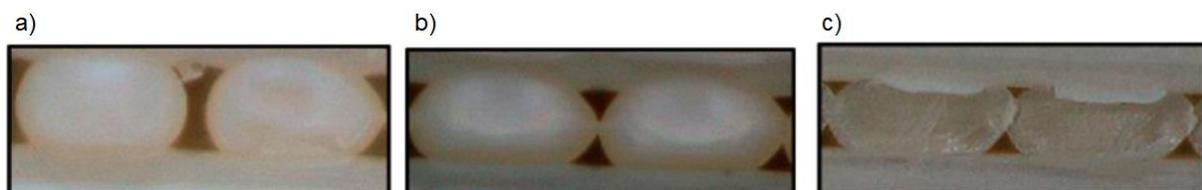


Figura 10. Espacio entre filamentos a) positivo ( $> 0$  [mm]), b) 0 [mm] y c) negativo ( $< 0$  [mm]) (adaptado de [79]).

La formación de porosidad en ME ocurre también debido a la geometría circular de la boquilla, y por la tanto, del filamento extruido. Cuando el filamento es depositado, éste tiene un factor de “aplastamiento” lo que genera que, durante su solidificación, su sección transversal cambie

de circular a elipsoidal [81–83]. La altura de un filamento depositado puede disminuir hasta en un 60% de su altura inicial [84]. Esta geometría elipsoidal no permite la unión completa entre filamentos adyacentes, lo que lleva a la generación de poros, en la Figura 11 se observa este fenómeno.

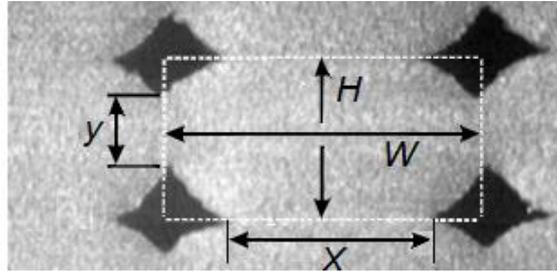


Figura 11. Tomografía de la sección transversal elipsoidal de los filamentos de un componente FDM, donde  $H$  es la altura del filamento,  $W$  es su ancho,  $y$  es la longitud de unión entre filamentos laterales y  $x$  la longitud de unión entre filamentos superior e inferior (adaptado de [81]).

Otro fenómeno que genera porosidad entre filamentos asociado a la geometría de la boquilla es que, dada su forma circular el relleno de esquinas resulta inadecuado, en la Figura 12 es posible observar este fenómeno donde se presentan porosidades entre el relleno interno y los contornos. También, el filamento del que se alimenta a la máquina de ME contiene porosidades provenientes de la extrusión para su manufactura [85], y en el caso de los filamentos depositados, estas porosidades se deben principalmente al cambio de dirección de deposición del material [77]. Sin embargo, este tipo de porosidades alojadas dentro del filamento no presenta un mayor impacto en las propiedades mecánicas de los componentes finales [86].

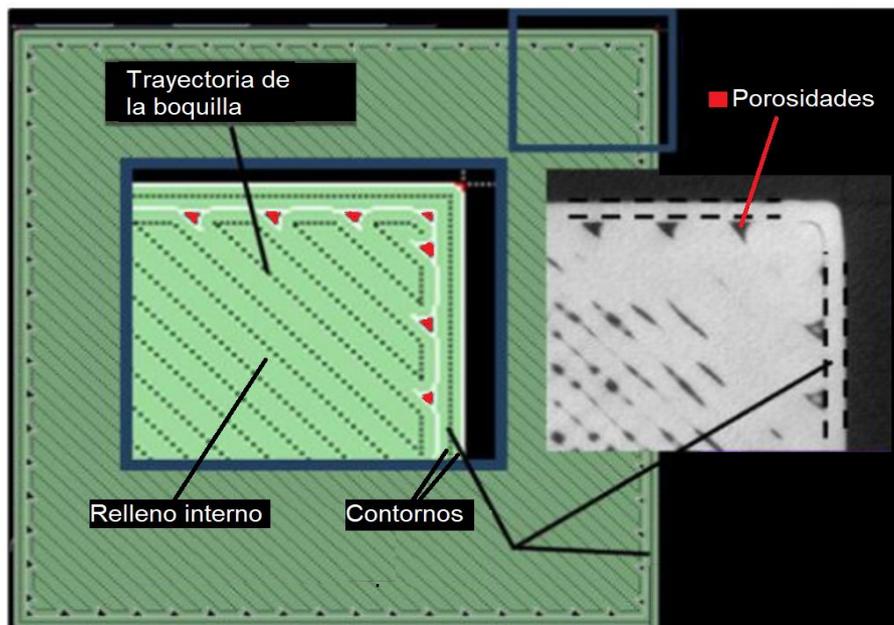


Figura 12. Porosidades (en rojo) generadas entre relleno interno y contornos debido a la geometría circular de la boquilla, donde se observa la trayectoria generada por el *software* (verde) y la tomografía de una capa del objeto (gris) (adaptado de [78]).

Como se mencionó al inicio de esta sección, otro parámetro que influye sobre las propiedades mecánicas de los componentes es el “ángulo de deposición de filamentos”. Este parámetro determina el ángulo en que los filamentos serán depositados con respecto al eje  $x$  de la plataforma de construcción, este parámetro puede variar de entre  $0^\circ$  a  $90^\circ$  ver Figura 13. Se ha identificado que este parámetro genera variaciones en propiedades como el esfuerzo de tracción y el módulo de Young [39,72,87], donde  $\sigma_c$  aumenta cuando el valor del parámetro es cercano a  $0^\circ$  [58], esto debido a un mayor contacto entre filamentos y a que la carga se ejerce de manera paralela a la longitud máxima de los filamentos [69,88]. Se ha encontrado que los componentes con un ángulo de  $0^\circ$  tienen un  $E$  40% mayor que aquellos con un ángulo cercano a los  $90^\circ$ .

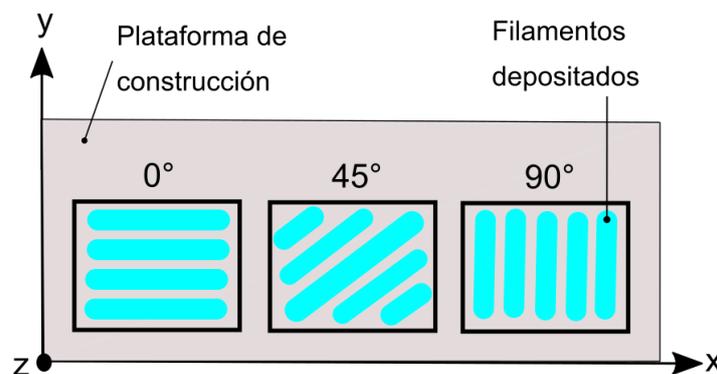


Figura 13. Diferentes ángulos de deposición de filamento con respecto al eje  $x$  de la plataforma de construcción.

Una alta porosidad se presenta en componentes manufacturados por ME, esto se da como resultado de la variación parámetros de construcción como la orientación de construcción, el espacio entre filamentos y el ángulo de deposición de los filamentos. Todas estas irregularidades en la estructura generan un comportamiento anisotrópico, una baja resistencia y ductilidad de los componentes de ME ante cargas externas. Sin embargo, no se ha determinado una relación directa entre los poros y las propiedades mecánicas a las que afectan.

## 1.7 Técnicas de caracterización componentes manufacturados aditivamente

Desde que la MA pasó de ser un conjunto de procesos para la construcción de prototipos a uno de construcción de componentes de uso final, la necesidad de comprender cómo se comportan estos componentes para usarlos de manera confiable se volvió una necesidad. La caracterización mecánica de componentes MA se lleva a cabo principalmente por medio de pruebas mecánicas, mientras que otras técnicas son aplicadas para la caracterización de dimensiones, morfología, porosidad, etc.

Una de las técnicas más utilizadas para la caracterización de la estructura de componentes MA es la Tomografía Computarizada por rayos X o CT por sus siglas en inglés [77,78,89,90], esta técnica es una prueba no destructiva lo cual la hace adecuada para el análisis de MA dado que usualmente, los componentes MA son únicos y la destrucción para su análisis no es una opción viable. Esta técnica no cuenta con una norma para su aplicación, lo que la hace una técnica de inspección. Funciona a partir de la interacción de los rayos X con la materia, su operación se basa en irradiar el componente de interés con rayos X, éstos atraviesan el componente y son luego recolectados por un detector el cual genera la imagen del objeto, para generar el modelo tridimensional, el componente es irradiado en diferentes perfiles, las imágenes generadas son luego ensambladas para formar el modelo 3D [91]. Esta técnica permite la medición dimensional del componente (con un error asociado), el análisis de poros de forma 3D, análisis de inclusiones, la visualización de la estructura interna, entre otras. En la Figura 14 es posible observar la caracterización de poros de probetas manufacturadas por PBF en diferentes orientaciones.

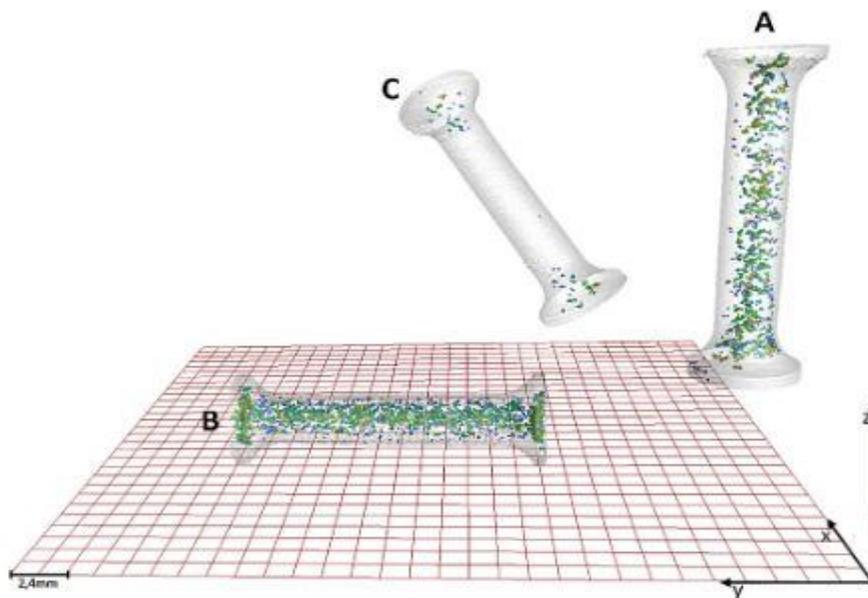


Figura 14. Caracterización de poros mediante CT de probetas de acero inoxidable manufacturadas por PBF (adaptado de [90])

Otra técnica para la caracterización de componentes MA es la Máquina de Medición por Coordenadas o CMM [92–94], esta técnica permite medir las dimensiones de la geometría de los componentes, esta técnica utiliza un sistema de coordenadas y un palpador que puede ser mecánico, láser, óptico o de luz blanca que puede moverse en  $x$ ,  $y$ ,  $z$  con el que va tocando el componente, este palpador envía las coordenadas de los puntos que toca a una computadora que genera una nube de puntos que describen la forma del componente. En la Figura 15 se observa un componente manufacturado por BJ siendo caracterizado por una máquina de CMM, usualmente esta técnica se utiliza para identificar la exactitud dimensional de los componentes MA y compararlos con el modelo CAD con el que son construidos.

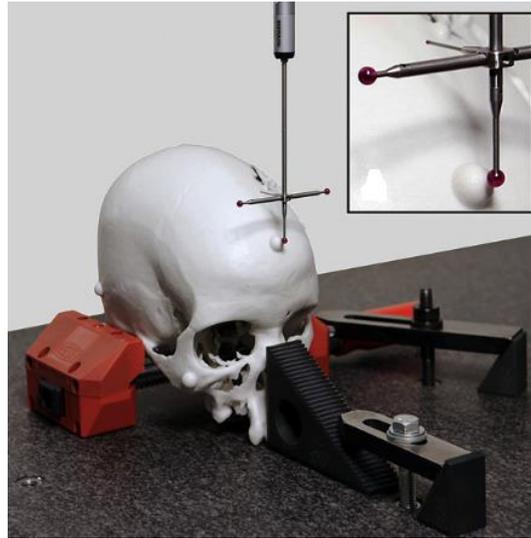


Figura 15. Caracterización por CMM de las dimensiones de un componente manufacturado por BJ (adaptado de [92])

Para la caracterización de las fracturas generadas por pruebas mecánicas en las probetas MA, una de las técnicas más utilizadas es el Microscopio Electrónico de Barrido o SEM por sus siglas en inglés [69,95,96], esta técnica permite generar imágenes de alta resolución en el rango de nanómetros y se basa en la interacción de electrones con el material, donde electrones son acelerados en un campo eléctrico hacia el espécimen, los electrones secundarios emitidos durante la interacción son captados por un detector, para generar una imagen, la sección a analizar se escanea completamente [97]. En la Figura 16 se muestran cuatro imágenes SEM para la caracterización de la fractura de probetas manufacturadas por ME. El SEM también se utiliza para caracterizar la estructura de componentes manufacturados por ME y la morfología del polvo utilizado en procesos como el PBF [17,98].

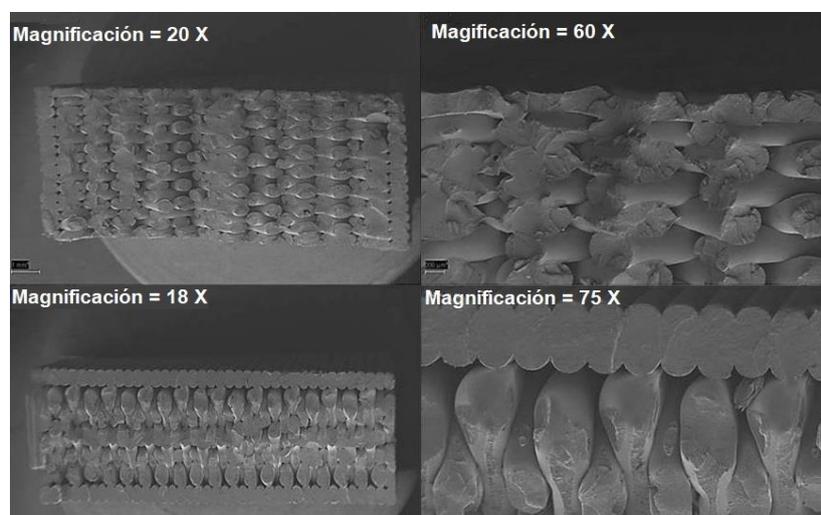


Figura 16. Imágenes SEM de la fractura generada por pruebas de tracción de probetas construidas por medio de ME (adaptado de [69])

## 1.8 Impacto de los poros en el desempeño mecánico

Todos los componentes contienen poros en cierta medida, en algunos casos éstos son deseados para llevar a cabo ciertas funciones en el material como transporte de materia, alojamiento de medicamentos, crecimiento de células, entre otros [99–101]. Sin embargo, en algunos componentes mecánicos estos poros se consideran defectos debido a que generan cambios en su desempeño mecánico.

Una alta concentración de porosidad puede ocurrir en un componente debido a diferentes causas como por ejemplo, en procesos de fundición de metales ocurre debido a la presencia de aire, encogimiento, tiempo de solidificación, etc. [102–104], en la inyección de polímeros puede ser causado por baja presión de inyección [105], mientras que en la manufactura de materiales compuestos se debe a aire atrapado durante el ciclo de curación [106,107], también pueden generarse por medio de nucleación que es cuando el componente se encuentra sometido a altas cargas y ocurre el desgarre de inclusiones formando microporos en altas concentraciones [108]. En MA, dependiendo del proceso, estos poros ocurren debido a gas atrapado, polvo atrapado, falta de unión entre el material, variaciones de parámetros de construcción, fracturas, entre otros [58,71,82,87,109,110], dos ejemplos de esto pueden observarse en la Figura 17.

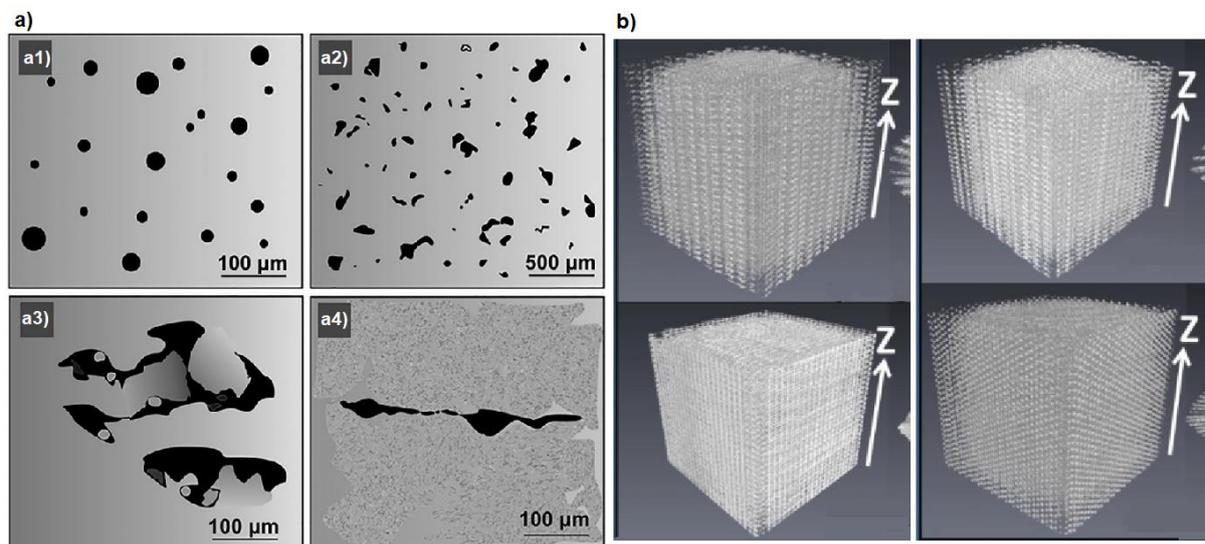


Figura 17. Poros comunes en componente manufacturado mediante a) PBF causados por a1) gas atrapado, a2) fusión incompleta, a3) polvo atrapado y a4) fracturas (adaptado de [111]) y b) ME causados por falta de unión de material donde  $z$  es la dirección de construcción (adaptado de [78])

Las fallas en componentes mecánicos se deben principalmente a dos fenómenos que ocurren con los poros contenidos en su estructura, cuando una carga es aplicada se genera un fenómeno conocido como “crecimiento de poros” donde incrementan sus dimensiones, cuando éstos incrementan su tamaño más allá del 10% se llega a una fase llamada “coalescencia”, es en esta fase cuando los poros se interconectan con otros poros cercanos y se lleva a cabo la fractura [108,112–114], estos fenómenos se pueden observar en la Figura 18. Ejemplos de estas

fracturas se han observado en diferentes componentes mecánicos como álabes y paletas de turbinas en donde, aparte de la fractura prematura, se ha observado un decremento en propiedades como resistencia a la tracción y de fatiga [115–117]. Otros ejemplos se observan en estudios realizados a rines de automóviles en los cuales el objetivo es la reducción de porosidades que afectan su desempeño mecánico y calidad de superficie [118–120] y en estructuras de aeronaves donde el aumento de la porosidad reduce el módulo de cortante y de compresibilidad [121]. La presencia de altas porosidades también genera decremento del módulo de Young, esfuerzo de tracción y dureza en aleaciones metálicas [122,123].

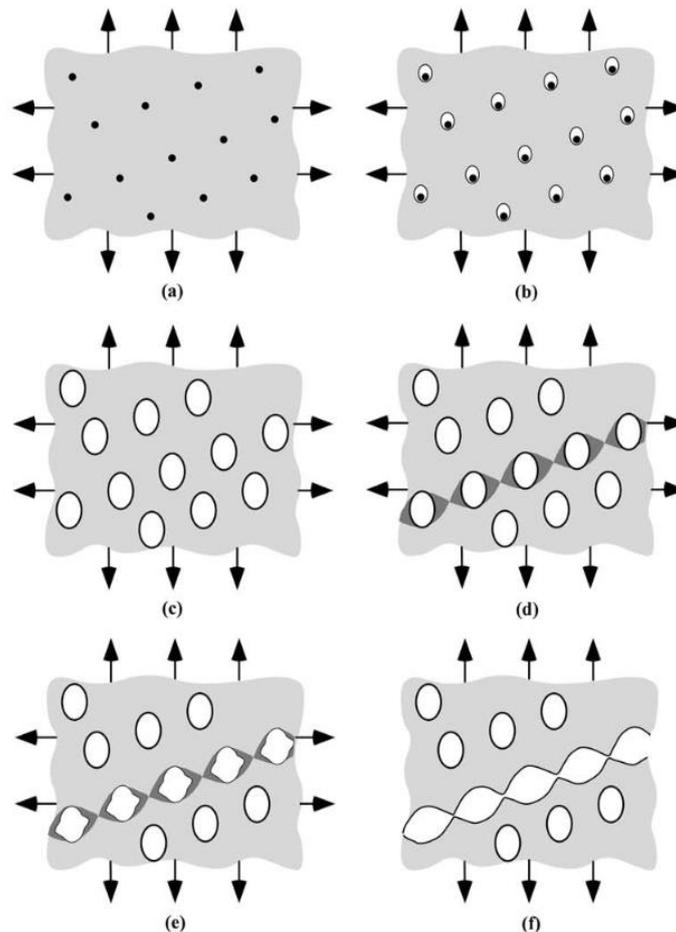


Figura 18. Nucleación, crecimiento y coalescencia de los poros, a) a causa de inclusiones, b) nucleación, c) crecimiento, d) esfuerzos localizados entre poros, e) alargamiento y f) coalescencia y fractura [108].

En materiales compuestos y laminados, la presencia de poros se concentra en las uniones de las intercapas que los conforman, estos cúmulos de poros generan delaminación debido a fractura cortante [106,124,125].

A pesar de que la presencia de poros en el interior de componentes causa un decremento en propiedades mecánicas y fallas tempranas, resultados de estudios realizados en materiales porosos también sugiere que la sola presencia de éstos no es la que afecta al componente. Un ejemplo de lo anterior se observa en materiales compuestos donde los poros reducen la

delaminación de los componentes al contrario de lo que se mencionó en el párrafo anterior [126]. Otros estudios también señalan que la presencia de poros no tiene una correlación con decremento de propiedades como resistencia a la fatiga o la tracción [126,127].

