

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE PROBETAS DE ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) PREPARADAS CON DOS CONDICIONES DE IMPRESIÓN 3D Y SIN EXPOSICIÓN A UN AMBIENTE DE DEGRADACIÓN SALINO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

JOAQUÍN SANTIAGO PAZMIÑO NARANJO

DIRECTOR: ING. PATRICIA ISABEL PONTÓN BRAVO PhD.

DMQ, septiembre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, JOAQUÍN SANTIAGO PAZMIÑO NARANJO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JOAQUÍN SANTIAGO PAZMIÑO NARANJO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOAQUÍN SANTIAGO PAZMIÑO NARANJO, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIA ISABEL PONTÓN BRAVO Ph.D.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOAQUÍN SANTIAGO PAZMIÑO NARANJO

ING. PATRICIA ISABEL PONTÓN BRAVO Ph.D.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a mi Dios todo poderoso y a la Virgencita de El Quinche, por darme la salud y sabiduría necesaria para desarrollar y culminar mis estudios.

A mi madre Yolanda y a mi padre Manuel, quienes han sido mi ejemplo de trabajo duro, dedicación y perseverancia.

A mis hermanos, Pablo y Elena por su apoyo en todas mis etapas académicas, desde sus inicios.

A mis sobrinos, Pablo y Amèlie, a quienes al igual que su padre, espero ser algún día un ejemplo.

A mi buen y primer amigo de la EPN, Josué, con quién compartimos todos los años de vida universitaria.

Y finalmente a mi querida abuela, María Elena, quien aún me acompaña y ha sido una inspiración cumplir su sueño de verme profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios y a la Virgen de El Quinche, por haberme cuidado desde el primer día que pisé la Escuela Politécnica Nacional.

A mis amados padres, Manuel Antonio e Inés Yolanda, por todo su apoyo, dedicación, cariño, exigencia y sobre todo por su arduo esfuerzo para que no me faltara recurso alguno durante mi formación académica. ¡Gracias Papá! ¡Gracias Mamá!

A mi querida hermana Elena Alexandra, por su inmenso cariño y sobre todo por su apoyo durante mi formación profesional, siendo un ejemplo de que puedo mejorar y seguir adelante, siempre superándome a mí mismo. ¡Gracias ñaña!

A mi hermano Pablo Daniel, por haber sido el ejemplo principal y una de las razones para decidir mi alma máter, además de ser un apoyo y uno de mis consejeros de vida más importantes. ¡Gracias ñaño!

A mis mejores amigos, quienes nunca me dejaron solo durante mi vida en la EPN, tanto académica como emocionalmente, les estaré eternamente agradecido por los años que compartieron junto a mí, por todas y cada una de las horas que pasamos estudiando, disfrutando, dando exámenes, haciendo deberes y trabajos, compartiendo en el deporte, viviendo nuestra vida universitaria. Josué, Jordy, Marcelo y Mishell. ¡Muchas gracias, amigos míos!

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
INDICE DE FIGURAS.....	VII
INDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Ácido poliláctico (PLA).....	3
1.5 Impresión 3D.....	6
1.5.1 Descripción del proceso de manufactura aditiva o impresión 3D	6
1.5.2 Modelado por Deposición de material Fundido (FDM).....	7
1.5.3 Tenacidad a la fractura	8
1.5.4 Importancia de la tenacidad a la fractura	13
1.5.5 Tenacidad a la fractura – Modo I – II – III.....	14
1.5.6 Métodos de inserción de pre-grietas.....	16
1.5.7 Factores de impresión 3D para probetas de tenacidad a la fractura	17
1.5.8 Importancia de la evaluación de la tenacidad a la fractura en elementos impresos en 3D.....	18
1.5.9 Estudio de casos de evaluación de tenacidad a la fractura de PLA obtenido con distintas condiciones de impresión 3D	18
2 METODOLOGÍA	24
2.1 Materiales y equipos	24
2.1.1 Filamento de (PLA).....	24
2.1.2 Impresora 3D – ENDER 3 PRO	25
2.1.3 Mototool Truper	26