Lo anterior se debe a que medir la porosidad porcentualmente y compararla con propiedades mecánicas resulta simplista, ya que son los descriptores de los poros como tamaño, forma, distribución y orientación los que se espera contribuyan o no al desarrollo de fallas en el componente [107,128–130], estos descriptores se han estudiado con la finalidad de conocer su impacto en las propiedades mecánicas de los componentes.

El tamaño del poro es un descriptor que ha mostrado tener un alto impacto en el desempeño mecánico de los componentes. Poros con un tamaño por encima de los 60 [ $\mu\text{m}$ ] representan un problema de resistencia en pruebas de tracción y de fatiga en materiales como plásticos reforzados con fibra de carbono, aleaciones de aluminio y aceros [123,131–134]. Sin embargo, otro estudio señala que el tamaño de poro no es un factor que afecte a la resistencia en pruebas de fatiga, esto se identificó en componentes de polímeros reforzados con fibra de vidrio, según los autores, el tamaño de poro es una métrica muy general para determinar el desempeño mecánico de un material tan complejo [127].

La forma del poro es otra característica importante por estudiar, se ha reportado que poros con formas alargadas representan una alta concentración de esfuerzos, dependiendo de la dirección de la carga, debido a que existe una orientación de éstos, mientras que en poros semiesféricos o esféricos el esfuerzo es homogéneo en todas sus direcciones [90,100,132,135,136]. Esto no sólo afecta la resistencia si no también la elasticidad en los componentes [137]. Diversos estudios [19,115,138] han mostrado que los poros alargados en la dirección en que se aplica la carga tienen un menor impacto en la resistencia de los componentes y una alta ductilidad [139].

Finalmente, otra de las características de los poros que afectan las propiedades mecánicas es la distribución de éstos en los componentes. Se ha identificado que poros cercanos a la superficie (aproximadamente a 200 [ $\mu\text{m}$ ]) son susceptibles a una gran concentración de esfuerzos, favoreciendo fracturas tempranas en materiales como aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y termoplásticos como la Polietere tercetona [131,139,140] (Figura 19), mientras que otros mencionan que los poros alojados en la parte central de la estructura son los que propician fracturas en aleaciones de titanio y fibras como el *Hi-Nicalon* [141,142]. En componentes de ME de PLA y ABS se ha encontrado que los poros contenidos aleatoriamente en el interior de los componentes (Figura 20) son causantes de un decremento en la resistencia de tracción [80,143].

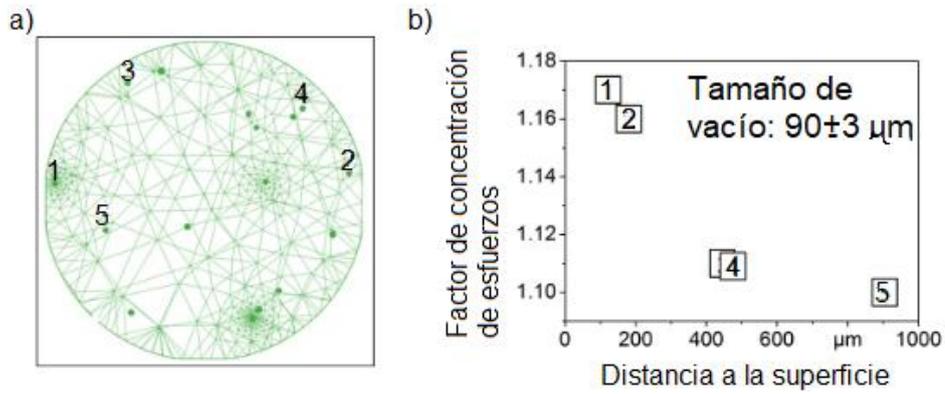


Figura 19. En la figura se muestra a) la distribución de poros en una probeta metálica y b) su relación con el factor de concentración de esfuerzos y distancia a la superficie, donde es posible observar un mayor factor de concentración de esfuerzos en el poro con 200 [μm] a la superficie (adaptado de [131]).

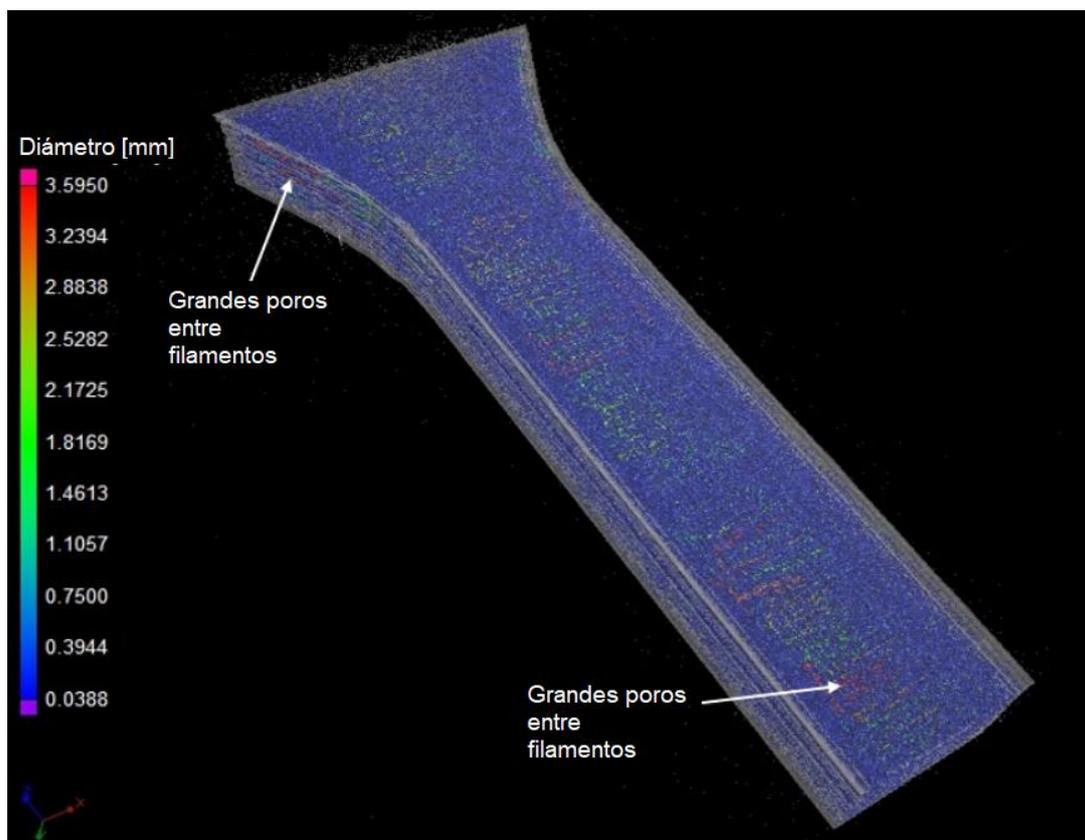


Figura 20. CT que muestra grandes poros de aproximadamente 3.5 [mm] distribuidos aleatoriamente un componente de PLA manufacturado por ME (adaptado de [80]).

## 2. Problemática

Ningún material está exento de porosidades, éstas se encuentran en la estructura de componentes y son propiciadas por factores como: variación en la presión y en la temperatura durante la manufactura, modificación de la solubilidad del gas en el material base al pasar del estado líquido al estado sólido, presencia de inclusiones, entre otras particulares al proceso de manufactura [78,108,131,135]. En componentes mecánicos, como álabes de turbinas, rines de automóviles, tuberías, herramientas, entre otros, las porosidades son consideradas defectos ya que causan un pobre desempeño mecánico que se refleja en fracturas prematuras, infiltraciones, entre otros problemas [115,116,118].

En la MA las porosidades son más frecuentes y en mayor medida debido a la falta de unión entre el material añadido y el previo. La alta porosidad en componentes manufacturados por MA afecta sus propiedades mecánicas decrementando la resistencia y la elasticidad, así como generando anisotropía. Esto ha convertido a la porosidad y al desempeño mecánico de componentes MA en la principal área de oportunidad a estudiar y resolver. Componentes manufacturados por tecnologías de MA han sido ampliamente caracterizados mediante pruebas mecánicas principalmente por pruebas de tracción.

Se ha identificado en la literatura que probetas termoplásticas construidas por Extrusión de Material (EM) tienen una anisotropía de hasta 87% en propiedades mecánicas como el esfuerzo de cedencia y el módulo de Young [39,69,73–75,144], esto en comparación con procesos como el Rociado de Material, la Fotopolimerización en tina y Fusión en Cama de Polvos que tienen una variación menor del 20%. Lo anterior se debe a que ME es el proceso de MA que más porosidad presenta con un porcentaje de hasta 23% y poros de hasta 3.5 [mm] de diámetro [71,78,80], mientras que otros procesos como la PBF o la MJ es de 3% o menos. La EM, es también, uno de los procesos más utilizados a nivel mundial y el que más ingresos produce, es por lo descrito en este párrafo que este estudio se enfoca a este proceso.

Los poros identificados en ME tienen la característica de ser alargados lo que significa que tienen una orientación dentro de la estructura del componente lo que impacta en las propiedades mecánicas [19,115,138]. Los poros generados en ME se atribuyen a la unión parcial entre filamentos [81–83] y a parámetros de construcción como la orientación de construcción, el espacio entre filamentos y el ángulo de deposición de filamentos [69,74,75]. Dado que las porosidades tienen un impacto en el desempeño mecánico de los componentes, se identifica como área de oportunidad estudiar la relación entre poros y propiedades mecánicas esto con la finalidad de utilizar esta relación para estimar comportamientos mecánicos de los componentes. Dado que los componentes MA suelen ser únicos, para caracterizar los poros se propone hacer uso de una herramienta que no altere la integridad de los componentes.

## 2.1 Hipótesis

El estudio de los poros, particularmente su tamaño, forma, cantidad y distribución, permitirá comprender la relación de estas características con las propiedades mecánicas (esfuerzo de cedencia y módulo de Young) de componentes producidos aditivamente mediante Extrusión de Material.

## 2.2 Objetivo

Estudiar la relación entre la porosidad y las propiedades mecánicas de componentes producidos por Manufactura Aditiva particularmente con el proceso de Extrusión de Material.

## 2.3 Recursos

El presente estudio se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT) el cual cuenta con los siguientes recursos para el desarrollo de este estudio:

- Equipos de Manufactura Aditiva por Extrusión de Material modelo Fortus 900mc y Fortus 400mc de la compañía Stratasys
- Equipo de Tomografía Computarizada modelo XT H 225 de la compañía Nikon
- Equipo de pruebas universales modelo AGS-X-50 kN de la marca Shimadzu

## 2.4 Alcances

- Identificar técnicas de detección de poros y determinar cuál se adapta al estudio de poros en MA y que ésta sea compatible con los recursos disponibles
- Identificar cómo caracterizar poros de manera general e individual
- Estudiar y proponer una relación entre poros y propiedades mecánicas

## 3. Marco teórico

### 3.1 Tomografía Computarizada

La Tomografía Computarizada por rayos X, o CT por sus siglas en inglés, es una prueba no destructiva, es decir, permite la inspección de objetos en busca de características como porosidades, inclusiones, fracturas, huecos, fibras, etc., sin que exista una alteración física, química o de ningún tipo. Esta prueba permite el análisis de características internas en una escala de micrómetros [89] y tiene una incertidumbre menor a los 2 [ $\mu\text{m}$ ] [145–148]. Dado su amplio potencial para la detección de defectos y su capacidad no destructiva, esta herramienta ha sido ampliamente utilizada en la industria en áreas como la manufactura aditiva y tradicional, detección de fallas, ingeniería mecánica, ingeniería aeroespacial, ingeniería civil, ingeniería de materiales, generación de energía eléctrica, entre otras [89,149–151].

Esta prueba permite el análisis de poros de manera particular ya que, aparte de determinar el porcentaje de porosidad, permite la medición de características de poro como la forma, la distribución, el tamaño, entre otras. La CT tiene áreas de oportunidad a desarrollar ya que su operación no se encuentra regulada bajo ninguna norma, esto se debe principalmente a que la selección de parámetros varía dependiendo del material o materiales del objeto a analizar, y a que, pueden presentarse distorsiones en las imágenes conocidas como artefactos que alteran los resultados finales [152–154].

Según la definición de la norma ASTM E1441 [155], la CT se define como una prueba de reconstrucción radiográfica que proporciona una técnica sensible para localizar y dimensionar detalles volumétricos en tres dimensiones de un objeto de interés. La palabra tomografía viene de la palabra griega *Tomos* que significa “rebanada” o “sección” y *Graphos* se refiere a “escribir”. El proceso de CT funciona mediante la atenuación de la intensidad de los rayos X al interactuar con un objeto. Los componentes principales de un equipo de CT son: un emisor de rayos X y un detector (ver Figura 21). Descrito de manera general, en este proceso los rayos X son emitidos y, al atravesar un objeto, son atenuados y captados por un panel o detector que, por medio de una computadora, genera una visualización del objeto de interés [150,156,157].

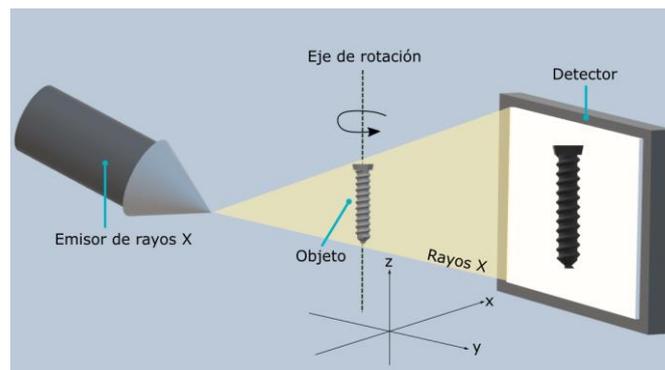


Figura 21. Esquema de la Tomografía Computarizada por rayos X.

Este proceso es gobernado por la ley de Beer-Lambert que se expresa en la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-\mu s} \quad \text{Ecuación (1)}$$

En donde  $I$  es la intensidad de los rayos X al interactuar con la materia,  $I_0$  representa la intensidad de incidencia de rayos X,  $s$  es la distancia de viaje a través de la materia y  $\mu > 0$  es el coeficiente de atenuación del material [156,158,159]. Cuando los rayos X impactan un objeto, la energía de estos rayos es atenuada dependiendo de la intensidad con la que son emitidos, el material y la trayectoria que siguen a través del objeto, esto es lo que percibe el detector y da lugar a la generación de una imagen.

### 3.1.1 Pasos de la Tomografía Computarizada

Según Carmignato [156], Hoyle et. al. [160] y Cantatore [161] la CT puede ser resumida de manera genérica en 7 pasos, en la Figura 22 se muestran estos pasos y a continuación una breve descripción de cada uno.

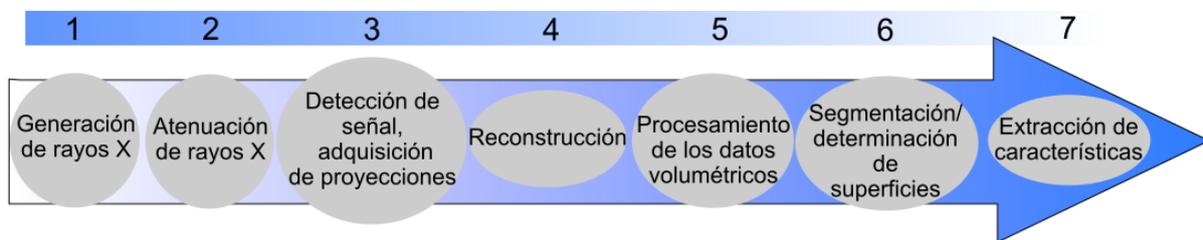


Figura 22. Proceso genérico de CT (adaptado de [156]).

**1. Generación de rayos X:** Los rayos X son ondas electromagnéticas, su longitud de onda se encuentra en un intervalo de entre 0.01 [nm] y 10 [nm]. Los rayos X son clasificados en suaves, aquellos que poseen una baja energía y una longitud de onda larga (~10 [nm]), y duros, que poseen una alta energía y una longitud de onda corta (~0.01 [nm]). Estos rayos son generados por medio de aceleradores (lineales o síncronos), isótopos y tubos de rayos X, siendo estos últimos los más comunes. El interior de los tubos de rayos X se encuentra al vacío, en ellos se contiene un cátodo (generalmente de tungsteno) y un ánodo u objetivo (tungsteno, oro, plata, etc.). Del cátodo se emite una gran cantidad de electrones que viajan hasta impactar con el ánodo, estos electrones interactúan con los átomos del ánodo lo que les transfiere energía cinética, de esta interacción se generan dos resultados: calor, que corresponde al 98% de la energía, y rayos X que es el 2% restante [156,161].

La intensidad con que son producidos los rayos X depende del voltaje y la corriente emitida del cátodo. El incremento del voltaje significa un aumento en la velocidad y energía de los rayos X lo que se resume en una mayor penetración del objeto analizado, mientras que, un incremento de la corriente significa un aumento en la cantidad de rayos X y un decremento de

ruido en las imágenes, pero a su vez un incremento del tamaño del punto focal. El punto focal es el área del ánodo que es impactada por la energía, el tamaño de este punto determina la resolución y nitidez de las imágenes obtenidas, el incremento de este punto significa un decremento en la resolución y nitidez de las imágenes. Otro parámetro que afecta la resolución es la distancia del objeto escaneado al emisor de rayos X, entre más cercano sea, la resolución de las imágenes será más pequeña [162,163].

**2. Atenuación de rayos X:** Cuando los rayos X impactan el ánodo, los rayos suaves son, en su mayoría, absorbidos o dispersados por el objeto, mientras que los rayos duros son los que atraviesan el objeto, ambos tipos de rayos son detectados por el panel. Cuando los rayos suaves son dispersados generan artefactos en la visualización del perfil del objeto, esto se presenta principalmente en materiales metálicos los cuales necesitan una mayor intensidad para ser penetrados. Para corregir estos artefactos, se colocan filtros físicos (generalmente de cobre) a la salida del emisor de rayos X, esto reduce el paso de rayos suaves permitiendo en su mayoría el paso de rayos duros. Cuando los rayos X atraviesan el objeto, éstos tienen un decremento de energía la cual se conoce como atenuación, este fenómeno es reflejado por la ley de Beer-Lambert, Ecuación (1) [164,165].

**3. Detección de señal/adquisición de proyecciones:** Los rayos X atenuados impactan un detector el cual, por medio de la ionización de gases o el centelleo en estado sólido [166], transforma la información recibida en señales eléctricas y datos binarios. El detector está conformado por un arreglo de píxeles, éstos son unidades de dos dimensiones, generalmente de forma cuadrada. Dependiendo de cuan atenuados los rayos X impactan el detector será el valor o color de gris del píxel. En una imagen, los píxeles forman un arreglo de filas y columnas, la posición de los píxeles en este arreglo es identificada por medio de un sistema coordenado  $(x,y)$ . La imagen generada representa un perfil del objeto inspeccionado, a esta imagen se le conoce como proyección. La capacidad de los detectores puede variar, por ejemplo, un detector de 16 bits tiene la capacidad de generar imágenes con 65,536 grises posibles, donde el valor de 0 es negro y el de 65,536 es blanco (Ver Figura 23) [156,161,167].

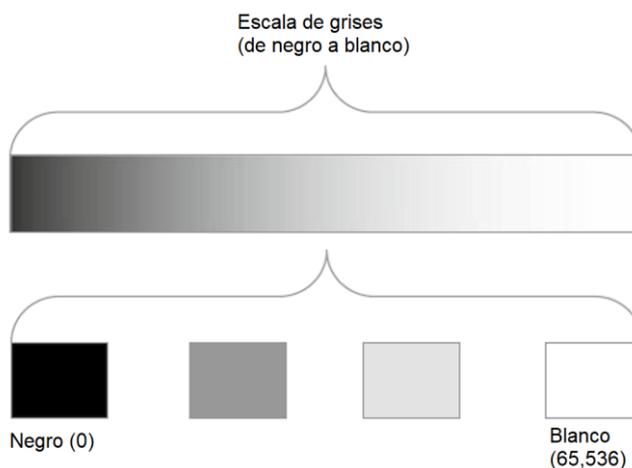


Figura 23. Valores en escala de grises que puede adoptar un píxel en un detector de 16 bits (adaptado de [167]).

**4. Reconstrucción:** Una vez adquiridas las proyecciones, se realiza una reconstrucción, en este paso los píxeles de las proyecciones son convertidos en vóxeles. Los vóxeles, generalmente cubos, son la representación de los píxeles en tres dimensiones, (Ver Figura 24). Existen varios algoritmos para realizar una reconstrucción, algunos de ellos son analíticos, algebraicos o estadísticos. Básicamente, estos algoritmos ordenan las proyecciones generando un arreglo que tiene un eje de rotación, ver Figura 25. Finalmente, se obtiene un modelo digital 3D compuesto por vóxeles [168–170].

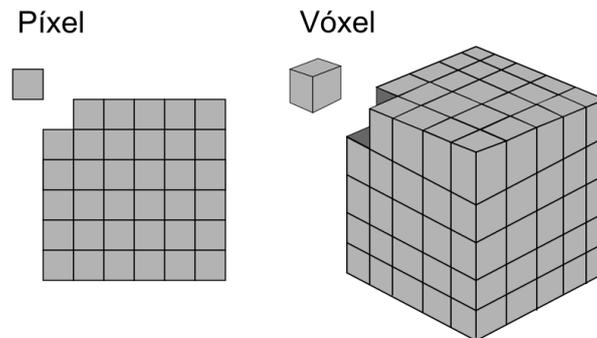


Figura 24. Representación de un arreglo de píxeles y uno de vóxeles.

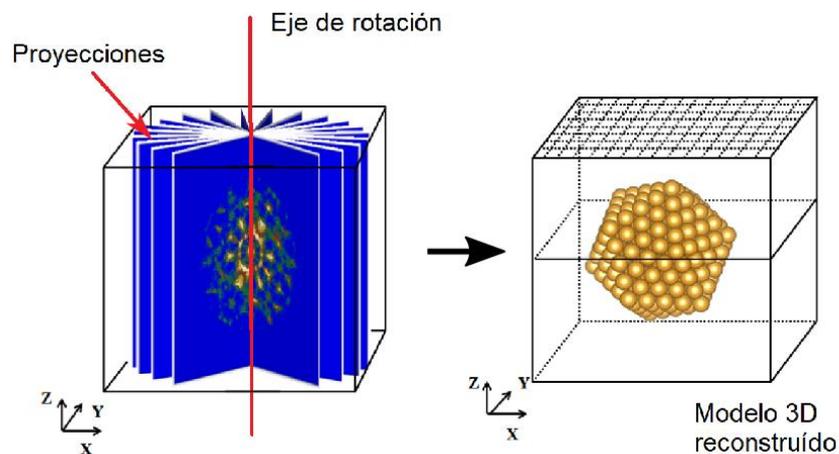


Figura 25. Reconstrucción de proyecciones para generación de un modelo 3D (adaptado de [171]).

**5. Post-procesamiento de los datos volumétricos:** A partir de la reconstrucción y por medio del *volume rendering* (técnicas de visualización) el modelo 3D es representado digitalmente. Típicamente, estas representaciones utilizan las funciones de color y opacidad para trazar una imagen volumétrica a partir de los datos obtenidos de la reconstrucción de proyecciones [156,167,172]. En este punto, el modelo digital se ha generado, pero no es hasta el siguiente paso que se obtiene una visualización clara.

**6. Segmentación / Determinación de superficies:** Una vez que la información es procesada, se realiza una segmentación o determinación de superficies que es la base para el cálculo de

distancias, diámetros, formas y características especiales. Este proceso permite evaluar imágenes o volúmenes para separarlos en regiones por medio del análisis de un histograma. El histograma proporciona información sobre la intensidad de los píxeles mediante una gráfica que en su eje  $x$  contiene el número grises y en su eje  $y$  el número de ocurrencias de estos grises. Cuando se presentan varios materiales o aire, cada uno de ellos es representado por un pico en el histograma [156,173], en la Figura 26 se muestra el ejemplo de un histograma de un objeto multimaterial de ABS y acero, el cual está rodeado por aire.

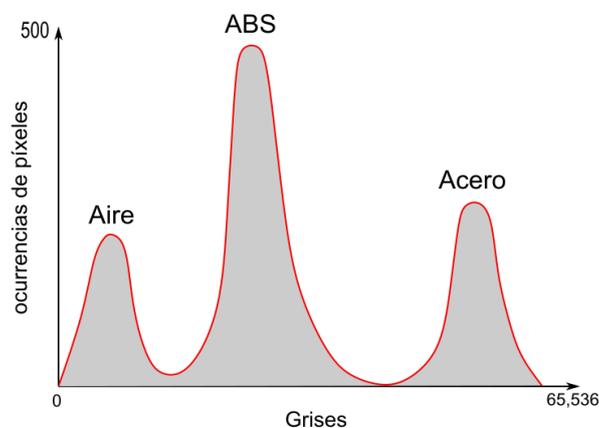


Figura 26. Ejemplo de un histograma de un objeto de ABS y acero, el cual está rodeado por aire, donde es posible observar los picos de píxeles pertenecientes a cada material y al aire.

Para generar una segmentación o determinación de superficie se utilizan algoritmos matemáticos y estadísticos como los basados en el umbral, en la frontera, crecimiento de regiones o agrupamiento [174,175]. Uno de los métodos más comunes basado en la determinación de un umbral entre materiales o aire es el ISO50 [153,176]. Mediante este método, la segmentación se realiza aplicando un umbral equidistante a cada pico en el histograma. En la Figura 27 es posible observar la aplicación del método ISO50 a una imagen.

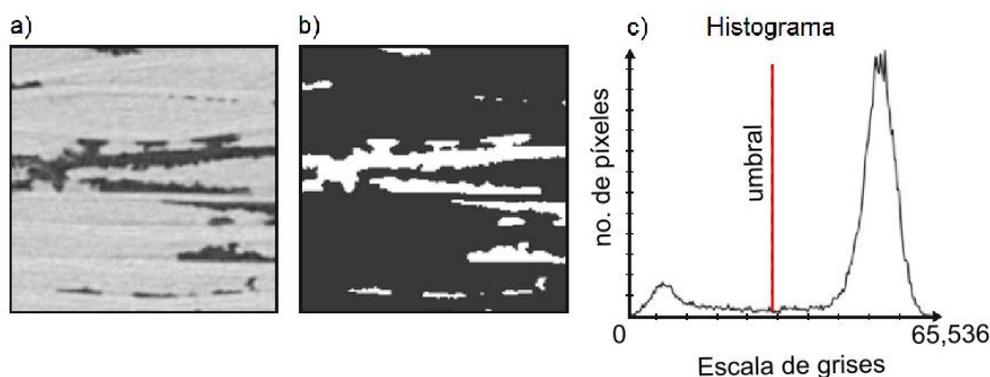


Figura 27. Segmentación mediante ISO50 de una imagen de 16 bits donde, a) es la imagen a segmentar, b) es la imagen segmentada y c) es el histograma de la imagen con el umbral marcado en rojo (adaptado de [91]).

**7. Extracción de características:** Una vez realizada la segmentación, el objeto analizado puede ser visualizado y es posible realizar una extracción de características. Estas

características son poros, huecos, inclusiones, fibras. etc. Existen diferentes métodos para la detección de estas características, algunos de estos métodos son el análisis de componentes conectados, el análisis de componentes principales, análisis hessiano, comparación de plantillas, agrupamiento, cuantificación de características y grupos, entre otras [156,177–179]. Estos métodos se basan en la agrupación de regiones de vóxeles con las mismas características, estas regiones son luego extraídas individualmente para su análisis.

### 3.1.2 Descriptores en la Tomografía Computarizada

Como se mencionó, la CT es una técnica de inspección que permite la caracterización de componentes para determinar dimensiones, tolerancias (cilindricidad, esfericidad, planitud, perpendicularidad, etc.), volumen, porosidad, inclusiones, defectos, entre otros. La CT, a diferencia de otras técnicas como la CMM y el SEM, no cuenta con una norma para su aplicación debido a diferentes factores como: el escalamiento de imágenes, artefactos en las imágenes, ruido, falta de nitidez, una selección no óptima del umbral, etc., esto resulta en errores en las mediciones limitando la repetibilidad de la CT [153,180]. Sin embargo, se ha encontrado que el error de esta herramienta comparada con mediciones hechas con CMM es alrededor de  $\pm 2[\mu\text{m}]$  [181–183].

En el caso de la porosidad, la CT permite realizar análisis de poros en donde es posible caracterizar de manera grupal e individual los poros, estos análisis entregan resultados que permiten conocer el porcentaje de porosidad, la cantidad de poros, las dimensiones de cada uno de los poros identificados, así como la ubicación de cada uno de ellos en el componente, esto por medio de una base cartesiana con origen en el centroide del poro; también es posible determinar la morfología de los poros, y la visualización de estos en el componente. En la Figura 28 se puede observar un análisis de fibras y porosidades de un filamento compuesto con matriz de ABS y fibras de carbono, obtenidas por medio de CT.

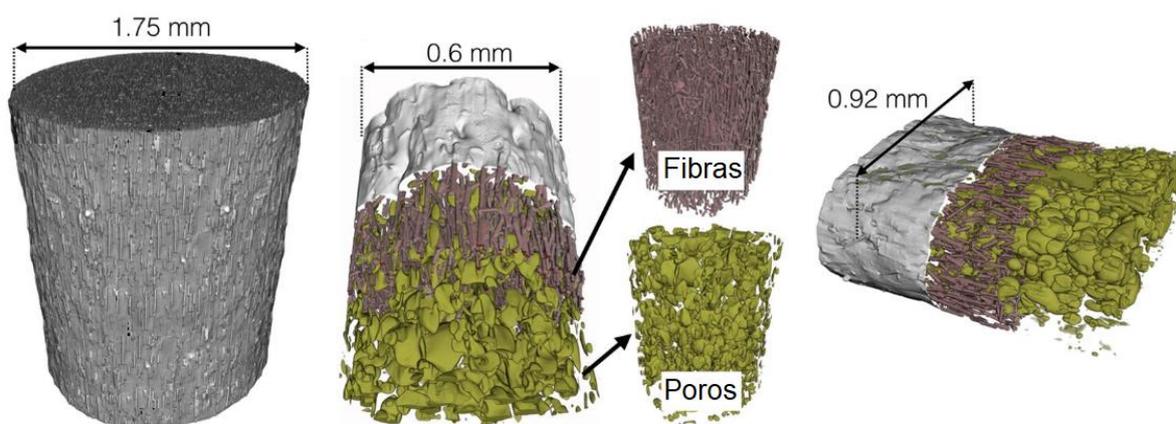


Figura 28. Resultado de un análisis de fibras (en color café) y poros (color verde) realizados a un filamento compuesto (en color gris) con matriz de ABS y fibras de carbono (adaptado de [184]).

## 3.2 Descriptores de poros

Los poros pueden ser descritos mediante diferentes características, estas características se definen como “descriptores”. Los descriptores principales son la cantidad, el tamaño, la forma, la distribución y la orientación. La variación de estos descriptores modifica el impacto que tiene un poro en las propiedades mecánicas de un componente. Estos descriptores se enlistan a continuación:

**Cantidad:** Como su nombre lo indica, este descriptor determina el número de poros contenidos en el volumen de un componente. También puede ser medido mediante el porcentaje de porosidad.

**Tamaño:** El tamaño un poro es el espacio que ocupa en un volumen, este tamaño es medido en 1, 2 y 3 dimensiones (D), la medición del tamaño dependiendo de D se describe a continuación:

1D: Cuando un poro es redondo, su tamaño en una dimensión se mide a partir del diámetro de la esfera que lo forma, sin embargo, cuando los poros no tienen una forma regular, se utilizan esferas equivalentes. El diámetro de un poro irregular es equivalente al diámetro de la esfera que lo contiene [185], ver Figura 29. Otra manera de medir el tamaño de un poro en una dimensión es por medio de su proyección en los ejes de referencia, ver Figura 29.

2D: La medición del tamaño de un poro en dos dimensiones se lleva a cabo por medio de la proyección que genera en los planos  $xy$ ,  $xz$  y  $yz$ , donde el área proyectada es medida en unidades cuadradas, ver Figura 29.

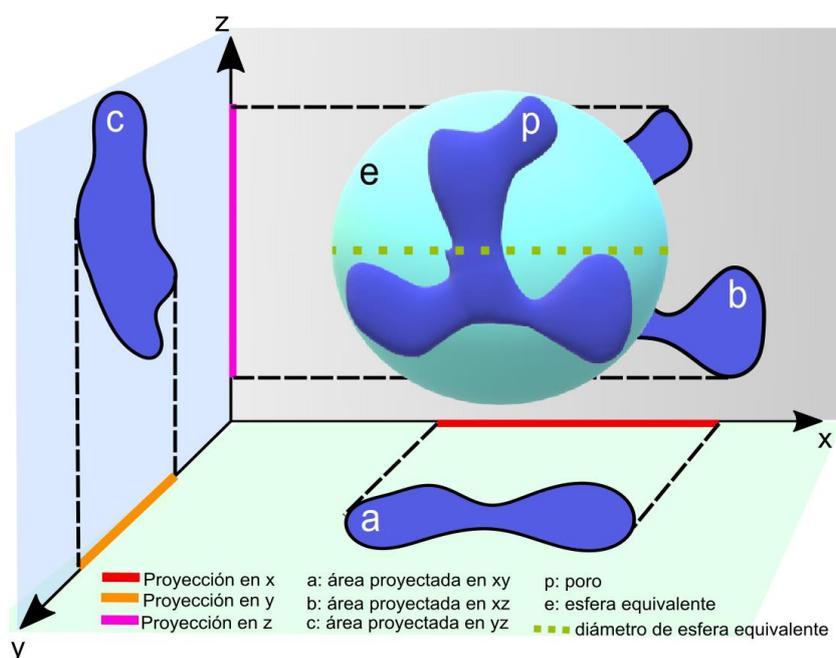


Figura 29. Poro, su esfera equivalente y sus proyecciones en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y en los planos  $xy$ ,  $yz$ , y  $xz$ .

3D: Para la medición del tamaño de un poro en tres dimensiones se utilizan dos formas, una es el volumen de la esfera equivalente en unidades cúbicas y la segunda es el número de vóxeles que conforman al poro, ver Figura 30.

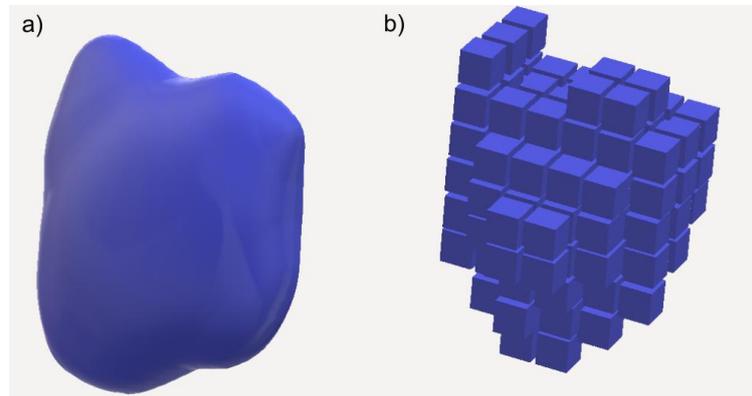


Figura 30. Tamaño de poro medido en tres dimensiones donde a) es el poro y b) su representación por medio de vóxeles.

**Forma:** Cuando un poro no tiene una forma definida, se utilizan equivalencias con estructuras geométricas de tres dimensiones. La aproximación más común se relaciona con esferas, en donde la esfericidad ( $ef$ ) es la relación entre el área de la superficie del poro y el área de su esfera equivalente (Ecuación 2). Dependiendo de esta relación, se otorga un grado de esfericidad que puede ir de 0 a 1, en donde 0 es una forma completamente alargada y 1 es una forma esférica [186], ver Figura 31.

$$ef = \frac{A_{esfera}}{A_{poro}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Otra forma de cuantificar la forma de un poro es por medio de la compacidad ( $cp$ ), esta proporción es la relación entre el volumen del poro y el volumen de la esfera que lo representa (Ecuación 3), este al igual que la  $ef$  va de 0 a 1, en donde 0 es una forma completamente compacta, ver Figura 31.

$$cp = \frac{V_{poro}}{V_{esfera}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

**Orientación:** Esta característica de los poros está relacionada con su forma. Los poros esféricos no tienen una orientación definida, mientras que los poros con forma alargada sí la tienen. Esta orientación se determina mediante sus ejes, en donde el eje mayor determina la orientación del poro con respecto del componente que lo contiene, ver Figura 31.

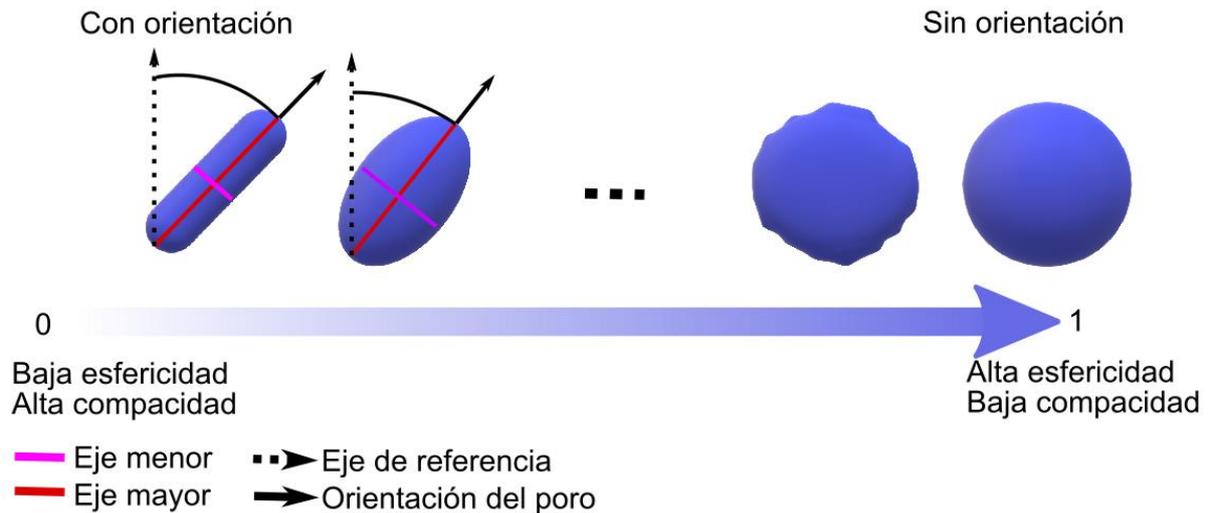


Figura 31. Esfericidad, compacidad y orientación de los poros.

**Distribución:** Esta característica determina en qué posición dentro del componente se encuentran alojados los poros, por ejemplo, estos pueden estar contenidos en el centro del componente o en las proximidades de la superficie, este descriptor está dado por las coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$  del centro de masa de la esfera equivalente.

### 3.3 Pruebas de tracción y normas para caracterización de MA

Las pruebas de tracción consisten en aplicar una fuerza axial a una probeta normalizada (pieza de dimensiones conocidas establecidas por una norma) esta fuerza ejerce una carga de tracción incremental hasta que se genera la rotura de la probeta. La aplicación de esta prueba permite conocer diversas propiedades mecánicas del material caracterizado como el esfuerzo de tracción, el esfuerzo de cedencia, la elongación máxima, entre otros. En el área de la caracterización mecánica de componentes manufacturados por MA, esta prueba es la más utilizada dado el amplio número de propiedades mecánicas que pueden ser calculadas a partir de ella y a que, permite identificar la anisotropía en probetas construidas en diferentes orientaciones. A partir de una prueba de tracción es posible generar una curva esfuerzo - deformación, de esta curva es posible el cálculo de propiedades como el módulo de Young, la tenacidad, resiliencia, energía absorbida, etc. En la Figura 32 se observa esta curva de probetas de ABS manufacturadas por ME y moldeo por inyección.

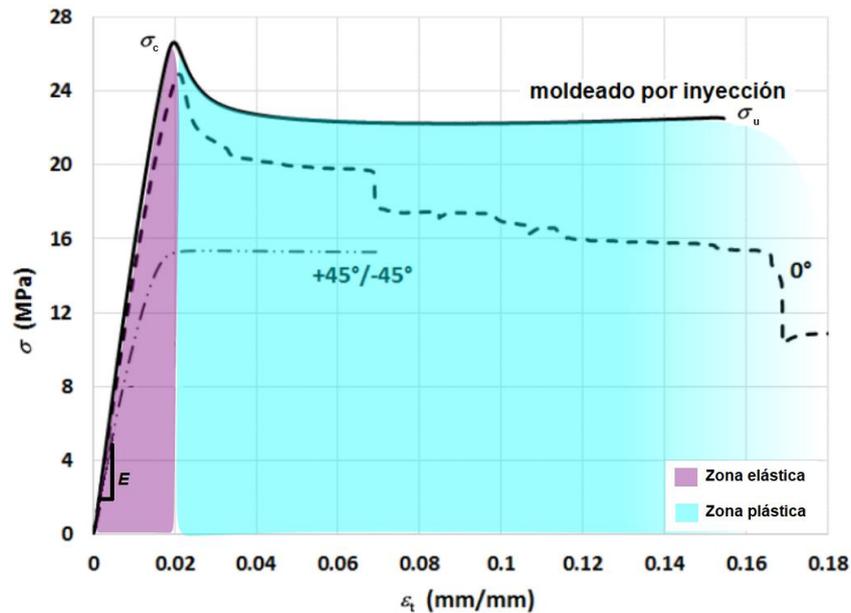


Figura 32. Curva esfuerzo - deformación de probetas de ABS manufacturadas por moldeo por inyección y ME con diferentes ángulos de deposición de filamento [187]

De la Figura 32, es posible observar que la curva generada de una prueba de tracción contiene en su eje y el esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) en MPa y en su eje  $x$  la deformación ( $\epsilon$ ) de la pieza la cual es adimensional o porcentual. Esta curva permite conocer el comportamiento de un material el cual puede ser elástico, frágil o dúctil, esto dependiendo de cómo se comporte el material en la zona elástica (deformación no permanente) y la zona plástica (deformación permanente).

Actualmente no existen normas específicas para la caracterización mecánica de probetas manufacturadas aditivamente, esto se debe a distintos factores como son la anisotropía, el reúso de polvos en tecnologías como el SLM que influye las dimensiones y propiedades, deformaciones dimensionales a causa de esfuerzos residuales, el efecto de los post-procesos para mejorar el acabado superficial, entre otros [188]. Sin embargo, existen normas como la ASTM F3122 que es una guía para la evaluación mecánica de probetas metálicas manufacturadas por PBF la cual refiere al usuario a aplicar normas para procesos convencionales, algunas otras de estas guías son la ASTM D4673 y la ASTM F3091 para PBF con plásticos y ME con termoplásticos respectivamente [189–191].

La caracterización de probetas MA se lleva a cabo entonces utilizando normas convencionales de las instituciones ASTM e ISO, estas normas son aplicadas dependiendo del material a caracterizar. Según refiere la ASTM F3122, para la caracterización de probetas metálicas construidas por PBF se utilizan normas como la ASTM E8 para pruebas de tracción, mientras que para probetas de plásticos como el ABS manufacturadas por medio de ME o PBF, la norma ASTM F3091 y la ASTM D4673 recomiendan el uso la norma ASTM D638 para determinar propiedades mecánicas por medio de pruebas de tracción [192,193], siendo esta última la utilizada para caracterizar probetas de ME tal como se describió en el apartado 1.6.1.

## 4. Desarrollo del estudio

### 4.1 Propuesta

Dado lo identificado en la revisión de la literatura y en el marco teórico, para llevar a cabo el estudio de la relación entre porosidad y propiedades mecánicas en componentes manufacturados por Manufactura Aditiva, se propone el análisis de la porosidad de probetas manufacturadas mediante ME/FDM con el material ABS, esto utilizando la CT para no alterar la estructura de las probetas. Para denotar la anisotropía mecánica, las probetas se construirán en tres diferentes orientaciones: *flat*, *edge* y *upright*. Las propiedades mecánicas por relacionar serán el esfuerzo de cedencia y módulo de Young las cuales serán verificadas por medio de pruebas de tracción.