2.1.4	Herramienta de sujeción de cuchillas	27
2.1.5	Cuchillas de afeitar	27
2.1.6	Microscopio OLYMPUS	28
2.2	Preparación de probetas de PLA	29
2.2.1	Modelado mediante diseño asistido por computadora (CAD) de probetas ..	29
2.2.2	Rebanado del archivo CAD en Slicer.....	30
	**Las densidades de relleno seleccionadas fueron establecidas con base en la literatura, Tabla 1.1 de la sección 1.5.8	31
2.3	Definición de dos condiciones de impresión 3D para ensayos de tenacidad a la fractura	31
2.3.1	Impresión de probetas de PLA para ensayos tenacidad a la fractura	32
2.3.2	Definición de un método para la introducción de la pre-grieta en las probetas de PLA impresas en 3D	36
2.3.3	Evaluación de la tenacidad a la fractura de las probetas de PLA.....	38
2.3.4	Determinación de tenacidad a la fractura.....	40
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.1	Impresión de probetas para ensayos de tenacidad a la fractura	42
3.2	Definición de método y proceso de introducción de la pre-grieta en probetas de tenacidad a la fractura.....	43
3.3	Evaluación de la tenacidad a la fractura de las probetas de PLA - Cálculo de <i>KIC</i> E	44
3.4	Resultados visuales de ensayos de tenacidad a la fractura (esparcimiento de grieta).....	46
3.5	Relación Carga – Desplazamiento en probetas ensayadas.....	47
3.6	Análisis de resultados de KIC	50
3.7	Conclusiones.....	53
3.8	Recomendaciones.....	54
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
5	ANEXOS.....	59
	ANEXO I Plano de probetas.....	59
	ANEXO I. macrografías probetas 80% concéntrico.....	60
	ANEXO II macrografías probetas 80% giroide	62
	ANEXO III macrografías probetas 60% giroide	64
	ANEXO III macrografías probetas 60% concéntrico.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Métodos de preparación de PLA	3
Figura 1. 2 Estructura química del PLA	4
Figura 1. 3 Fundamentos de la tecnología FDM	8
Figura 1. 4 Representación de a) grietas en el interior de una placa infinita, b) grieta en una arista de una placa semi-infinita	9
Figura 1. 5 (a) Geometría de grietas internas (b) Amplificación del esfuerzo en los bordes de la grieta.....	10
Figura 1. 6 Desplazamiento superficial de una fractura modo I.....	14
Figura 1. 7 Desplazamiento superficial de una fractura tipo II	15
Figura 1. 8 Desplazamiento superficial de una fractura tipo III	15
Figura 1. 9 Mecanismo para inserción de pre-grietas en probetas	16
Figura 1. 10 Inserción manual de pre-grieta.....	17
Figura 1. 11 Ejemplos de patrones de relleno en impresión 3D	18
Figura 1. 12 Propagación de grietas en el trabajo de Gardan et al.	19
Figura 1. 13 Estudio de propagación de grieta a contraluz	20
Figura 1. 14 Macrografía de propagación de grieta en el estudio de Song	20
Figura 1. 15 Elementos de prueba en el estudio de Silva	21
Figura 2. 1 Metodología de trabajo	24
Figura 2. 2 Filamento 3D (ejemplo)	24
Figura 2. 3 Impresora Ender 3 Pro	25
Figura 2. 4 Mototool trooper (imagen referencial)	26
Figura 2. 5 Herramienta de sujeción de hojas de afeitar (imagen referencial)	27
Figura 2. 6 Cuchillas de afeitar ASTRA (imagen referencial)	28
Figura 2. 7 Microscopio OLYMPUS.	28
Figura 2. 8 Probetas según ASTM D5045 – Diseñadas en Autodesk Inventor.....	29
Figura 2. 9 Probetas según ASTM D5045-14 diseñadas en Autodesk Inventor (boceto tridimensional).	29
Figura 2. 10 Software "Slicer" utilizado para el rebanado CAD.	30
Figura 2. 11 Impresión 3D en patrón giroide (Imagen referencial)	32
Figura 2. 12 Imagen referencial de patrón de impresión 3D concéntrico	32
Figura 2. 13 Configuración en slicer Ultimaker Cura.	33
Figura 2. 14 Impresión de probetas en lote.	33
Figura 2. 15 Esquema de mesa de trabajo para impresora 3D.	34

Figura 2. 16 Esquema de apoyos de mesa de trabajo.	34
Figura 2. 17 Tipos de apoyos inferiores de mesa de trabajo.	35
Figura 2. 18 Configuración y distribución de apoyos inferiores de mesa de trabajo.	35
Figura 2. 19 Mecanismo para inserción de pre-grieta.	36
Figura 2. 20 Pruebas preliminares en mecanismo de impacto para generar pre-grieta....	37
Figura 2. 21 Método manual para inserción de pre-grieta.	37
Figura 2. 22 Probetas señaladas listas para inserción de pre-grieta.	38
Figura 2. 23 Dimensiones de probetas según ASTM D5045-14.	38
Figura 2. 24 Ubicación de probetas en máquina universal de ensayos.	39
Figura 2. 25 Probeta post-ensayo de tenacidad a la fractura.	39
Figura 2. 26 Ejemplo de gráfica carga vs desplazamiento.	40
Figura 3. 1 Ejemplo de macrografía 80CC.	46
Figura 3. 2 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 60CC.	48
Figura 3. 3 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 60GY.	48
Figura 3. 4 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 80CC.	49
Figura 3. 5 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 80GY.	50
Figura 3. 6 Gráfico comparativo de tenacidad a la fractura (densidad/patrón de relleno).	52
Figura B. 1 Macrografía 8C1.	60
Figura B. 2 Macrografía 8C2.	60
Figura B. 3 Macrografía 8C3.	61
Figura B. 4 Macrografía 8C4.	61
Figura B. 5 Macrografía 8G1.	62
Figura B. 6 Macrografía 8G2.	62
Figura B. 7 Macrografía 8G3.	63
Figura B. 8 Macrografía 8G4.	63
Figura B. 9 Macrografía 6G1.	64
Figura B. 10 Macrografía 6G2.	64
Figura B. 11 Macrografía 6G3.	65
Figura B. 12 Macrografía 6G4.	65
Figura B. 13 Macrografía 6C1.	66
Figura B. 14 Macrografía 6C2.	66
Figura B. 15 Macrografía 6C3.	67
Figura B. 16 Macrografía 6C4.	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Valores de tenacidad a la fractura de distintos materiales [25]	13
Tabla 1. 2 Tabla comparativa de estudios.....	23
Tabla 2. 1 Propiedades filamento Artillery Blanco.	25
Tabla 2. 2 Características impresora 3D Ender 3 Pro	26
Tabla 2. 3 Características Mototool Trooper	27
Tabla 2. 4 Características Microscopio Metalográfico	28
Tabla 2. 5 Parámetros de impresión 3D.....	30
Tabla 3. 1 Codificación de probetas para los resultados de tenacidad a la fractura.	44
Tabla 3. 2 Resultados tabulados según la norma ASTM D5045-14.	45

RESUMEN

Este trabajo evaluó la tenacidad del PLA impreso en 3D, sin tratamientos térmicos ni exposición a ambientes de degradación. De esta forma, fueron definidas dos condiciones de impresión 3D apropiadas para la manufactura de probetas de tenacidad a la fractura. Dichas condiciones comprenden: dos densidades de relleno (60 y 80 %) y dos patrones de impresión (concéntrico y giroide), mismas que fueron seleccionadas mediante una revisión bibliográfica. Otros factores de impresión, tales como: temperaturas de boquilla de impresión, velocidad de impresión, condición de adhesión a la base de impresión, se establecieron como parámetros. Posteriormente, se fabricaron probetas de tenacidad a la fractura, tipo SEN B (Single Edge notch bending, por sus siglas en inglés), con el tamaño y geometría descritas en la ASTM D5045-14. Debido a que estas probetas poseen un entalle en donde se debe introducir una pre-grieta, se realizó una revisión bibliográfica acompañada de pruebas experimentales para definir el método más idóneo para cumplir este requisito de las probetas. Finalmente, se procedió a ensayar las probetas con base en la norma indicada anteriormente, en modo I de fractura, con lo que se estableció la condición de impresión 3D que permitió obtener el mayor valor de la tenacidad a la fractura de las probetas preparadas. De los resultados obtenidos en este trabajo, se concluye que el patrón de relleno giroide permite obtener resultados superiores de tenacidad a la fractura que el patrón concéntrico, independientemente de la densidad de relleno. Una densidad de relleno del 60 % presenta resultados similares de tenacidad a la fractura que la densidad del 80%, con el consecuente ahorro de material, tanto para el patrón de relleno concéntrico y giroide.

PALABRAS CLAVE: PLA, impresión 3D, condiciones de impresión, pre-grieta.

ABSTRACT

This work evaluated the fracture toughness of 3D printed polylactic acid (PLA), without exposure to a degradation environment. In this way, two appropriate 3D printing conditions for the manufacture of fracture toughness specimens were defined. The afore mentioned conditions comprise: two infill densities (60 y 80 %) and two infill patterns (concentric and gyroid), which were selected based on the literature. Other printing patterns like the print nozzle temperatures, printing speed, adhesion condition to the printing base, were established as parameters. Subsequently, fracture toughness specimens were manufactured, type SEN B (Single Edge notch bending), with the size and geometry described in the ASTM D5045-14 standard. Since these specimens have a notch where a pre-crack must be introduced, a literature review was carried out that allowed defining the method for fulfillment this requirement. Finally, the specimens were tested based on the previously indicated standard, in fracture mode I, thus establishing the effect of two 3D printing conditions on the fracture toughness of the prepared specimens. From the results obtained in this work, the gyroid pattern allowed obtaining values of fracture toughness higher than the concentric counterpart, independent of the infill density. In the case of an infill density of 60 %, the results of fracture toughness were similar to those obtained when a density of 80 % was used, implying a saving of material, for both concentric and gyroid patterns.