### 4.2 Manufactura de probetas por medio de ME/FDM

Para realizar la experimentación, se manufacturaron probetas de tracción basadas en la norma ASTM D638 Tipo 1 [192], en la Figura 33 se muestran sus principales medidas. Las probetas fueron construidas en las orientaciones *flat* (*f*), *edge* (*e*) y *upright* (*u*) ver Figura 34, se manufacturaron 5 por orientación dando un total de 15 probetas. Para la construcción se utilizó una máquina Fortus 900mc de *Stratasys* [194] con el material ABS-M30 [144]. Los parámetros seleccionados se basaron en los trabajos de Croccolo et al. [70], Durgun et al. [69], Cole et al. [75] y Cantrell et al. [73] quienes han caracterizado probetas de tracción ME/FDM de ABS-M30 bajo la norma ASTM D638. La selección de los parámetros también se basó en la hoja de datos del fabricante para el material seleccionado. En la Tabla 2 se muestran estos valores.

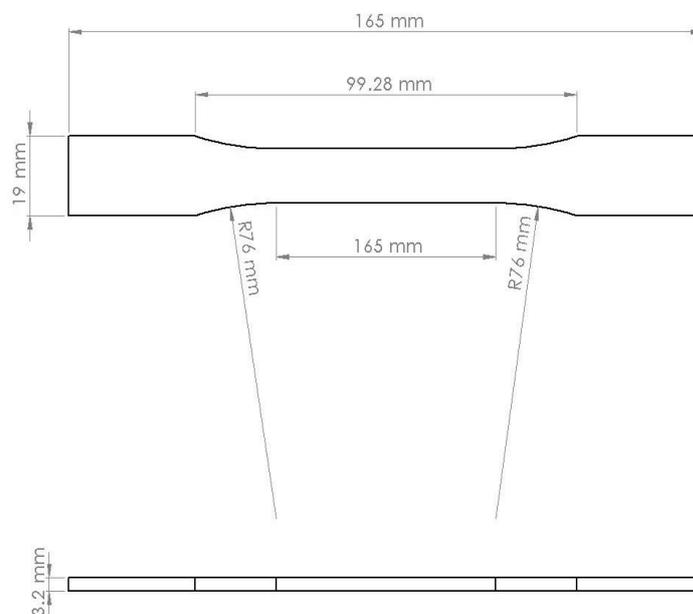


Figura 33. Probeta estandarizada de norma ASTM D638 para polímeros.

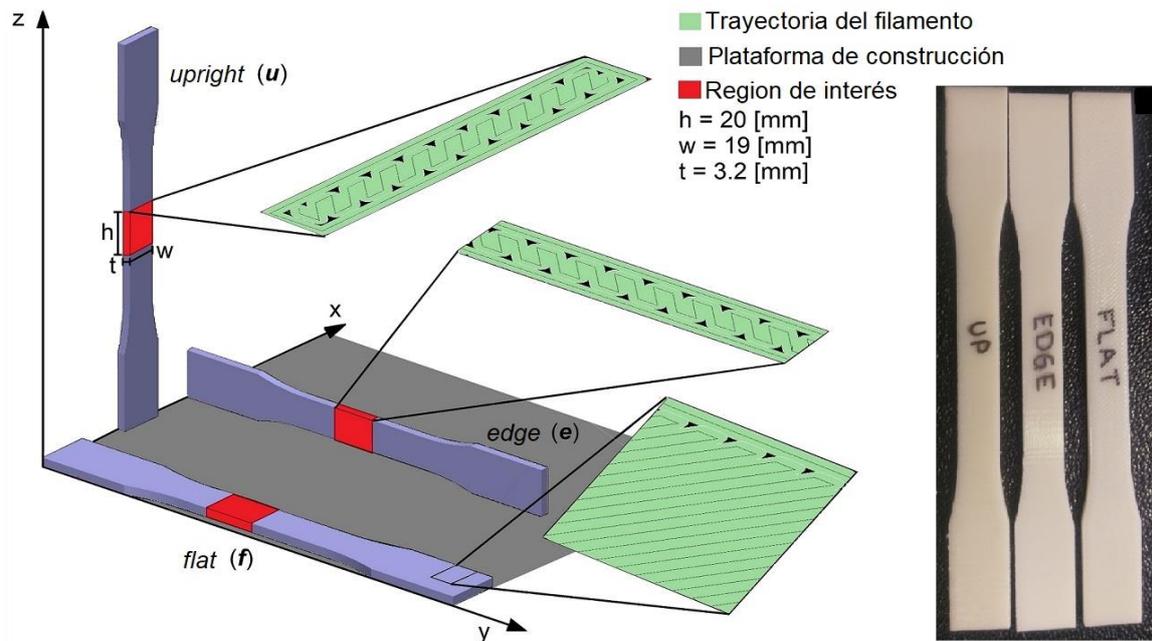


Figura 34. Orientación de las probetas en la plataforma de construcción con un acercamiento de la trayectoria del filamento depositado, y probetas manufacturadas (adaptado de [195]).

Tabla 2. Parámetros de manufactura de probetas para prueba de tracción [69,70,73,75,144]

Parámetro	Valor
Altura de capa	0.254 [mm]
Ancho de filamento	0.5080 [mm]
Ángulo de deposición del filamento	45°/ -45°
Espacio entre filamentos	0 [mm]
Ancho de contorno	0.5080 [mm]
Número de contornos	2

### 4.3 Escaneo por Tomografía Computarizada por rayos X

Para el análisis por medio de CT, se realizó el escaneo de una región de interés (ROI) localizada en la zona común de fractura de las probetas con la finalidad de estudiar una región crítica y la

reducción de recursos computacionales. Las dimensiones de esta región son de 20 x 19 x 3.2 [mm<sup>3</sup>], en la Figura 34 (de la sección 4.2) es posible observar esta región en rojo. Para el escaneo por CT se utilizó un tomógrafo *Nikon XT H 225 ST* [196] y el *software Inspect-X* (versión XT 3.1.9). Los parámetros utilizados para el escaneo de las probetas se muestran en la Tabla 3. Para la selección del voltaje, corriente y tiempo de exposición se usó como base los trabajos de DuPlessis et al. [197] y Guessasma et. al [77] donde escanean probetas construidas por ME/FDM con el material ABS, los valores finales fueron ajustados dado el histograma de las radiografías de las probetas de este estudio. El tamaño del píxel está basado en las dos referencias mencionadas, donde la resolución se encuentra alrededor de 20 [μm] así como en la mínima distancia posible entre las probetas y el emisor de rayos X. El número de proyecciones se determinó dada la recomendación del fabricante para una tomografía de alta resolución. Finalmente, el tamaño en píxeles de la imagen y la capacidad del detector son propios del equipo utilizado.

Tabla 3. Parámetros de Tomografía Computarizada

Parámetro	Valor
Voltaje	140 [kV]
Corriente	220 [μA]
Tiempo de exposición	354 [ms]
Resolución del píxel	13 [μm]
Proyecciones	3142
Tamaño en pixeles de la imagen	2000 x 2000 [pixeles]
Capacidad de detector	16 bits

De los resultados obtenidos del escaneo se realizó una reconstrucción de las imágenes con el *software CT Pro 3D* (versión XT 3.1.9) de *Nikon*, sin el uso de ningún filtro o reducción de ruido debido a que no se identificaron artefactos que corregir. Una vez reconstruidas las imágenes, se generó el modelo digital por medio del *software VG Studio Max* (versión 3.3) de *VolumeGraphics* ©. Para la determinación de superficie se utilizó una detección “automática” la cual determina la frontera entre el aire y el material, para este cálculo el software utiliza el método del ISO50. En la Figura 35 es posible observar el histograma de las probetas, así como la definición del umbral y un acercamiento a una sección de la radiografía de *f* donde se aprecia una línea blanca representando la frontera.

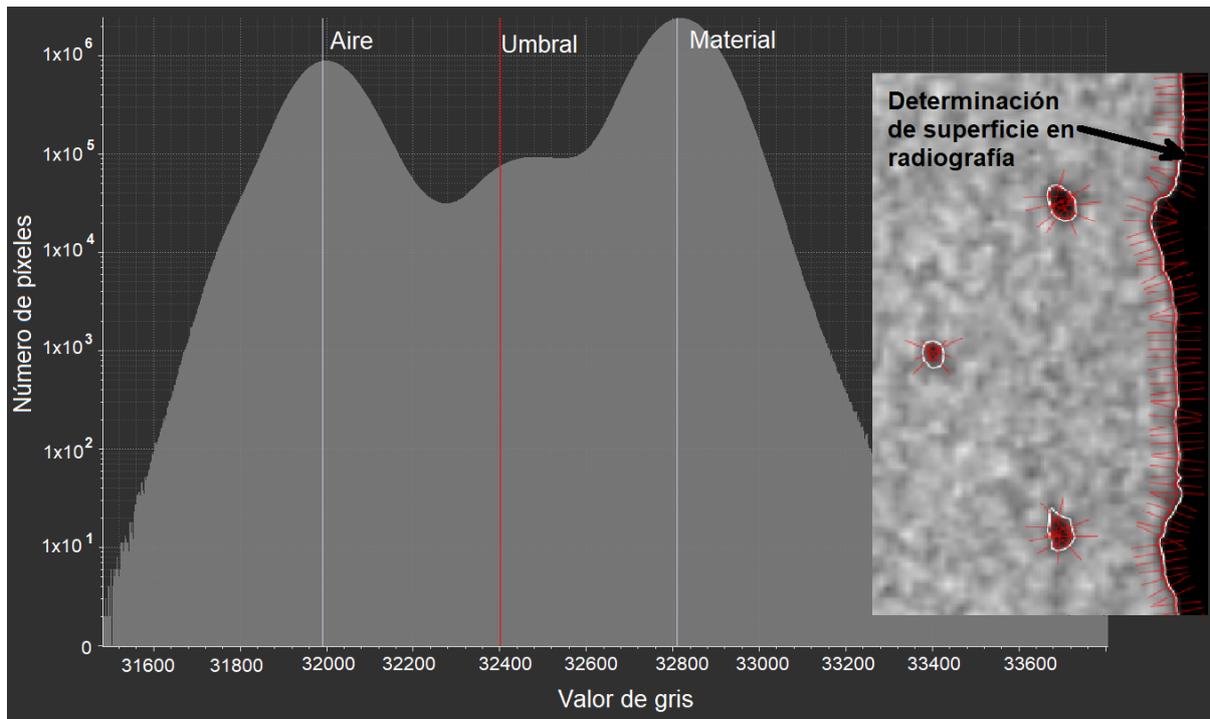


Figura 35. Histograma de las probetas donde se aprecia la determinación de los picos de aire y material, en rojo el umbral y de lado derecho se muestra un acercamiento a la radiografía de  $f$  donde se observa la frontera en una línea blanca.

## 4.4 Análisis de poros

Para el análisis de poros se utilizó el módulo de determinación de defectos del *software VG Studio Max* (versión 3.3). Este módulo permite identificar el porcentaje de porosidad, así como descriptores de poro como el tamaño (en una, dos y tres dimensiones), esfericidad, compacidad, distribución, valor de gris, espacio mínimo entre poros cercanos, entre otros. Para el estudio se determinó analizar los descriptores de poro cantidad/porosidad, tamaño (en las 3 dimensiones), esfericidad, compacidad, y distribución, basados en los trabajos identificados en el marco teórico específicamente los de Keleş et al. [143], Rinaldi et al. [198], Wang et al. [80] y Rodriguez et al. [199], quienes determinaron que poros con tamaños de entre 60  $\mu\text{m}$  y 3  $\text{mm}$ , de forma alargada y distribuidos aleatoriamente en el componente son los que tienen un impacto en las propiedades mecánicas.

Para la determinación de los poros se aplicaron filtros de tamaño y forma. Para el tamaño, se estableció un filtro el cual es recomendado en el manual de usuario del *software*. Este filtro establece que el mínimo tamaño de poro debe ser igual a un cubo de  $2 \times 2 \times 2$  [vóxeles], ya que un tamaño menor puede significar ruido; dada la resolución de la tomografía (13  $\mu\text{m}$ ), se estableció un diámetro de poro mínimo de 26  $\mu\text{m}$ . El tamaño máximo de poro se estableció tan grande como la ROI, este amplio intervalo se estableció para evitar pasar por alto cualquier poro. En la Tabla 4 se muestran los parámetros del filtro aplicado. Para el análisis de los poros alargados, se aplicó un filtro de esfericidad (Ecuación 3) de 0 a 0.3 el cual representa formas

completamente alargadas, esto basado en diferentes clasificaciones de forma [112,200–202]. En la Figura 36 se pueden observar las porosidades identificadas en cada ROI.

Tabla 4. Parámetros del filtro de tamaño y forma para el análisis de porosidad.

Parámetro	Valor
Tamaño de poro	Mínimo: 26 [ $\mu\text{m}$ ] Máximo: 20 000 [ $\mu\text{m}$ ]
Esfericidad	Mínimo: 0 Máximo: 0.3

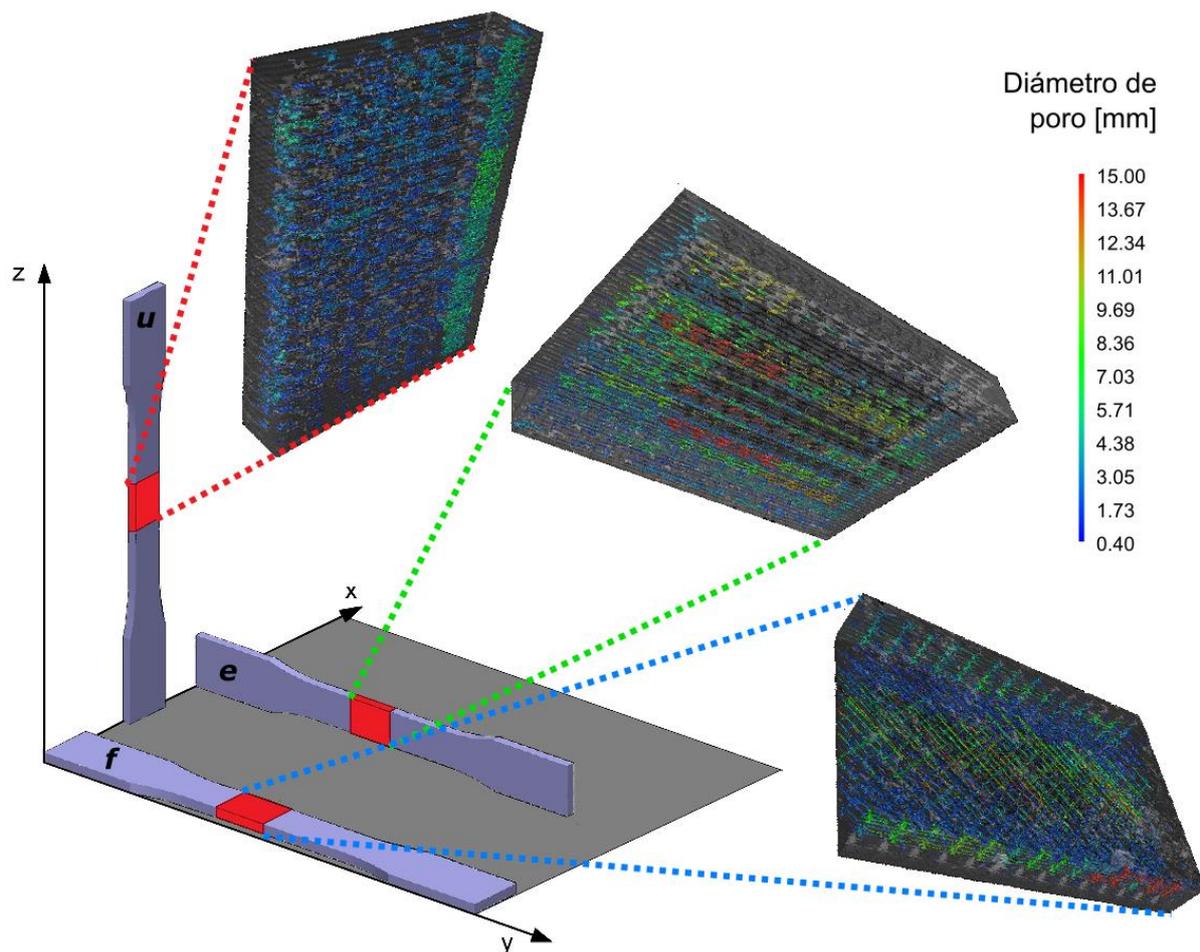


Figura 36. Poros identificados en análisis de defectos en cada una de las probetas.

En la Tabla 5, se observan los resultados obtenidos del análisis de defectos en forma estadística por medio de la media ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $s$ ) de cada descriptor analizado. Para su clasificación se dividieron en descriptores globales y locales. Un descriptor global describe las características generales de los poros tales como la porosidad ( $P$ ) o la cantidad ( $c$ ), en cambio, los descriptores locales se refieren a descripciones específicas asociadas al poro como el tamaño, la forma o la distribución [203]. El descriptor local de tamaño incluye la medición

dimensional del poro en tres dimensiones. Para el tamaño en 1D se tiene el diámetro de la esfera circunscrita ( $d$ ) y el tamaño proyectado en los ejes ( $tp$ ), para 2D se tiene el área proyectada ( $ap$ ) en los planos  $xy$ ,  $xz$ ,  $yz$  y para 3D el número de vóxeles ( $vx$ ) que forman el poro. El descriptor de forma se describe como dos proporcionalidades: esfericidad ( $ef$ ) y compacidad ( $cp$ ). Mientras que el descriptor de distribución ( $dis$ ) representa su posición en la ROI en un plano cartesiano con origen en el centro de masa.

Tabla 5. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $s$ ) de los descriptores globales y locales de la detección de poros de las ROI de las probetas

			Orientación de construcción				
	Característica	Descriptor	$\mu$ y $s$	<i>flat</i>	<i>edge</i>	<i>upright</i>	
Globales	Porosidad	$P$ [%]	-	0.682	0.690	0.587	
	Cantidad	$c$	-	1086	407	645	
Locales	Tamaño	$d$ [mm]	$\mu(d)$	1.60	2.10	0.992	
			$s(d)$	1.74	2.37	0.20	
		$tp$ [mm]	$\mu(ps_x)$	0.21	0.25	0.44	
			$\mu(ps_y)$	1.14	0.34	0.85	
			$\mu(ps_z)$	1.20	2.10	0.33	
			$s(ps_x)$	0.20	0.07	0.35	
			$s(ps_y)$	1.25	0.23	0.40	
			$s(ps_z)$	1.25	2.37	0.27	
			$\mu(pa_{xy})$	0.10	0.05	0.12	
			$\mu(pa_{xz})$	0.11	0.25	0.08	
	$ap$ [mm <sup>2</sup> ]	$s(pa_{xy})$	0.12	0.05	0.10		
		$s(pa_{xz})$	0.16	0.38	0.09		
	$vx$	$\mu(vx)$	3483.52	9412.20	5049.89		
		$s(vx)$	5309.96	20932.91	8606.98		
		Forma	$ef$	$\mu(ef)$	0.24	0.24	0.25
				$s(ef)$	0.04	0.05	0.04
	$cp$		$\mu(cp)$	0.008	0.005	0.015	
			$s(cp)$	0.006	0.005	0.007	
	Distribución	$dis$	$\mu(dis_x)$	0.94	0.40	0.02	
			$\mu(dis_y)$	0.33	2.29	0.36	
$\mu(dis_z)$			-0.59	0.71	-0.67		
$s(dis_x)$			0.66	1.03	0.99		
$s(dis_y)$			3.44	3.03	3.60		
$s(dis_z)$			5.60	5.55	5.54		

De los resultados de la Tabla 5, descriptores tales como porosidad, cantidad, esfericidad, compacidad y distribución no muestran una variación proporcional al cambio en propiedades mecánicas entre las orientaciones, aunque en el caso de la esfericidad puede deberse a las condiciones de filtrado lo que resulta en una forma similar de los poros de las tres probetas. La porosidad porcentual determinada es menor a la señalada en otros estudios donde llega hasta 23% [71], pero similar a estudios donde la porosidad de componentes de ME es tan baja como 0.9% [197].

Del descriptor de tamaño en 3D,  $\nu x$ , es posible identificar que el mayor tamaño de media pertenece a las orientaciones  $f$  y  $e$ , mientras que la más baja a  $u$ . Estos resultados, junto con la poca variación en la porosidad, se asemeja a otros resultados reportados donde no existe una relación directa entre las características comunes de los poros y las propiedades mecánicas de las probetas [127,204–206].

A pesar de lo descrito en los párrafos anteriores, las medidas  $tp$  y  $ap$  muestran que los poros contenidos en las tres probetas tienen una dirección de crecimiento u orientación diferente en cada caso. Esta diferencia es clara en la medición del tamaño  $tp$  en 1D, donde se identifica que en la probeta  $e$  los poros crecen en la dirección del eje  $z$ , para  $f$  en la dirección de los ejes  $y$ ,  $z$ , y para  $u$  en dirección del eje  $y$ , esto también puede observarse en la Figura 36, donde en todos los casos el eje  $z$  es la dirección en que es aplicada la fuerza axial de las pruebas de tracción.

## 4.5 Pruebas de tracción

Para realizar las pruebas de tracción a las probetas, se utilizó un equipo de pruebas mecánicas AGS-X-50 kN *Shimadzu* con una celda de carga de 50 [kN], esta celda se seleccionó a partir de estudios realizados previamente por diferentes autores [69,96,207–209] bajo las mismas condiciones de manufactura que en este estudio. Se estableció una velocidad de 5 [mm/min] de acuerdo con la norma ASTM D638. La medición de los valores resultantes de la prueba y las curvas de esfuerzo - deformación se realizaron por medio del software *TrapeziumX* (versión 1.5.1) de *Shimadzu*.

# 5. Resultados y análisis de pruebas de tracción y análisis de poros

## 5.1 Resultados de pruebas de tracción

Los resultados obtenidos de las pruebas de tracción para el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_c$ ) y el módulo de Young ( $E$ ) se muestran en la Tabla 6 mediante la media ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $s$ ) para cada conjunto de probetas. En las Figuras 37, 38 y 39 se muestran las curvas esfuerzo - deformación para *flat*, *edge* y *upright* respectivamente y en la Figura 40 se muestran las curvas de la media resultante para cada probeta.

Tabla 6. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\pm s$ ) de pruebas de tracción para el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_c$ ) y el módulo de Young ( $E$ ) de cada conjunto de probetas

Orientación	$\sigma_c$ [MPa]	$E$ [MPa]
<i>f</i>	$\mu(\sigma_c) = 30.71$	$\mu(E) = 2120.88$
	$s(\sigma_c) = 0.21$	$s(E) = 8.99$
	$+s(\sigma_c) = 30.92$	$+s(E) = 2129.87$
	$-s(\sigma_c) = 30.50$	$-s(E) = 2111.89$
<i>e</i>	$\mu(\sigma_c) = 32.51$	$\mu(E) = 2181$
	$s(\sigma_c) = 0.36$	$s(E) = 16.39$
	$+s(\sigma_c) = 32.87$	$+s(E) = 2197.39$
	$-s(\sigma_c) = 32.15$	$-s(E) = 2164.61$
<i>u</i>	$\mu(\sigma_c) = 28$	$\mu(E) = 2067$
	$s(\sigma_c) = 0.43$	$s(E) = 23.03$
	$+s(\sigma_c) = 28.43$	$+s(E) = 2090.03$
	$-s(\sigma_c) = 27.57$	$-s(E) = 2043.97$

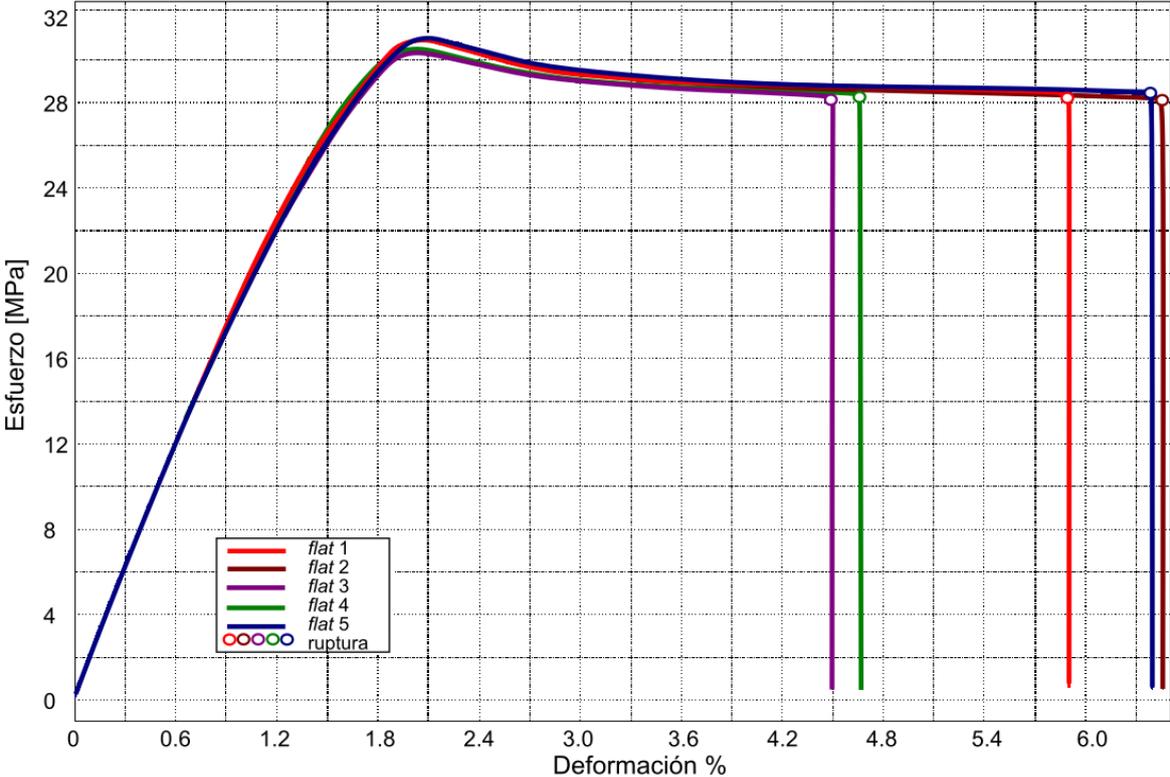


Figura 37. Curvas esfuerzo - deformación de las probetas flat.

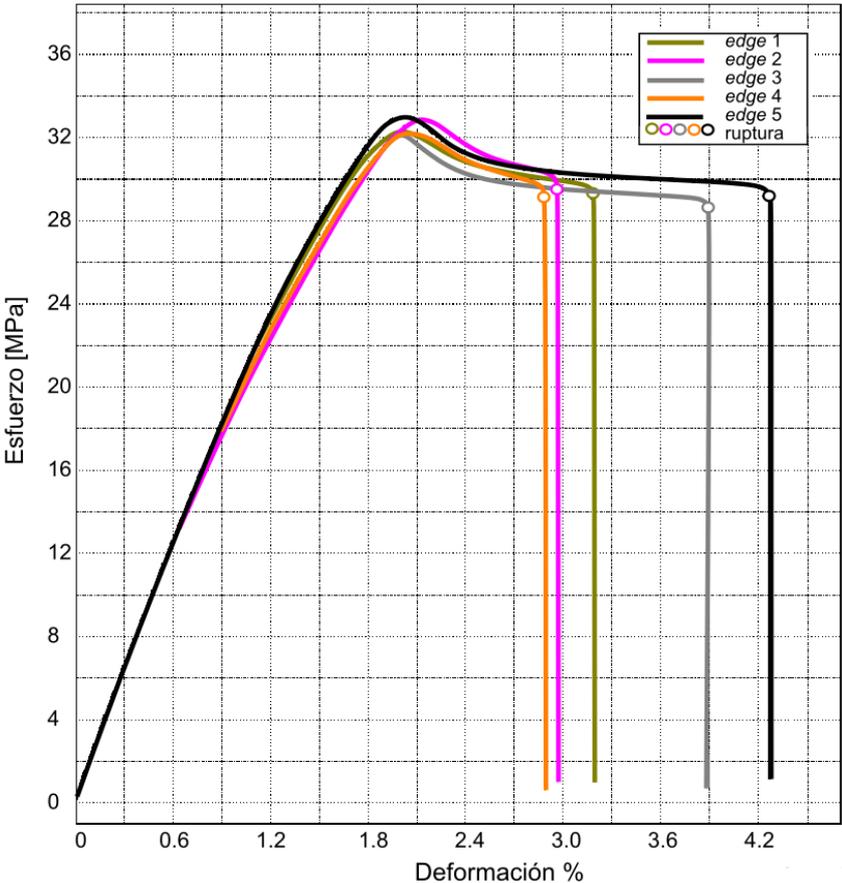


Figura 38. Curvas esfuerzo - deformación de las probetas edge.

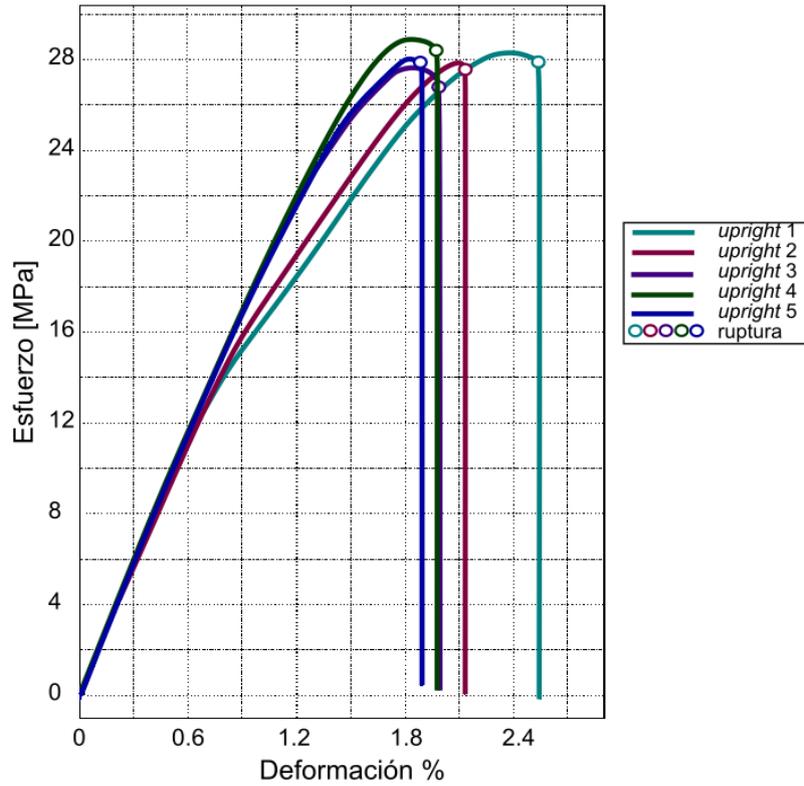


Figura 39. Curvas esfuerzo - deformación de las probetas *upright*.

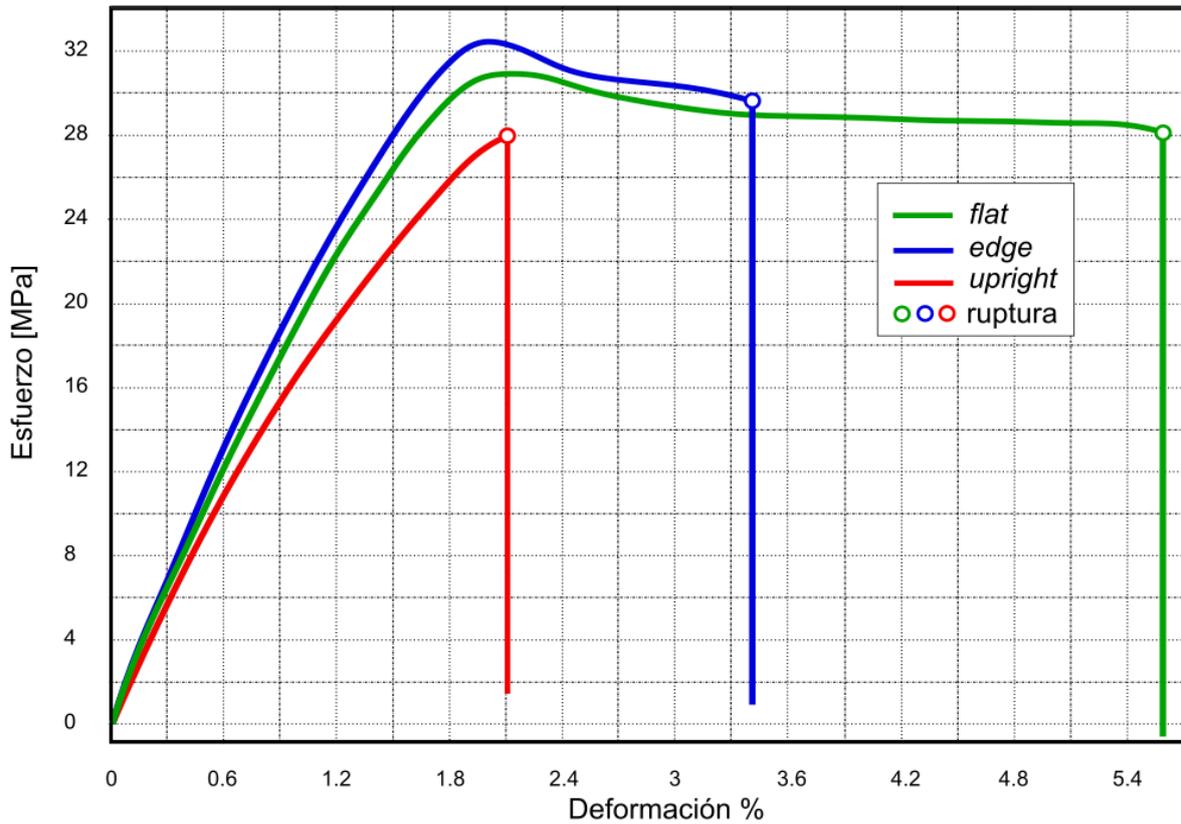


Figura 40. Curva esfuerzo - deformación de la media de las tres orientaciones (adaptado de [195]).

En la Figura 41 se observa a) la estructura transversal de las probetas obtenidas mediante la tomografía, b) una imagen de la fractura de *flat* y en c) las imágenes de las fracturas de las secciones transversales de las probetas, una por orientación, obtenidas por medio de microscopía electrónica utilizando un microscopio electrónico Philips XL20 a 20 [KV] con un *zoom* de 23x.

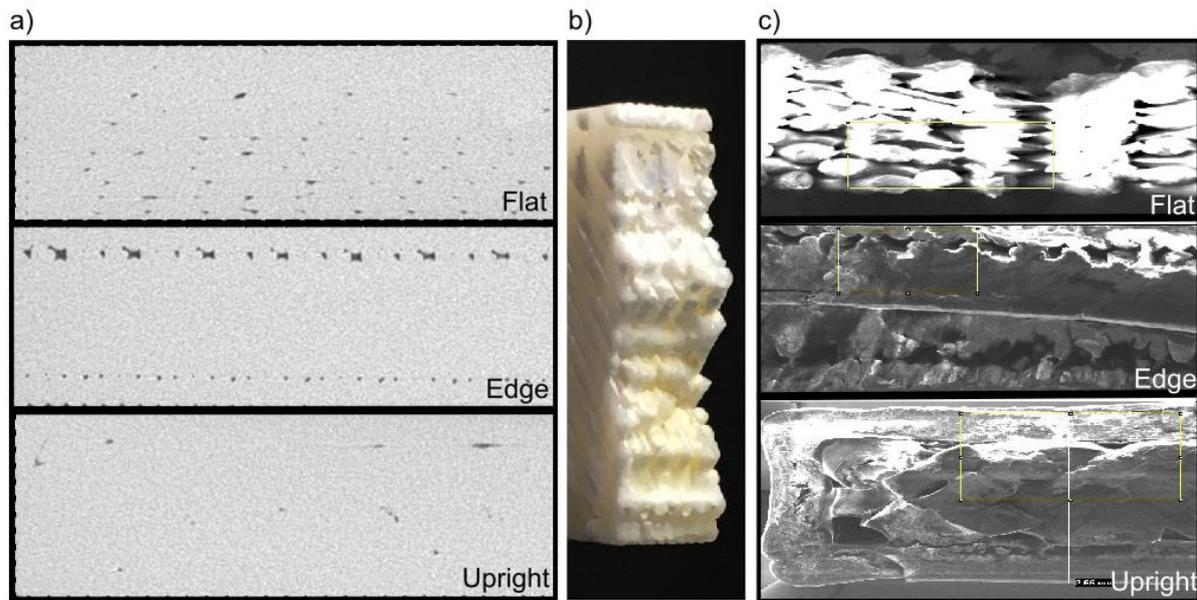


Figura 41. Imágenes de la sección transversal de las probetas a) mediante CT antes de su fractura, b) imagen de la fractura en una probeta de *flat* y c) imágenes mediante microscopía de la fractura, una probeta por cada orientación (adaptado de [195]).

Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas de tracción muestran que el valor medio de  $\sigma_c$  para la orientación *edge* es mayor un 5.53% y 13.87% en comparación con las orientaciones *flat* y *upright* respectivamente, mientras que, para el valor de  $E$ , el valor medio de *edge* es de nuevo mayor en un 2.75% y un 5.22% que las probetas de *flat* y *upright*. También es posible observar un comportamiento dúctil en *edge* y *flat*, mientras que *upright* se muestra frágil. Estos resultados concuerdan con otros trabajos donde el desempeño mecánico de *edge* siempre es mayor que *flat* y *upright* [69,75,144], sin embargo, en este caso las variaciones son menores que las reportadas en esos trabajos donde existe una variación de hasta un 87%.

## 5.2 Resultados del análisis de poros

De los resultados del análisis de poros mostrados en la Tabla 5, no se identifica una relación directa entre las medidas digitales de los descriptores obtenidos por CT de los poros encontrados para cada probeta y sus propiedades mecánicas de las pruebas de tracción. Sin embargo, algunos descriptores proporcionan una tendencia relacionada a los valores medidos donde  $e$  es más resistente que las probetas  $f$  y  $u$ . El descriptor que sigue esa tendencia es la medida digital  $tp$  de 1D, el cual muestra una orientación de los poros con respecto del eje de la carga. Según se ha reportado [19,115,138,210], la orientación de los poros alargados tiene un

impacto en la resistencia y elasticidad de componentes poliméricos y metálicos. Dado que la herramienta de CT no proporciona el cálculo directo de la orientación de los poros, en este estudio se propone el cálculo de esta orientación en el siguiente apartado.

### 5.2.1 Propuesta y cálculo del descriptor de orientación de poro

Para definir la orientación de los poros, se propone usar la medición digital 1D identificada en el análisis de poros, la cual consiste en la proyección del poro en las tres direcciones ortogonales  $tp_x$ ,  $tp_y$  y  $tp_z$ . Los poros identificados en las probetas tienen una clara orientación como se observa en la Figura 42, por lo que se propone lo siguiente: se define un prisma donde el poro se encuentre inscrito como se muestra en la Figura 43, donde la arista en el eje  $x$  corresponde a  $tp_x$ , la arista en  $y$  a  $tp_y$  y la arista en  $z$  a  $tp_z$ . La diagonal que conecta los vértices opuestos  $A$  y  $B$  representa el eje principal del poro o  $epp$ .

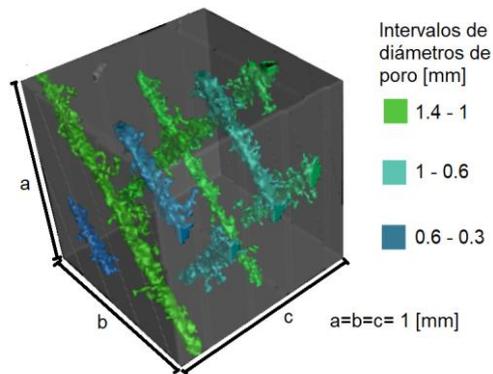


Figura 42. ROI representativa de la probeta *flat* donde se aprecian algunos poros identificados en el análisis de poros donde puede observarse su orientación.

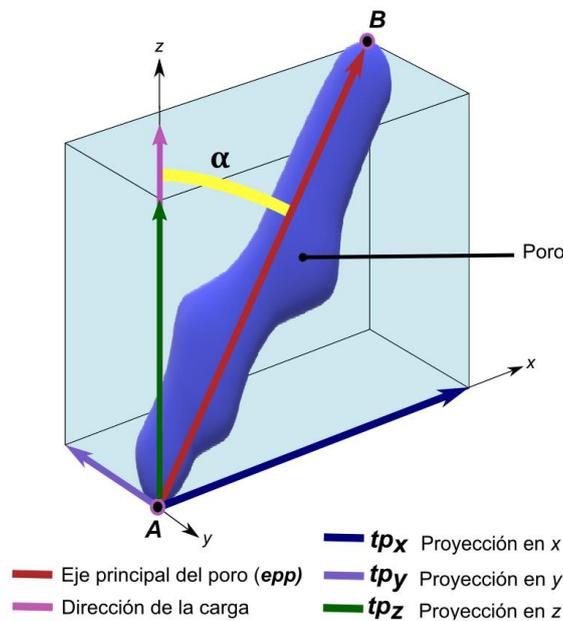


Figura 43. Ángulo de orientación  $\alpha$ , usando las proyecciones medidas en 1D  $x$  ( $tp_x$ ),  $y$  ( $tp_y$ ), y  $z$  ( $tp_z$ ) (adaptado de [195]).

El ángulo resultante de la orientación del poro se denomina con la letra griega  $\alpha$ , la cual es el ángulo entre el eje de la carga y el *epp*. Este ángulo es calculado con la siguiente ecuación trigonométrica:

$$\tan(\alpha) = \frac{\sqrt{(tp_x)^2 + (tp_y)^2}}{tp_z} \tag{Ecuación (4)}$$

Esta ecuación fue aplicada a los poros identificados en cada ROI de cada orientación. Los valores de la media y la desviación estándar calculados a partir de la Ecuación (4) se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $s$ ) del ángulo de orientación de poro con respecto del eje de la carga.

Característica	Descriptor		<i>flat</i>	<i>edge</i>	<i>upright</i>
Orientación de poro	Ángulo $\alpha$ [grados] entre el <i>epp</i> y el eje de la carga	$\mu$	44.82	15.13	73.26
		$s$	7.08	5.80	6.35

En la Tabla 7 es posible observar que los valores de la media de cada orientación de construcción son diferentes entre sí y que las desviaciones estándar en cada caso son pequeñas (menores de 16%). Lo anterior puede observarse de manera particular en la Figura 44, donde se muestra una gráfica con los valores calculados del ángulo  $\alpha$  contra el diámetro  $d$  de poro. En esta gráfica es posible identificar una diferencia entre orientaciones de poro de cada orientación de construcción en poros con diámetro mayor de 0.2 [mm]. También, se identifica una congruencia con los valores obtenidos para las propiedades mecánicas, la cual se analiza en la sección 5.3.

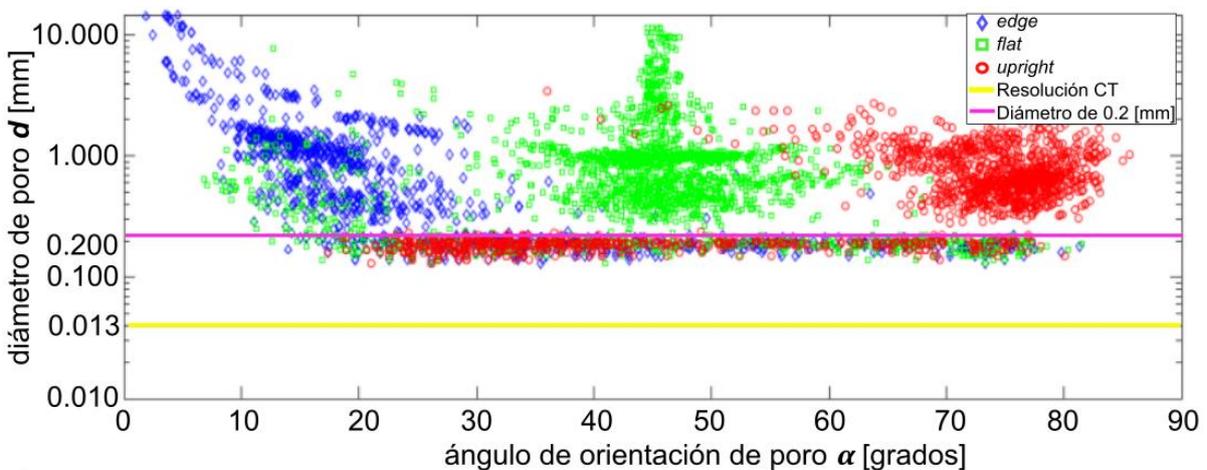


Figura 44. Relación entre ángulo de orientación ( $\alpha$ ) de poro (con respecto al eje de la carga) y diámetro ( $d$ ), donde la línea amarilla representa la resolución de la tomografía 13[ $\mu$ m] (adaptado de [195]).