KEYWORDS: PLA, 3D printing manufacturing, printing conditions, pre-crack.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El proceso manufactura aditiva o impresión 3D, gracias a la posibilidad de creación de elementos con geometrías complejas, en comparación otros métodos de manufactura considerados tradicionales, ha despertado la atención de sectores industriales y académicos. Esta tecnología se basa en el modelado por deposición capa por capa de material fundido (FDM, por sus siglas en inglés), y entre sus principales aplicaciones destaca la creación de prototipos dentro de las industrias aeroespacial, marítima, automotriz, biomédica, etc [1].

El proceso de manufactura FDM consta de varios elementos. Para comenzar se requiere de una plataforma de construcción (impresora 3D), un material termoplástico adecuado según las aplicaciones o estudios, un sistema de extrusión que permita el traslado del material (filamento) hacia un sistema de calentamiento y cambio de sección (boquilla), además de un sistema de transmisión de movimiento que, por lo general está compuesto por servomotores controlados por una placa electrónica, poleas y correas con tamaños variables dependiendo de las dimensiones máximas de fabricación de la máquina. Se debe considerar además que, dependiendo del material utilizado, se puede requerir de una superficie de trabajo, la cual podrá ser móvil, fija, con capacidad de cambio de temperatura, flexible o de un material rígido [2].

Entre los materiales más utilizados para impresión 3D, destaca el ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), material obtenido de materia orgánica derivada principalmente de la caña de azúcar. La versatilidad, costo y facilidad de obtención de este material, lo hace idóneo para distintas aplicaciones dentro de los campos mencionados. Dentro del presente trabajo, se buscó contribuir a la caracterización de este material con la finalidad de evaluar su comportamiento mecánico e integridad estructural para distintas aplicaciones, considerando que la presencia de grietas en componentes mecánicos fabricados con polímeros es inevitable [3], [4].

Mediante revisión bibliográfica, se definieron dos condiciones idóneas de impresión 3D. Para ello, en primer lugar, se identificaron los factores con mayor influencia dentro de este proceso, mismos que se detallan a continuación: temperatura de boquilla, patrón y densidad de relleno, velocidad de impresión, condición de adhesión a la superficie de impresión, entre los diferentes factores mencionados, para este estudio, se decidió variar únicamente i) la densidad de relleno y ii) el patrón de impresión, factores adicionales fueron definidos mediante revisión bibliográfica [5].

Por lo tanto, las condiciones de impresión consistieron en combinaciones de densidades de relleno de 60 y 80%, con patrones de relleno concéntrico y giroide.

Con estas condiciones, se procedió a fabricar probetas para realizar los ensayos correspondientes de tenacidad a la fractura y un análisis comparativo entre las combinaciones establecidas para este trabajo. Es importante destacar que, dentro de aplicaciones marítimas, las condiciones de impresión 3D que poseen densidades de relleno menores al 100 % podrían generar como beneficio principal el ahorro de material.

Dentro de la evaluación de tenacidad a la fractura, se consideró como fundamento a la norma ASTM D5045-14, además de un tipo de probeta SEN B (Single Edge Notch Bending, por sus siglas en inglés), considerando las dimensiones establecidas en la norma. Un requisito para la realización de este ensayo es que las probetas posean un entalle con una pre-grieta. Para ello, mediante revisión bibliográfica, se estableció un mecanismo para introducir dicha pre-grieta.

1.1 Objetivo general

Evaluar la tenacidad a la fractura de probetas de PLA preparadas con dos condiciones de impresión 3D, sin exposición a un ambiente de degradación salino.

1.2 Objetivos específicos

- Definir dos condiciones de impresión 3D apropiadas para la manufactura de probetas de ácido poliláctico para ensayos de tenacidad a la fractura mediante una revisión bibliográfica.
- Impresión de probetas de PLA para ensayos tenacidad a la fractura utilizando las dos condiciones de impresión 3D seleccionadas.
- Definir un método para la introducción de la pre-grieta en las probetas de PLA impresas en 3D.
- Evaluar el efecto de las dos condiciones de impresión 3D seleccionadas en la tenacidad a la fractura de las probetas de PLA mediante ensayos descritos en la norma ASTM D5045-14.