Como se observa en la Figura 44, es posible identificar un intervalo de valores de ángulo para cada orientación de construcción. Este intervalo se propone sea de una media más/menos una desviación estándar es decir  $\mu(\alpha)-s(\alpha)$  a  $\mu(\alpha)+s(\alpha)$  o  $|\alpha-\mu(\alpha)|<s(\alpha)$ , lo cual significa una probabilidad de aproximadamente 70% de que los valores en este intervalo estén correctamente identificados. Un incremento de la probabilidad (más de una desviación estándar) podría llevar al traslape entre orientaciones de construcción. En la Tabla 8 se muestra el intervalo calculado para cada caso.

Tabla 8. Intervalos de ángulo propuestos para cada orientación.

	<i>flat</i>	<i>edge</i>	<i>upright</i>
<b>Intervalo [grados]</b>	37.73 - 51.91	9.33 - 20.93	66.90 - 79.61

### 5.2.2 Sensibilidad y especificidad

Poros con un intervalo de ángulo de orientación  $\{\alpha : \alpha > \mu(\alpha)+s(\alpha)\}$  o  $\{\alpha : \alpha < \mu(\alpha)-s(\alpha)\}$  pueden estar equivocadamente incluidos en el intervalo de una orientación de construcción distinta. Para conocer la sensibilidad ( $\lambda$ ) [211] del intervalo seleccionado para cada orientación de construcción,  $\lambda$  es calculada. El valor de  $\lambda$  es una medida estadística que arroja el porcentaje de valores, en este caso los ángulos de los poros, correctamente identificados dentro del intervalo establecido.

Para cada orientación *e*, *f* y *u* existe una colección de valores de ángulos de poro  $A(\alpha)$  con una media  $\mu(\alpha)$  y una desviación estándar  $s(\alpha)$  correspondiente a la orientación, y  $A_{-}(\alpha)$  (con respecto a  $\mu_{-}(\alpha)$ ,  $s_{-}(\alpha)$ ) y  $A^{\neg}(\alpha)$  (con respecto a  $\mu^{\neg}(\alpha)$ ,  $s^{\neg}(\alpha)$ ) correspondiente a los otros dos conjuntos. Para calcular  $\lambda$  se utilizó la ecuación:

$$\lambda = \frac{|VP|}{|VP| + |FN|} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde, los Verdaderos Positivos (*VP*) son los poros caracterizados por  $A(\alpha)$  dentro del intervalo establecido y los Falsos Negativos (*FN*) son los poros fuera de esta clase dentro del intervalo como se expresa a continuación:

$$VP = \{\alpha' \in A(\alpha) : |\alpha' - \mu(\alpha)| < s(\alpha)\},$$

$$FN = \{\alpha' \in A_{-}(\alpha) \cup A^{\neg}(\alpha) : |\alpha' - \mu(\alpha)| < s(\alpha)\}$$

Como complemento del valor de  $\lambda$ , la especificidad ( $\varepsilon$ ) [211] es calculada para el intervalo  $|\alpha-\mu(\alpha)|<s(\alpha)$ . La especificidad es, al igual que  $\lambda$ , una medida estadística, en este caso,  $\varepsilon$  representa el porcentaje de ángulos de poros no incluidos en el intervalo  $A(\alpha)$  de la orientación que están

correctamente no contenidos dentro del intervalo y que pertenecen a otro intervalo de ángulos. Para calcular  $\varepsilon$  con respecto a  $A(\alpha)$ , se aplica la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{|VN|}{|VN| + |FP|} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde, los Verdaderos Negativos ( $VN$ ) son los ángulos de los poros clasificados por  $A_-(\alpha)$  y  $A^-(\alpha)$ , que no están contenidos en el intervalo designado de ángulos y los Falsos Positivos ( $FP$ ) son los ángulos de  $A(\alpha)$  fuera del intervalo esperado de ángulos de poro, esto se expresa a continuación:

$$VN = \{ \alpha' \in A_-(\alpha) \cup A^-(\alpha) : |\alpha' - \mu(\alpha)| \geq s(\alpha) \}$$

$$FP = \{ \alpha' \in A(\alpha) : |\alpha' - \mu(\alpha)| \geq s(\alpha) \}.$$

Los resultados para  $\lambda$  y  $\varepsilon$  con referencia al intervalo  $|\alpha - \mu(\alpha)| < s(\alpha)$  son mostrados en la Figura 45 donde son evaluados con respecto al diámetro, esto debido al ruido generado por poros pequeños observado en la Figura 44 y con respecto a varias  $ef$  con el objetivo de identificar que tan confiable resulta el filtro seleccionado para forma. Del cálculo de  $\lambda$  y  $\varepsilon$  es posible observar una alta certeza en la identificación de ángulos del poro con diámetro mayor a 0.2 [mm]. Por otro lado, los poros con diámetros pequeños ( $d \leq 0.2$  [mm]) traen ruido a la identificación de poros mediante su ángulo de orientación, esto también se observa en la Figura 44. Se identifica que diámetros mayores que 0.2 [mm] arrojan valores promedio de  $\lambda = 81.3\%$  y  $\varepsilon = 90.6\%$ , y estos aumentan mientras aumenta el diámetro de los poros. En el caso del filtro de  $ef$  se calculó que  $\lambda = 97.45\%$  y  $\varepsilon = 89.0\%$  lo que muestra una alta confiabilidad en la aplicación del filtro de forma.

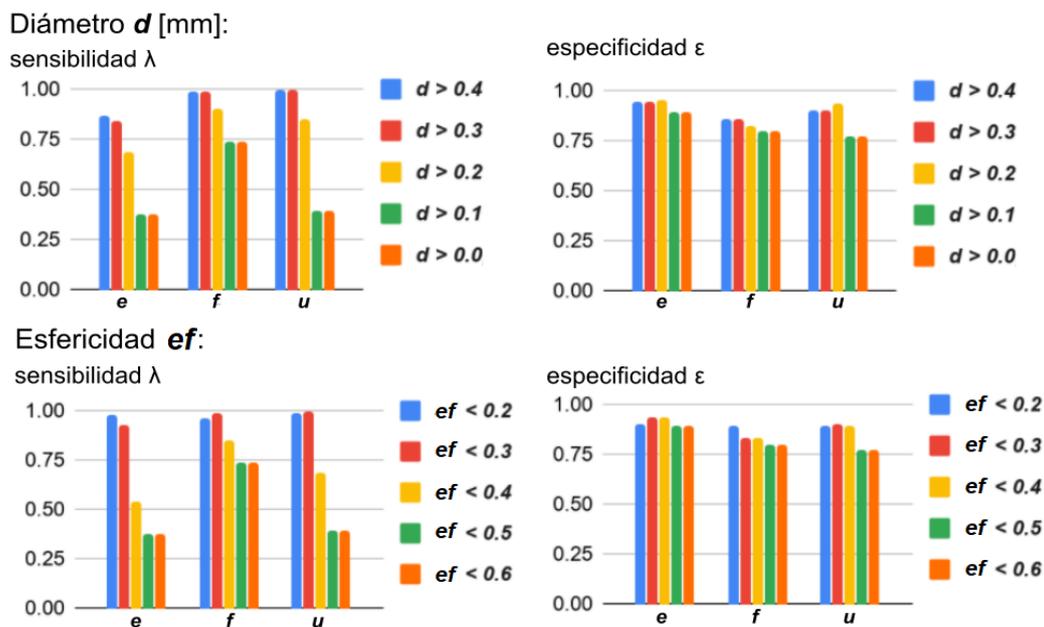


Figura 45. Sensibilidad y especificidad calculada para un intervalo de ángulos de poro de  $|\alpha - \mu(\alpha)| < s(\alpha)$  para cada colección de poros por orientación (adaptado de [175]).

### 5.3 Relación entre orientación del poro y propiedades mecánicas

Una vez calculadas las medidas estadísticas  $\lambda$  y  $\varepsilon$  de los intervalos de ángulos de los poros establecidos para cada orientación de construcción, se realizó la gráfica de la Figura 46 la cual representa una relación entre las propiedades mecánicas obtenidas en este trabajo  $\sigma_c$ ,  $E$  y los intervalos de ángulos de los poros  $\mu(\alpha)$  de cada orientación de construcción analizada.

En la Figura 46 se observa una escala de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en el eje de las abscisas el cual representa el ángulo  $\mu(\alpha)$  entre el eje de la carga y el **epp**, donde se establece el intervalo seleccionado para cada orientación analizada,  $\mu(\alpha)-s(\alpha)$  como límite inferior,  $\mu(\alpha)$  como punto central y  $\mu(\alpha)+s(\alpha)$  como límite superior. En el eje de las ordenadas se colocan las propiedades  $\sigma_c$  en el eje izquierdo (azul) y  $E$  en el eje derecho (anaranjado), ambas delimitadas de igual forma que los intervalos de ángulo del poro, la media más menos una desviación estándar. En la parte interior de la Figura 46, se identifica la intersección de intervalos seleccionados para  $\mu(\alpha)$ ,  $\sigma_c$  y  $E$  por medio de cruces identificadas para cada orientación de construcción y su propiedad mecánica.

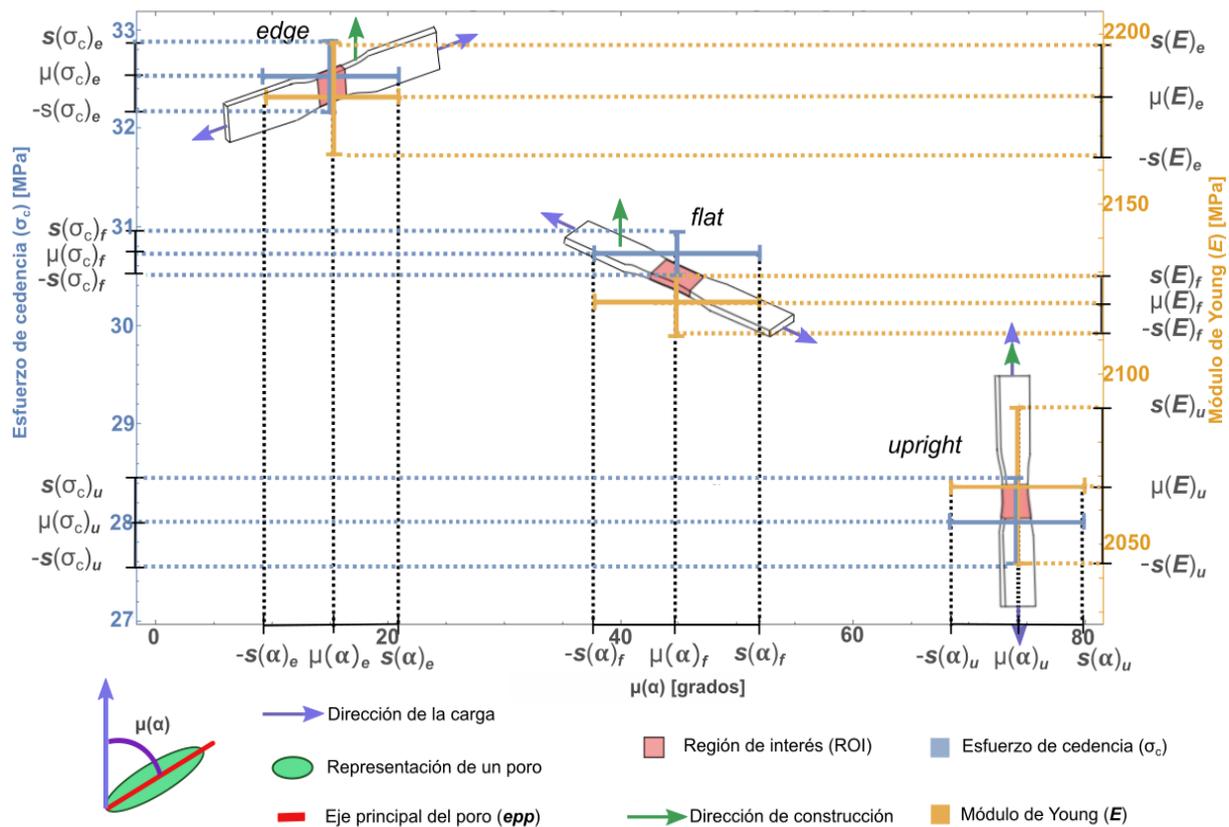


Figura 46. Ángulo de orientación del poro  $\mu(\alpha)$  y su relación con el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_c$ ) y el módulo de Young ( $E$ ) (adaptado de [175]).

La Figura 46 muestra la relación encontrada entre las orientaciones de construcción y sus propiedades mecánicas. Como resultado es posible observar que cuando los **epp** se encuentran

orientados de manera paralela al eje de la carga ( $\alpha \cong 0^\circ$ ), las propiedades mecánicas  $\sigma_c$  y  $E$  de las probetas incrementan. Por el contrario, cuando los *epf* se encuentren ortogonales al eje de la carga ( $\alpha \cong 90^\circ$ ), los valores de las propiedades mecánicas  $\sigma_c$  y  $E$  de las probetas disminuyen.

## 6. Discusiones y conclusiones

En este trabajo se analiza y determina el efecto de la porosidad en el comportamiento mecánico de componentes manufacturados aditivamente. Con el objetivo de estudiar la relación entre poros y propiedades mecánicas, tres regiones de interés (ROI) de probetas construidas por medio del proceso de Extrusión de Material (ME) / Modelado por Deposición Fundida (FDM) en tres diferentes orientaciones de construcción: *flat f*, *edge e* y *upright u* fueron inspeccionadas mediante Tomografía Computarizada (CT) para analizar sus poros. Los poros fueron caracterizados a través de los descriptores: cantidad, porosidad, tamaño (en una, dos y tres dimensiones), forma y distribución. Posteriormente, 5 probetas por orientación fueron caracterizadas por medio de pruebas de tracción para determinar su resistencia y comportamiento mecánico por medio del cálculo de las propiedades de esfuerzo de cedencia ( $\sigma_c$ ) y módulo de Young ( $E$ ).

Como resultado de las pruebas de tracción se observó, como se esperaba, que las tres orientaciones tienen un comportamiento mecánico diferente, donde *e* y *f* tienen un comportamiento dúctil siendo *e* la orientación con mayor resistencia, mientras que, *u* muestra un comportamiento frágil con menor resistencia, esto concuerda con lo identificado ampliamente en la literatura [69,70,75]. En el presente trabajo se observó una variación de propiedades ( $\sigma_c$  y  $E$ ) de hasta 12.5% en comparación con la alta variación encontrada en otros trabajos (de hasta 87%) [69,74,75]. Este comportamiento, según estos autores, es debido principalmente a la presencia de poros en las estructuras de componentes manufacturados mediante ME, es por eso por lo que se realiza un estudio de estos poros en este estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de poros, no se identificó una notable variación del porcentaje de porosidad entre las orientaciones, esto indica que esta métrica no es suficiente para determinar propiedades mecánicas tal como lo afirman varios autores [107,128–130]. Además, ninguno de los valores porcentuales obtenidos mostraron ser elevados (de hasta 23%) como los porcentajes reportados en la literatura [71,78,80]. Por otro lado, el tamaño de poro en tres dimensiones tampoco mostró una tendencia la cual permita identificar por qué existe una variación en el comportamiento mecánico, esto concuerda con los resultados obtenidos por Lambert et al. [127]. El mismo resultado se observó en la distribución de los poros, los cuales resultaron estar alojados aleatoriamente en la estructura de las probetas y no en zonas específicas, esto concuerda con lo establecido por Wang et al. [80].

No obstante lo mencionado en el párrafo anterior, el tamaño de poro en una dimensión proyectado en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sí mostró una variación significativa la cual permitió identificar un crecimiento diferente de los poros para cada orientación. Dado lo anterior, se propuso determinar la orientación de los poros de cada orientación con respecto al eje de la carga, esto por medio de un nuevo descriptor identificado con la letra griega  $\alpha$  el cual es el ángulo entre el eje principal del poro *epp* (Véase Figura 43) y el eje de la carga, el cual se propone como un descriptor local. Se observó entonces que, en cada orientación de construcción los poros tienden a un valor de  $\alpha$  específico. Los valores de  $\alpha$  en el caso de *e* mostraron ser cercanos a

los  $0^\circ$  con respecto del eje de la carga, los poros de  $f$  mostraron una orientación cercana a los  $45^\circ$  y finalmente, los poros de  $u$  se encontraron, en su mayoría, orientados cercanos a  $90^\circ$ . De lo anterior es posible observar que, el ángulo de orientación de los poros muestra una variación entre orientaciones la cual coincide con las propiedades mecánicas. A partir de los resultados obtenidos se establece que, cuando el ángulo de orientación del poro es cercano a  $0^\circ$  ( $epp$  es paralelo al eje de la carga), el esfuerzo de cedencia y el módulo de Young del componente incrementan, mientras que al acercarse a  $90^\circ$  ( $epp$  es ortogonal al eje de la carga), estas propiedades disminuyen. Estos resultados se plasman de manera gráfica en la Figura 46.

Lo anterior se debe principalmente a que, cuando la carga es aplicada a probetas con poros con una orientación principalmente perpendicular a la carga, existe una alta concentración de esfuerzos que llevan a que estos poros se alarguen, esto causa a su vez que exista una coalescencia entre ellos y finalmente se lleve a cabo la fractura, a diferencia de cuando la carga es aplicada a poros orientados con la misma dirección donde la concentración de esfuerzos es menor y en consecuencia, la resistencia y la ductilidad se ven afectadas en menor grado, esto ha sido observado por otros autores [139,212,213]. El efecto que tiene la orientación de los poros en las propiedades mecánicas descrito en este trabajo es común a otros procesos de manufactura tradicional de aleaciones metálicas (Acero, Ni, Ti, Al, Zn, Fe, etc.) y en materiales compuestos (Polímeros reforzados con fibras) como lo refieren otros autores [210,214–218].

La propuesta generada en este trabajo permite, mediante el análisis de la orientación de los poros con respecto al eje de la carga, establecer una aproximación de las propiedades mecánicas de componentes manufacturados mediante ME / FDM y, como se menciona en el párrafo anterior, dado que esta relación se presenta en otros materiales y otros procesos con poros alargados, este análisis puede ser extendido y ser aplicado en otros casos, para esto es necesario realizar experimentación adicional. Esta propuesta por lo tanto abre una nueva línea de investigación para la generación de nuevos métodos para la predicción de propiedades mecánicas a partir del análisis de los poros contenidos en la estructura de los componentes de interés.

El descriptor propuesto, sin embargo, tiene algunas particularidades que deben ser consideradas. Dado que la definición de la orientación de los poros se calcula a partir de sus proyecciones en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , resulta obvio que, a pesar del cálculo matemático realizado, en el caso de poros esféricos la implementación física es vaga con ángulos cercanos a  $45^\circ$ , por esta razón, la aplicación del ángulo de orientación de los poros es sugerido a componentes que contengan principalmente poros alargados. Es necesario considerar también que, los resultados obtenidos mediante la tomografía pueden acarrear errores, principalmente en la medición de poros de tamaños cercanos a la resolución de la tomografía. Además, pese a que se identifican a los poros como la causa principal de una reducción de resistencia en componentes ME/FDM, otros fenómenos deben ser estudiados como la fuerza entre la unión que se genera entre filamentos y entre capas como lo estudian ciertos autores [81,219,220].

La propuesta desarrollada en este trabajo permite ser aplicada a componentes manufacturados mediante ME/FDM con el material ABS, a través del estudio de sus poros mediante el análisis CT y aplicando el cálculo del descriptor  $\alpha$  para relacionarlo con los resultados plasmados en la Figura 46. Dados los resultados encontrados que muestran una relación directa entre el poro, mediante el descriptor propuesto, y el desempeño mecánico, la hipótesis propuesta se cumple.

## Referencias

- [1] ISO/ASTM, 2015, *Additive Manufacturing — General Principles — Terminology*, 52900.
- [2] Hull, C. W., 1986, “Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography,” US Patent.
- [3] Pham, D. T., and Gault, R. S., 1998, “A Comparison of Rapid Prototyping Technologies,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **38**(10-11), pp. 1257–1287.
- [4] Williams, C. B., Mistree, F., and Rosen, D. W., 2011, “A Functional Classification Framework for the Conceptual Design of Additive Manufacturing Technologies,” *J. Mech. Des.*, **133**(12), p. 121002.
- [5] Levy, G. N., Schindel, R., and Kruth, J. P., 2003, “Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (LM) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives,” *CIRP Ann.*, **52**(2), pp. 589–609.
- [6] Stavropoulos, P., and Foteinopoulos, P., 2018, “Modelling of Additive Manufacturing Processes: A Review and Classification,” *Manufacturing Review*, **5**, p. 2.
- [7] Silva, J. V. L., and Rezende, R. A., 2013, “Additive Manufacturing and Its Future Impact in Logistics,” *IFAC Proceedings Volumes*, **46**(24), pp. 277–282.
- [8] Ian Gibson, David W. Rosen, Brent Stucker, 2013, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, USA, New York.
- [9] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., and Eckert, J., 2017, “Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines,” *Materials*, **10**(6).
- [10] Shim, D.-S., Baek, G.-Y., Seo, J.-S., Shin, G.-Y., Kim, K.-P., and Lee, K.-Y., 2016, “Effect of Layer Thickness Setting on Deposition Characteristics in Direct Energy Deposition (DED) Process,” *Opt. Laser Technol.*, **86**, pp. 69–78.
- [11] Torries, B., Sterling, A. J., Shamsaei, N., Thompson, S. M., and Daniewicz, S. R., 2016, “Utilization of a Microstructure Sensitive Fatigue Model for Additively Manufactured Ti-6Al-4V,” *Rapid Prototyping Journal*, **22**(5), pp. 817–825.
- [12] Sun, S., Brandt, M., and Easton, M., 2017, “2 - Powder Bed Fusion Processes: An Overview,” *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, ed., Woodhead Publishing, pp. 55–77.
- [13] Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., and Poprawe, R., 2012, “Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms,” *Int. Mater. Rev.*, **57**(3), pp. 133–164.
- [14] Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., and Zhang, J., 2018, “Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, **27**(1), pp. 1–13.
- [15] Bhushan, B., and Caspers, M., 2017, “An Overview of Additive Manufacturing (3D Printing) for Microfabrication,” *Microsyst. Technol.*, **23**(4), pp. 1117–1124.
- [16] Eiliat, H., and Urbanic, J., 2018, “Visualizing, Analyzing, and Managing Voids in the Material Extrusion Process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **96**(9), pp. 4095–4109.
- [17] Wang, L., and Gardner, D. J., 2018, “Contribution of Printing Parameters to the Interfacial Strength of Polylactic Acid (PLA) in Material Extrusion Additive Manufacturing,” *Progress in Additive Manufacturing*, **3**(3), pp. 165–171.
- [18] Ltd, S., 2018, “Tecnología FDM,” Stratasys [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/tecnologias/fdm-technology>. [Accessed: 24-May-2018].

- [19] Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V., and Pipes, R. B., 2018, “Fused Filament Fabrication of Fiber-Reinforced Polymers: A Review,” *Addit. Manuf.*, **21**, pp. 1–16.
- [20] Duty, C. E., Kunc, V., Compton, B., Post, B., Erdman, D., Smith, R., Lind, R., Lloyd, P., and Love, L., 2017, “Structure and Mechanical Behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials,” *Rapid Prototyp J.*, **23**(1), pp. 181–189.
- [21] Halloran, J. W., 2016, “Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, **46**(1), pp. 19–40.
- [22] Dhariwala, B., Hunt, E., and Boland, T., 2004, “Rapid Prototyping of Tissue-Engineering Constructs, Using Photopolymerizable Hydrogels and Stereolithography,” *Tissue Eng.*, **10**(9-10), pp. 1316–1322.
- [23] Layani, M., Wang, X., and Magdassi, S., 2018, “Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization,” *Adv. Mater.*, **30**(41), p. e1706344.
- [24] Bagheri, A., and Jin, J., 2019, “Photopolymerization in 3D Printing,” *ACS Appl. Polym. Mater.*, **1**(4), pp. 593–611.
- [25] Bártolo, P. J., 2011, *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*, Springer US, New York, NY.
- [26] Monzón, M., Ortega, Z., Hernández, A., Paz, R., and Ortega, F., 2017, “Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing,” *Materials*, **10**(1).
- [27] Bourdon, L., Maurin, J.-C., Gritsch, K., Brioude, A., and Salles, V., 2018, “Improvements in Resolution of Additive Manufacturing: Advances in Two-Photon Polymerization and Direct-Writing Electrospinning Techniques,” *ACS Biomater. Sci. Eng.*, **4**(12), pp. 3927–3938.
- [28] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, 2010, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, New York, NY.
- [29] Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I., and Zhang, Y., 2020, “Design for Additive Manufacturing: Framework and Methodology,” *CIRP Ann.*, **69**(2), pp. 578–599.
- [30] Medellín-Castillo, H. I., and Zaragoza-Siqueiros, J., 2019, “Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review,” *Chin. J. Mech. Eng.*, **32**(1), p. 53.
- [31] Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., and Elmesbahi, A., 2018, “Additive Manufacturing Technology: The Status, Applications, and Prospects,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **97**(1), pp. 147–161.
- [32] Vaezi, M., Seitz, H., and Yang, S., 2013, “A Review on 3D Micro-Additive Manufacturing Technologies,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **67**(5), pp. 1721–1754.
- [33] Pereira, T., Kennedy, J. V., and Potgieter, J., 2019, “A Comparison of Traditional Manufacturing vs Additive Manufacturing, the Best Method for the Job,” *Procedia Manufacturing*, **30**, pp. 11–18.
- [34] Lu, B., Li, D., and Tian, X., 2015, “Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing,” *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.*, **1**(1), pp. 085–089.
- [35] Han, P., 2017, “Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts,” *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.*, **3**(5), pp. 648–652.
- [36] Noorani, R., 2017, *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [37] AM Platform Sasam, 2014, *SASAM Standardisation Roadmap*.
- [38] Bourell David L., Rosen David W., Leu Ming C., 2014, “The Roadmap for Additive Manufacturing and Its Impact,” *3D Printing and Additive Manufacturing*, **1**(1), pp. 6–9.
- [39] Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., and Wright, P. K., 2002, “Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS,” *Rapid Prototyp. J.*, **8**(4), pp.

- 248–257.
- [40] Wilkes, J., Hagedorn, Y., Meiners, W., and Wissenbach, K., 2013, “Additive Manufacturing of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Components by Selective Laser Melting,” *Rapid Prototyping Journal*, **19**(1), pp. 51–57.
- [41] Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., and Nasiri, A., 2020, “Comparison of Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Shipbuilding Steel Plates Fabricated by Conventional Rolling versus Wire Arc Additive Manufacturing,” *Additive Manufacturing*, **32**, p. 101086.
- [42] Bertoldi, M., Yardimci, M. A., Pistor, C. M., Guyeri, S. I., and Sala, G., 1998, “Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition,” *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, **9th**, pp. 557–566.
- [43] Tronvoll, S. A., Welo, T., and Elverum, C. W., 2018, “The Effects of Voids on Structural Properties of Fused Deposition Modelled Parts: A Probabilistic Approach,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **97**(9), pp. 3607–3618.
- [44] Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G., and Gomes, S., 2018, “An Additive Manufacturing Oriented Design Approach to Mechanical Assemblies,” *Journal of Computational Design and Engineering*, **5**(1), pp. 3–18.
- [45] Vlasea, M., Pilliar, R., and Toyserkani, E., 2015, “Control of Structural and Mechanical Properties in Bioceramic Bone Substitutes via Additive Manufacturing Layer Stacking Orientation,” *Additive Manufacturing*, **6**, pp. 30–38.
- [46] Kotlinski, J., 2014, “Mechanical Properties of Commercial Rapid Prototyping Materials,” *Rapid Prototyping Journal*, **20**(6), pp. 499–510.
- [47] Hazrat, A. M., 2019, “3D Printing: A Critical Review of Current Development and Future Prospects,” *Rapid Prototyp. J.*, **25**(6), pp. 1108–1126.
- [48] Kritzinger, W., Steinwender, A., Lumetzberger, S., and Sihn, W., 2018, “Impacts of Additive Manufacturing in Value Creation System,” *Procedia CIRP*, **72**, pp. 1518–1523.
- [49] Singh, S., Ramakrishna, S., and Singh, R., 2017, “Material Issues in Additive Manufacturing: A Review,” *J. Manuf. Process.*, **25**, pp. 185–200.
- [50] Karevska S., Steinberg G., Müller A., Wienken R., Kilger C., Krauss D., 2019, *3D Printing: Hype or Game Changer?*, Report 2019, Ernst & Young GmbH .
- [51] Wu, B., Myant, C., and Weider, S., 2017, “The Value of Additive Manufacturing: Future Opportunities,” Imperial College London, Briefing Paper, (2).
- [52] Sathies, T., 2020, “A Review on Advancements in Applications of Fused Deposition Modelling Process,” *Rapid Prototyping Journal*, **ahead-of-print**(ahead-of-print).
- [53] 2020, *Additive Manufacturing Market Report*, Reports and data.
- [54] Wang, J., Xie, H., Weng, Z., Senthil, T., and Wu, L., 2016, “A Novel Approach to Improve Mechanical Properties of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling,” *Mater. Des.*, **105**, pp. 152–159.
- [55] Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., and Teti, R., 2020, “Current Advances in Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, **88**, pp. 439–444.
- [56] Jin, L., Zhang, K., Xu, T., Zeng, T., and Cheng, S., 2018, “The Fabrication and Mechanical Properties of SiC/SiC Composites Prepared by SLS Combined with PIP,” *Ceram. Int.*, **44**(17), pp. 20992–20999.
- [57] Akinsowon V., N. M., 2019, *State of the 3D Printing Industry Survey 2019: AM Service Providers*, AMFG.
- [58] Masood, S. H., Mau, K., and Song, W. Q., 2010, “Tensile Properties of Processed FDM Polycarbonate Material,” *MSF*, **654-656**, pp. 2556–2559.
- [59] Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., and Shuib, R. K., 2019, “Comparison of Physical and Mechanical Properties of PLA, ABS and Nylon 6 Fabricated Using Fused Deposition Modeling and Injection Molding,” *Composites*

- Part B, **176**, p. 107341.
- [60] Popovich, A., and Sufiiarov, V., 2016, “Metal Powder Additive Manufacturing,” *New Trends in 3D Printing*, I.V. Shishkovsky, ed., IntechOpen, Rijeka.
- [61] Popovich, A. A., Sufiiarov, V. S., Polozov, I. A., Borisov, E. V., and Maximov, M. Y., 2015, “Studying of Microstructure and Properties of Selective Laser Melted Titanium-Based Alloy,” *Adv. Mat. Res.*, **1120-1121**, pp. 1269–1275.
- [62] Sufiiarov, V. S., Borisov, E. V., and Polozov, I. A., 2014, “Selective Laser Melting of the Inconel 718 Nickel Superalloy,” *Ammonia Plant Saf. Relat. Facil.*, **698**, pp. 333–338.
- [63] Liu, S., and Shin, Y. C., 2019, “Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A Review,” *Mater. Des.*, **164**, p. 107552.
- [64] Kęsy, A., and Kotliński, J., 2010, “Mechanical Properties of Parts Produced by Using Polymer Jetting Technology,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **10**(3), pp. 37–50.
- [65] Cazón, A., Morer, P., and Matey, L., 2014, “PolyJet Technology for Product Prototyping: Tensile Strength and Surface Roughness Properties,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. B: J. Eng. Manuf.*, **228**(12), pp. 1664–1675.
- [66] Marsico, C., Øilo, M., Kutsch, J., Kauf, M., and Arola, D., 2020, “Vat Polymerization-Printed Partially Stabilized Zirconia: Mechanical Properties, Reliability and Structural Defects,” *Addit Manuf.*, **36**.
- [67] Fielding, G. A., Bandyopadhyay, A., and Bose, S., 2012, “Effects of Silica and Zinc Oxide Doping on Mechanical and Biological Properties of 3D Printed Tricalcium Phosphate Tissue Engineering Scaffolds,” *Dent. Mater.*, **28**(2), pp. 113–122.
- [68] Askanian, H., Muranaka de Lima, D., Commereuc, S., and Verney, V., 2018, “Toward a Better Understanding of the Fused Deposition Modeling Process: Comparison with Injection Molding,” *3D Printing and Additive Manufacturing*, **5**(4), pp. 319–327.
- [69] Durgun, I., and Ertan, R., 2014, “Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost,” *Rapid Prototyp. J.*, **20**(3), pp. 228–235.
- [70] Croccolo, D., De Agostinis, M., and Olmi, G., 2013, “Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30,” *Comput. Mater. Sci.*, **79**, pp. 506–518.
- [71] Ang, K. C., Leong, K. F., Chua, C. K., and Chandrasekaran, M., 2006, “Investigation of the Mechanical Properties and Porosity Relationships in Fused Deposition Modelling-fabricated Porous Structures,” *Rapid Prototyping Journal*, **12**(2), pp. 100–105.
- [72] Bellini, A., and Güçeri, S., 2003, “Mechanical Characterization of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, **9**(4), pp. 252–264.
- [73] Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D., Kroese, C., and Ifju, P. G., 2017, “Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts,” *Rapid Prototyp. J.*, **23**(4), pp. 811–824.
- [74] Riddick, J., Hall, A., Haile, M., Von Wahlde, R., Cole, D., and Biggs, S., 2012, “Effect of Manufacturing Parameters on Failure in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Fabricated by Fused Deposition Modeling,” *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- [75] Cole, D. P., Riddick, J. C., Iftekhar Jaim, H. M., Strawhecker, K. E., and Zander, N. E., 2016, “Interfacial Mechanical Behavior of 3D Printed ABS,” *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**(30), p. 913.
- [76] Nimmo, J. R., 2004, “Porosity and Pore Size Distribution,” *Encyclopedia of Soils in the Environment*, **3**(1), pp. 295–303.

- [77] Guessasma, S., Belhabib, S., and Nouri, H., 2015, “Significance of Pore Percolation to Drive Anisotropic Effects of 3D Printed Polymers Revealed with X-Ray  $\mu$ -Tomography and Finite Element Computation,” *Polymer*, **81**, pp. 29–36.
- [78] Nouri, H., Guessasma, S., and Belhabib, S., 2016, “Structural Imperfections in Additive Manufacturing Perceived from the X-Ray Micro-Tomography Perspective,” *J. Mater. Process. Technol.*, **234**, pp. 113–124.
- [79] Motaparti, K. P., Taylor, G., Leu, M. C., Chandrashekhara, K., Castle, J., and Matlack, M., 2017, “Experimental Investigation of Effects of Build Parameters on Flexural Properties in Fused Deposition Modelling Parts,” *Virtual Phys. Prototyp.*, **12**(3), pp. 207–220.
- [80] Wang, X., Zhao, L., Fuh, J. Y. H., and Lee, H. P., 2019, “Effect of Porosity on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers: Experiments and Micromechanical Modeling Based on X-Ray Computed Tomography Analysis,” *Polymers*, **11**(7).
- [81] Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., and Gu, P., 2008, “Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments,” *Rapid Prototyp. J.*, **14**(2), pp. 72–80.
- [82] Gurralla, P. K., and Regalla, S. P., 2014, “Part Strength Evolution with Bonding between Filaments in Fused Deposition Modelling,” *Virtual Phys. Prototyp.*, **9**(3), pp. 141–149.
- [83] Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., and Gu, P., 2002, “Investigation of Bond Formation in FDM Process,” *13th, Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, Austin, TX, pp. 400–407.
- [84] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., and Ozcan, S., 2014, “Highly Oriented Carbon Fiber–polymer Composites via Additive Manufacturing,” *Compos. Sci. Technol.*, **105**, pp. 144–150.
- [85] Huerta, L. R., Hernández C., A. I., and Caballero-Ruiz, A., 2016, “Relationship between Inner Porosity of Filaments and FDM Manufactured Pieces by Computed Tomography,” *Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing*, American Society for Precision Engineering, ed.
- [86] Chen, R. K., and Lo, T. T., 2015, “Nano-CT Characterization of Structural Voids and Air Bubbles in Fused Deposition Modeling for Additive Manufacturing,” *Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, ASTM, ed.
- [87] Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., and Pregger, B. A., 2000, “Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples,” *Mater. Manuf. Process.*, **15**(1), pp. 107–122.
- [88] Fatimatuzahraa, A. W., Farahaina, B., and Yusoff, W. A. Y., 2011, “The Effect of Employing Different Raster Orientations on the Mechanical Properties and Microstructure of Fused Deposition Modeling Parts,” *2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*, Langkawi, Malaysia, pp. 22–27.
- [89] du Plessis, A., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., and Le Roux, S. G., 2018, “X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing: A Review of the Current Technology and Applications,” *3D Print Addit Manuf.*, **5**(3), pp. 227–247.
- [90] Ziółkowski, G., Chlebus, E., Szymczyk, P., and Kurzac, J., 2014, “Application of X-Ray CT Method for Discontinuity and Porosity Detection in 316L Stainless Steel Parts Produced with SLM Technology,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **14**(4), pp. 608–614.
- [91] Carmignato, S., Dewulf, W., and Leach, R., 2018, *Industrial X-Ray Computed Tomography*, Springer International Publishing.
- [92] Salmi, M., Paloheimo, K.-S., Tuomi, J., Wolff, J., and Mäkitie, A., 2013, “Accuracy of

- Medical Models Made by Additive Manufacturing (rapid Manufacturing),” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, **41**(7), pp. 603–609.
- [93] Brajlilh, T., Valentan, B., Balic, J., and Drstvensek, I., 2011, “Speed and Accuracy Evaluation of Additive Manufacturing Machines,” *Rapid prototyping journal*.
- [94] Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurens, K., and Donmez, M. A., 2014, “An Additive Manufacturing Test Artifact,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **119**, pp. 429–459.
- [95] Zhou, Y., Zou, J., Wu, H., and Xu, B., 2020, “Balance between Bonding and Deposition during Fused Deposition Modeling of Polycarbonate and Acrylonitrile-butadiene-styrene Composites,” *Polym. Compos.*, **41**(1), pp. 60–72.
- [96] Bamiduro, O., 2019, “The Influence of Load Direction, Microstructure, Raster Orientation on the Quasi-Static Response of Fused Deposition Modeling ABS,” *Rapid Prototyping Journal*, **25**(3), pp. 462–472.
- [97] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., and Joy, D. C., 2017, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Springer.
- [98] Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C., and Newkirk, J. W., “POWDERS FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES: CHARACTERIZATION TECHNIQUES AND EFFECTS ON PART PROPERTIES,” *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1004–1030.
- [99] Wang, X., Li, Y., Xiong, J., Hodgson, P. D., and Wen, C. 'e, 2009, “Porous TiNbZr Alloy Scaffolds for Biomedical Applications,” *Acta Biomater.*, **5**(9), pp. 3616–3624.
- [100] Liu, J., Ren, B., Zhu, T., Yan, S., Zhang, X., Huo, W., Chen, Y., and Yang, J., 2018, “Enhanced Mechanical Properties and Decreased Thermal Conductivity of Porous Alumina Ceramics by Optimizing Pore Structure,” *Ceram. Int.*, **44**(11), pp. 13240–13246.
- [101] Torres-Sanchez, C., Al Mushref, F. R. A., Norrito, M., Yendall, K., Liu, Y., and Conway, P. P., 2017, “The Effect of Pore Size and Porosity on Mechanical Properties and Biological Response of Porous Titanium Scaffolds,” *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.*, **77**, pp. 219–228.
- [102] Kubo, K., and Pehlke, R. D., 1985, “Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification,” *MTB*, **16**(2), pp. 359–366.
- [103] Fang, Q. T., and Granger, D. A., 1989, “Porosity Formation in Modified and Unmodified A356 Alloy Castings,” *AFS Trans*, **97**(10), pp. 989–1000.
- [104] Roy, N., Samuel, A. M., and Samuel, F. H., 1996, “Porosity Formation in Al-9 Wt Pct Si-3 Wt Pct Cu Alloy Systems: Metallographic Observations,” *Metall. Mater. Trans. A*, **27**(2), pp. 415–429.
- [105] Han, C. D., and Yoo, H. J., 1981, “Studies on Structural Foam Processing. IV. Bubble Growth during Mold Filling,” *Polym Eng Sci*, **21**(9), pp. 518–533.
- [106] Jeong, H., 1997, “Effects of Voids on the Mechanical Strength and Ultrasonic Attenuation of Laminated Composites,” *J. Compos. Mater.*, **31**(3), pp. 276–292.
- [107] Chambers, A. R., Earl, J. S., Squires, C. A., and Suhot, M. A., 2006, “The Effect of Voids on the Flexural Fatigue Performance of Unidirectional Carbon Fibre Composites Developed for Wind Turbine Applications,” *Int. J. Fatigue*, **28**(10), pp. 1389–1398.
- [108] Anderson, T. L., 2005, *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, Taylor & Francis, FL, USA.
- [109] Kim, F. H., Moylan, S. P., Garboczi, E. J., and Slotwinski, J. A., 2017, “Investigation of Pore Structure in Cobalt Chrome Additively Manufactured Parts Using X-Ray Computed Tomography and Three-Dimensional Image Analysis,” *Addit. Manuf.*, **17**, pp. 23–38.

- [110] Cunningham, R., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J., and Rollett, A. D., 2017, “Synchrotron-Based X-Ray Microtomography Characterization of the Effect of Processing Variables on Porosity Formation in Laser Power-Bed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V,” *JOM*, **69**(3), pp. 479–484.
- [111] Sola, A., and Nouri, A., 2019, “Microstructural Porosity in Additive Manufacturing: The Formation and Detection of Pores in Metal Parts Fabricated by Powder Bed Fusion,” *Int Adv Manuf & Process*, **1**(3), p. 322.
- [112] Yang, Y., Chen, J., Peng, Z., Guo, Z., Tang, T., Hu, H., and Hu, Y., 2016, “X-Ray Quantitative Analysis on Spallation Response in High Purity Copper under Sweeping Detonation,” *Materials Science and Engineering: A*, **667**, pp. 54–60.
- [113] Simchi, A., and Danninger, H., 2004, “Effects of Porosity on Delamination Wear Behaviour of Sintered Plain Iron,” *Powder Metall.*, **47**(1), pp. 73–80.
- [114] Avramovic-Cingara, G., Saleh, C. A. R., Jain, M. K., and Wilkinson, D. S., 2009, “Void Nucleation and Growth in Dual-Phase Steel 600 during Uniaxial Tensile Testing,” *Metall. Mater. Trans. A*, **40**(13), p. 3117.
- [115] Pridemore, W. D., 2008, “Stress-Rupture Characterization in Nickel-Based Superalloy Gas Turbine Engine Components,” *J. Fail. Anal. Prev.*, **8**(3), pp. 281–288.
- [116] Salam, I., Tauqir, A., and Khan, A. Q., 2002, “Creep-Fatigue Failure of an Aero Engine Turbine Blades,” *Eng. Fail. Anal.*, **9**(3), pp. 335–347.
- [117] Versnyder, F. I., and Shank, M. E., 1970, “The Development of Columnar Grain and Single Crystal High Temperature Materials through Directional Solidification,” *Mater. Sci. Eng.*, **6**(4), pp. 213–247.
- [118] Sui, D., Cui, Z., Wang, R., Hao, S., and Han, Q., 2016, “Effect of Cooling Process on Porosity in the Aluminum Alloy Automotive Wheel During Low-Pressure Die Casting,” *Int. J. Metalcast.*, **10**(1), pp. 32–42.
- [119] Vanderesse, N., Maire, É., Chabod, A., and Buffière, J.-Y., 2011, “Microtomographic Study and Finite Element Analysis of the Porosity Harmfulness in a Cast Aluminium Alloy,” *Int. J. Fatigue*, **33**(12), pp. 1514–1525.
- [120] Wang, Y.-C., Li, D.-Y., Peng, Y.-H., and Zeng, X.-Q., 2007, “Numerical Simulation of Low Pressure Die Casting of Magnesium Wheel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **32**(3), pp. 257–264.
- [121] Rubin, A. M., and Jerina, K. L., 1993, “Evaluation of Porosity in Composite Aircraft Structures,” *Composites Engineering*, **3**(7-8), pp. 601–618.
- [122] Islam, M. A., and Farhat, Z. N., 2011, “The Influence of Porosity and Hot Isostatic Pressing Treatment on Wear Characteristics of Cast and P/M Aluminum Alloys,” *Wear*, **271**(9), pp. 1594–1601.
- [123] Chawla, N., and Deng, X., 2005, “Microstructure and Mechanical Behavior of Porous Sintered Steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, **390**(1), pp. 98–112.
- [124] Hancox, N. L., 1977, “The Effects of Flaws and Voids on the Shear Properties of CFRP,” *J. Mater. Sci.*, **12**(5), pp. 884–892.
- [125] Judd, N. C. W., and Wright, W. W., 1978, “Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites. An Approvisal,” *SAMPE J.*, pp. 10–14.
- [126] Lee, H., Kim, J.-H. J., Moon, J.-H., Kim, W.-W., and Seo, E.-A., 2019, “Correlation between Pore Characteristics and Tensile Bond Strength of Additive Manufactured Mortar Using X-Ray Computed Tomography,” *Constr Build Mater*, **226**, pp. 712–720.
- [127] Lambert, J., Chambers, A. R., Sinclair, I., and Spearing, S. M., 2012, “3D Damage Characterisation and the Role of Voids in the Fatigue of Wind Turbine Blade Materials,” *Compos. Sci. Technol.*, **72**(2), pp. 337–343.
- [128] Rodríguez-González, P., Fernández-Abia, A. I., Castro-Sastre, M. A., and Barreiro, J., 2020, “Heat Treatments for Improved Quality Binder Jetted Molds for Casting

- Aluminum Alloys,” *Additive Manufacturing*, **36**, p. 101524.
- [129] Cao, H., Hao, M., Shen, C., and Liang, P., 2017, “The Influence of Different Vacuum Degree on the Porosity and Mechanical Properties of Aluminum Die Casting,” *Vacuum*, **146**, pp. 278–281.
- [130] Tekmen, C., Ozdemir, I., Cocen, U., and Onel, K., 2003, “The Mechanical Response of Al–Si–Mg/SiCp Composite: Influence of Porosity,” *Materials Science and Engineering: A*, **360**(1), pp. 365–371.
- [131] Siddique, S., Imran, M., Rauer, M., Kaloudis, M., Wycisk, E., Emmelmann, C., and Walther, F., 2015, “Computed Tomography for Characterization of Fatigue Performance of Selective Laser Melted Parts,” *Mater. Des.*, **83**, pp. 661–669.
- [132] Stamopoulos, A. G., Tserpes, K. I., Prucha, P., and Vavrik, D., 2016, “Evaluation of Porosity Effects on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Unidirectional Laminates by X-Ray Computed Tomography and Mechanical Testing,” *J. Compos. Mater.*, **50**(15), pp. 2087–2098.
- [133] Liu, D.-M., 1997, “Influence of Porosity and Pore Size on the Compressive Strength of Porous Hydroxyapatite Ceramic,” *Ceram. Int.*, **23**(2), pp. 135–139.
- [134] Anand, S. S., Mohan, B., and Parthasarathy, T. R., 2011, “Effect of Slow Cooling in Reducing Pore Size in a Sintered Powder Metallurgical 6061 Aluminium Alloy,” *MSA*, **02**(07), pp. 870–877.
- [135] Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., and Prangnell, P. B., 2015, “XCT Analysis of the Influence of Melt Strategies on Defect Population in Ti–6Al–4V Components Manufactured by Selective Electron Beam Melting,” *Mater. Charact.*, **102**, pp. 47–61.
- [136] Zhu, H.-Y., Li, D.-H., Zhang, D.-X., Wu, B.-C., and Chen, Y.-Y., 2009, “Influence of Voids on Interlaminar Shear Strength of Carbon/epoxy Fabric Laminates,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **19**, pp. s470–s475.
- [137] David, E. C., and Zimmerman, R. W., 2011, “Elastic Moduli of Solids Containing Spheroidal Pores,” *Int. J. Eng. Sci.*, **49**(7), pp. 544–560.
- [138] du Plessis, A., le Roux, S. G., Booysen, G., and Els, J., 2016, “Directionality of Cavities and Porosity Formation in Powder-Bed Laser Additive Manufacturing of Metal Components Investigated Using X-Ray Tomography,” *3D Print Addit Manuf*, **3**(1), pp. 48–55.
- [139] Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T. B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R., and Murr, L. E., 2016, “Comparison of the Microstructures and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting,” *Mater. Des.*, **95**, pp. 21–31.
- [140] Saenz-Castillo, D., Martín, M. I., Calvo, S., Rodríguez-Lence, F., and Güemes, A., 2019, “Effect of Processing Parameters and Void Content on Mechanical Properties and NDI of Thermoplastic Composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **121**, pp. 308–320.
- [141] Stef, J., Poulon-Quintin, A., Redjaimia, A., Ghanbaja, J., Ferry, O., De Sousa, M., and Gouné, M., 2018, “Mechanism of Porosity Formation and Influence on Mechanical Properties in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Parts,” *Mater. Des.*, **156**, pp. 480–493.
- [142] Youngblood, G. E., Lewinsohn, C., Jones, R. H., and Kohyama, A., “Tensile Strength and Fracture Surface Characterization of Hi-Nicalone SiC @bers.”
- [143] Keles, Ö., Anderson, E. H., and Huynh, J., 2018, “Mechanical Reliability of Short Carbon Fiber Reinforced ABS Produced via Vibration Assisted Fused Deposition Modeling,” *Rapid Prototyping Journal*.
- [144] Stratasys, 2009, *ABSM30*, Stratasys Ltd.

- [145] Spierings, A. B., Schneider, M., and Eggenberger, R., 2011, “Comparison of Density Measurement Techniques for Additive Manufactured Metallic Parts,” *Rapid Prototyping Journal*, **17**(5), pp. 380–386.
- [146] Bruckschen, B., Seitz, H., Buzug, T. M., Tille, C., Leukers, B., and Irsen, S., 2005, “Comparing Different Porosity Measurement Methods for Characterisation of 3D Printed Bone Replacement Scaffolds,” *Biomedizinische Technik*, **50**.
- [147] Zou, C., Marrow, T. J., Reinhard, C., Li, B., Zhang, C., and Wang, S., 2016, “Porosity Characterization of Fiber-Reinforced Ceramic Matrix Composite Using Synchrotron X-Ray Computed Tomography,” *J. Instrum.*, **11**(03), p. C03052.
- [148] Müller, P., Hiller, J., Dai, Y., Andreasen, J. L., Hansen, H. N., and De Chiffre, L., 2014, “Estimation of Measurement Uncertainties in X-Ray Computed Tomography Metrology Using the Substitution Method,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **7**(3), pp. 222–232.
- [149] De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J.-P., Schmitt, R., and Weckenmann, A., 2014, “Industrial Applications of Computed Tomography,” *CIRP Ann.*, **63**(2), pp. 655–677.
- [150] Amrhein, S., Rauer, M., and Kaloudis, M., 2014, “Characterization of Computer Tomography Scanners Using the Probability of Detection Method,” *J. Nondestr. Eval.*, **33**(4), pp. 643–650.
- [151] du Plessis, A., and le Roux, S. G., 2018, “Standardized X-Ray Tomography Testing of Additively Manufactured Parts: A Round Robin Test,” *Additive Manufacturing*, **24**, pp. 125–136.
- [152] Zhang, X., Li, L., Zhang, F., Xi, X., Deng, L., and Yan, B., “Improving the Accuracy of CT Dimensional Metrology by a Novel Beam Hardening Correction Method,” *Measurement Science and Technology*, pp. 1–11.
- [153] Hiller, J., and Hornberger, P., 2016, “Measurement Accuracy in X-Ray Computed Tomography Metrology: Toward a Systematic Analysis of Interference Effects in Tomographic Imaging,” *Precis. Eng.*, **45**, pp. 18–32.
- [154] Kano, T., and Koseki, M., 2014, “CT Image Reconstruction Algorithm to Reduce Metal Artifact,” *The 15th International Conference on Biomedical Engineering*, Springer International Publishing, pp. 140–143.
- [155] “ASTM E1441 - 11 Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging” [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/E1441.htm>. [Accessed: 27-May-2019].
- [156] Carmignato, S., and Dewulf, W., 2017, *Industrial-X-Ray-Computed-Tomography.pdf*, Springer.
- [157] Czichos, H., Saito, T., and Smith, L. E., 2011, *Springer Handbook of Metrology and Testing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- [158] Swinehart, D. F., 1962, “The Beer-Lambert Law,” *J. Chem. Educ.*, **39**(7), p. 333.
- [159] Ricci, R. W., Ditzler, M., and Nestor, L. P., 1994, “Discovering the Beer-Lambert Law,” *J. Chem. Educ.*, **71**(11), p. 983.
- [160] Hoyle, B. S., 2005, “A Schema for Generic Process Tomography Sensors,” *IEEE Sens. J.*, **5**(2), pp. 117–124.
- [161] Cantatore, A., and Müller, P., 2011, “Introduction to Computed Tomography,” *CTU Mechanical Engineering*.
- [162] Yanaki, N. E., 1991, “METHOD AND STRUCTURE FOR OPTIMIZING RADIOGRAPHIC QUALITY BY CONTROLLING X-RAY TUBE VOLTAGE, CURRENT FOCAL SPOT SIZE AND EXPOSURE TIME,” Patent.
- [163] Salamon, M., Hanke, R., Krüger, P., Sukowski, F., Uhlmann, N., and Volland, V., 2008, “Comparison of Different Methods for Determining the Size of a Focal Spot of Microfocus X-Ray Tubes,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **591**(1), pp. 54–58.

- [164] Jackson, D. F., and Hawkes, D. J., 1981, "X-RAY ATTENUATION COEFFICIENTS OF ELEMENTS AND MIXTURES," *Physics Reports*, **3**(70), pp. 169–233.
- [165] Lumbroso, P., and Dick, C. E., 1987, "X-Ray Attenuation Properties of Radiographic Contrast Media," *Med. Phys.*, **14**(5), pp. 752–758.
- [166] Knoll, G. F., 2010, *Radiation Detection and Measurement*, Wiley.
- [167] Seeram, E., 2015, *Computed Tomography Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control*, Elsevier.
- [168] Brooks, R. A., and Di Chiro, G., 1975, "Theory of Image Reconstruction in Computed Tomography," *Radiology*, **117**(3 Pt 1), pp. 561–572.
- [169] Lewitt, R. M., and Matej, S., 2003, "Overview of Methods for Image Reconstruction from Projections in Emission Computed Tomography," *Proc. IEEE*, **91**(10), pp. 1588–1611.
- [170] Descour, M., and Dereniak, E., 1995, "Computed-Tomography Imaging Spectrometer: Experimental Calibration and Reconstruction Results," *Appl. Opt.*, **34**(22), pp. 4817–4826.
- [171] Lu, X., Gao, W., Zuo, J.-M., and Yuan, J., 2015, "Atomic Resolution Tomography Reconstruction of Tilt Series Based on a GPU Accelerated Hybrid Input-Output Algorithm Using Polar Fourier Transform," *Ultramicroscopy*, **149**, pp. 64–73.
- [172] Drebin, R. A., Carpenter, L., and Hanrahan, P., 1988, "Volume Rendering," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, **22**(4), pp. 65–74.
- [173] Nagabhushana, S., 2005, *Computer Vision and Image Processing*, New Age International.
- [174] Sezgin M., S. B., 2004, "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation," *J. Electron. Imaging*, **13**(1), pp. 146–165.
- [175] Pan Z., L. J., 2007, "A Bayes-Based Region-Growing Algorithm for Medical Image Segmentation," *Comput. Sci. Eng.*, **9**(4), pp. 32–38.
- [176] Lifton, J. J., and Liu, T., 2020, "Evaluation of the Standard Measurement Uncertainty due to the ISO50 Surface Determination Method for Dimensional Computed Tomography," *Precis. Eng.*, **61**, pp. 82–92.
- [177] He, L., Ren, X., Gao, Q., Zhao, X., Yao, B., and Chao, Y., 2017, "The Connected-Component Labeling Problem: A Review of State-of-the-Art Algorithms," *Pattern Recognit.*, **70**, pp. 25–43.
- [178] Sophian, A., Tian, G. Y., Taylor, D., and Rudlin, J., 2003, "A Feature Extraction Technique Based on Principal Component Analysis for Pulsed Eddy Current NDT," *NDT E Int.*, **36**(1), pp. 37–41.
- [179] Liu, X., Wang, D., Liu, F., and Bai, J., 2010, "Principal Component Analysis of Dynamic Fluorescence Diffuse Optical Tomography Images," *Opt. Express*, **18**(6), pp. 6300–6314.
- [180] Chen, S., Chen, H., Li, S., Li, J., and Li, S., 2013, "Evaluation Measurement of Accuracy of Industrial Computed Tomography," *2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application*, pp. 177–180.
- [181] Villarraga-Gómez, H., Lee, C., and Smith, S. T., 2018, "Dimensional Metrology with X-Ray CT: A Comparison with CMM Measurements on Internal Features and Compliant Structures," *Precis. Eng.*, **51**, pp. 291–307.
- [182] Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybala, B., and Ziolkowski, G., 2014, "Comparison of Different Method of Measurement Geometry Using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D," *Procedia Engineering*, **69**, pp. 255–262.
- [183] Shah, P., Racasan, R., and Bills, P., 2016, "Comparison of Different Additive Manufacturing Methods Using Computed Tomography," *Case Studies in*

- Nondestructive Testing and Evaluation, **6**, pp. 69–78.
- [184] Keleş, Ö., Anderson, E. H., Huynh, J., Gelb, J., Freund, J., and Karakoç, A., 2018, “Stochastic Fracture of Additively Manufactured Porous Composites,” *Sci. Rep.*, **8**(1), p. 15437.
- [185] Fitzpatrick, J., 2013, “12 - Powder Properties in Food Production Systems,” *Handbook of Food Powders*, B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, and P. Schuck, eds., Woodhead Publishing, pp. 285–308.
- [186] Wadell, H., 1935, “Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles,” *J. Geol.*, **43**(3), pp. 250–280.
- [187] Ziemian, C. W., Cipoletti, D. E., Ziemian, S. N., Okwara, M. N., and Haile, K. V., 2014, “Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing.”
- [188] Monzón, M. D., Ortega, Z., Martínez, A., and Ortega, F., 2015, *Standardization in Additive Manufacturing: Activities Carried out by International Organizations and Projects*, *Int J Adv Manuf Technol*.
- [189] ASTM International, 2014, *Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes*, F3122 - 14, West Conshohocken, PA.
- [190] ASTM International, 2014, *Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials*, F3091 / F3091M-14, West Conshohocken, PA.
- [191] ASTM International, 2016, *Standard Classification System for and Basis for Specification for Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) Plastics and Alloys Molding and Extrusion Materials*, D4673-16, West Conshohocken, PA.
- [192] ASTM International, 2010, *ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, D638, PA, USA.
- [193] ASTM International, 2016, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, E8 / E8M, West Conshohocken, PA.
- [194] “Acerca de La Máquina de Prototipado En 3D Fortus 900mc | Stratasys” [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/production-series/fortus-900mc>. [Accessed: 21-Sep-2018].
- [195] Hernandez-Contreras, A., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Moock, V., and Siller, H. R., 2020, “Extended CT Void Analysis in FDM Additive Manufacturing Components,” *Materials*, **13**(17).
- [196] “XT H 225 ST” [Online]. Available: <https://www.nikonmetrology.com/es/product/xt-h-225-st>. [Accessed: 21-Sep-2018].
- [197] du Plessis, A., le Roux, S. G., and Steyn, F., 2015, “X-Ray Computed Tomography of Consumer-Grade 3D-Printed Parts,” *3D Print Addit Manuf*, **2**(4), pp. 190–195.
- [198] Rinaldi, M., Ghidini, T., Cecchini, F., Brandao, A., and Nanni, F., 2018, “Additive Layer Manufacturing of Poly (ether Ether Ketone) via FDM,” *Composites Part B*, **145**, pp. 162–172.
- [199] Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., and Renaud, J. E., 2001, “Mechanical Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Fused Deposition Materials. Experimental Investigation,” *Rapid Prototyping Journal*, **7**(3), pp. 148–158.
- [200] Wadell, H., 1933, “Sphericity and Roundness of Rock Particles,” *J. Geol.*, **41**(3), pp. 310–331.
- [201] Catacosinos, P., 1965, “TABLES FOR THE DETERMINATION OF SPHERICITY AND SHAPE OF ROCK PARTICLES,” *JOURNAL OF SEDIMENTARY PETROLOGY*, **35**(2), pp. 354–363.
- [202] Yang, Y., Jixiong, C., Zhaoliang, G., Tiegang, T., Haibo, H., and Yanan, F., 2017, “3-D Characterization of Incipient Spallation Response in Cylindrical Copper under

- Sweeping Detonation,” *J. Mater. Res.*, **32**(8), pp. 1499–1505.
- [203] Bayramoglu, N., and Alatan, A. A., 2016, “Comparison of 3D Local and Global Descriptors for Similarity Retrieval of Range Data,” *Neurocomputing*, **184**, pp. 13–27.
- [204] Arthurs, B., Bull, D. J., Arumugam, V., Chambers, A. R., and Santulli, C., 2015, “Porosity Effect on Residual Flexural Strength Following Low Energy Impact of Carbon Fibre Composites,” *Polym. Polym. Compos.*, **23**(4), pp. 205–212.
- [205] JF Rudy, E. J. R., 1970, “Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds,” *Weld. J.*, **49**, pp. 322–336.
- [206] Gean A., Westgate S. A., Kucza, J. C., Ehrstrom J. C., 1999, “Static and Fatigue Behavior of Spot-Welded 5182-0 Aluminum Alloy Sheet,” *Welding journal*, **78**(3), pp. 80–86.
- [207] Guessasma, S., Nouri, H., and Roger, F., 2017, “Microstructural and Mechanical Implications of Microscaled Assembly in Droplet-Based Multi-Material Additive Manufacturing,” *Polymers*, **9**(8), p. 372.
- [208] Ahmed, M., Islam, Vanhooose, J., and Rahman, M., 2017, “Comparisons of Elasticity Moduli of Different Specimens Made Through Three Dimensional Printing,” *3D Printing and Additive Manufacturing*, **4**(2), pp. 105–109.
- [209] Dawoud, M., Taha, I., and Ebeid, S. J., 2016, “Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques,” *J. Manuf. Process.*, **21**, pp. 39–45.
- [210] Tane, M., Ichitsubo, T., Nakajima, H., Hyun, S. K., and Hirao, M., 2004, “Elastic Properties of Lotus-Type Porous Iron: Acoustic Measurement and Extended Effective-Mean-Field Theory,” *Acta Mater.*, **52**(17), pp. 5195–5201.
- [211] Altman, D. G., and Bland, J. M., 1994, “Diagnostic Tests. 1: Sensitivity and Specificity,” *BMJ*, **308**(6943), p. 1552.
- [212] Yang, B. J., Ha, S. K., Pyo, S. H., and Lee, H. K., 2014, “Mechanical Characteristics and Strengthening Effectiveness of Random-Chopped FRP Composites Containing Air Voids,” *Composites Part B*, **62**, pp. 159–166.
- [213] Mehdikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I., and Lomov, S. V., 2019, “Voids in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review on Their Formation, Characteristics, and Effects on Mechanical Performance,” *J. Compos. Mater.*, **53**(12), pp. 1579–1669.
- [214] Nakajima, H., 2007, “Fabrication, Properties and Application of Porous Metals with Directional Pores,” *Prog. Mater. Sci.*, **52**(7), pp. 1091–1173.
- [215] Ichitsubo, T., Tane, M., Ogi, H., Hirao, M., Ikeda, T., and Nakajima, H., 2002, “Anisotropic Elastic Constants of Lotus-Type Porous Copper: Measurements and Micromechanics Modeling,” *Acta Mater.*, **50**(16), pp. 4105–4115.
- [216] Tane, M., Ichitsubo, T., Hyun, S. K., and Nakajima, H., 2005, “Anisotropic Yield Behavior of Lotus-Type Porous Iron: Measurements and Micromechanical Mean-Field Analysis,” *J. Mater. Res.*, **20**(1), pp. 135–143.
- [217] Hyun, S.-K., Ikeda, T., and Nakajima, H., 2004, “Fabrication of Lotus-Type Porous Iron and Its Mechanical Properties,” *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **5**(1-2), pp. 201–205.
- [218] Romano, S., Brandão, A., Gumpinger, J., Gschweidl, M., and Beretta, S., 2017, “Qualification of AM Parts: Extreme Value Statistics Applied to Tomographic Measurements,” *Mater. Des.*, **131**, pp. 32–48.
- [219] Coogan, T. J., and Owen, K. D., 2017, “Bond and Part Strength in Fused Deposition Modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, **23**(2), pp. 414–422.
- [220] Coogan, T. J., and Kazmer, D. O., 2017, “Healing Simulation for Bond Strength Prediction of FDM,” *Rapid Prototyping Journal*, **23**(3), pp. 551–561.

# Productos académicos

## Artículo de revista

Hernandez-Contreras, A.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Moock, V.; Siller, H.R. Extended CT Void Analysis in FDM Additive Manufacturing Components. *Materials* 2020, 13, 3831.

## Artículos de congreso

Ruiz-Huerta, L.; Hernandez-Contreras, A.; Caballero-Ruiz, A.; Almanza-Arjona Y. Computed Tomography aided porosity comparison between ABS Filaments and FDM Manufactured. *Proceedings - ASPE/euspen 2016 Summer Topical Meeting: Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing 2016*, 66 - 71.

Ruiz-Huerta, L.; Hernandez-Contreras, A.; Caballero-Ruiz, A.; Almanza-Arjona Y.; Rojas-Aguirre Y. Comparación de la porosidad entre diferentes procesos de manufactura aditiva evaluada mediante tomografía computarizada por rayos X. *2do Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas 2016*, 78 - 83.

Almanza-Arjona Y.; Caballero-Ruiz, A.; Castro-Espinoza H. Hernandez-Contreras, A.; Gómez C. Caracterización de porosidad en piezas fabricadas mediante moldeo por compresión. *CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 2018*, 24, 64 - 72.