1.3 Alcance

El presente Trabajo de Integración Curricular (TIC) tuvo como objetivo la evaluación de la tenacidad a la fractura del PLA impreso en 3D, previo a la exposición a un ambiente de degradación. De esta forma, se definieron dos condiciones de impresión 3D apropiadas para la manufactura de probetas de tenacidad a la fractura, conforme lo especificado antes. Posteriormente, se fabricaron probetas de tenacidad a la fractura, tipo SEN B, con el tamaño y geometría descritas en la norma ASTM D5045-14. Debido a que estas probetas poseen un entalle en donde se debe introducir una pre-grieta, se realizó una revisión bibliográfica para definir el método que permitirá cumplir con este requisito. Finalmente, se procedió a ensayar las probetas con base en la norma indicada anteriormente, en modo I de fractura, para establecer el efecto de las dos condiciones de impresión 3D en la tenacidad a la fractura de las probetas preparadas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Ácido poliláctico (PLA)

El PLA es un polímero biodegradable y reutilizable derivado del ácido láctico (ácido 2-hidroxi propionico), sintetizado en 1932 por Wallace Carothers. Este material es obtenido de los residuos de fermentación de distintos materiales orgánicos que contengan carbohidratos, tales como maíz, arroz, etc. [6].

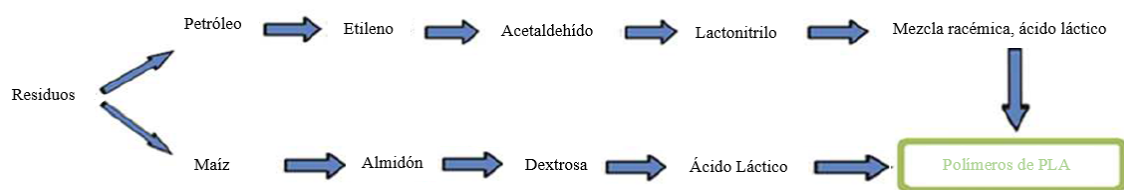


Figura 1. 1 Métodos de preparación de PLA [1]

En la Figura 1.1 se aprecia una explicación del método simplificado de obtención de PLA a partir de residuos orgánicos, conjuntamente con la comparación de su obtención utilizando como materia prima el petróleo [6]. En la Figura 1.2 de muestra la estructura del PLA.

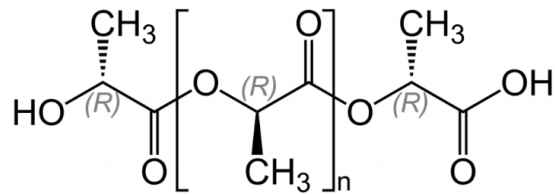


Figura 1. 2 Estructura química del PLA [2]

Dentro de las aplicaciones para este polímero destacan las siguientes:

- Aplicaciones domésticas:

Tejidos textiles: Las fibras de PLA pueden ser utilizadas para la fabricación de tejidos para confección de prendas de vestir, como sustitución al poliéster convencional [7].

Fabricación de botellas: El PLA puede ser utilizado para la fabricación de botellas, generalmente aptas dentro de condiciones de temperatura ligeramente superiores a las del ambiente, para esta aplicación debe considerarse que la deformación del PLA comienza desde un rango de 50 a 60°C [8].

Vasos y utensilios para alimentos: Es una de las aplicaciones más importantes en virtud de la necesidad de reducción del volumen de productos no degradables de un solo uso. El PLA se presenta como una excelente alternativa considerando que posee buenas propiedades de barrera contra aceite, grasa y humedad, además de la posibilidad de adaptación al sistema de inyección de polímeros [9].

Tarjetas y cartas: La posibilidad de fabricación de tarjetas de trabajo, canje o crédito, con el uso de PLA, presenta una alternativa igual de durable como polietileno, vinil o policloruro de vinilo, muchas de estas tarjetas (canje en especial) suelen ser de un solo uso, así que la posibilidad del empleo de PLA es una alternativa amigable con el medio ambiente [7].

- Aplicaciones en agricultura e ingeniería:

Material de drenaje: Para terreno suave, el PLA presenta una excelente permeabilidad. Su biodegradabilidad permite el retorno del PLA a la naturaleza sin daño alguno, es decir, una vez cumplido su ciclo no contaminará el suelo como cualquier otro material [7].

Industria automotriz: Esta industria utiliza grandes cantidades de polímeros plásticos, en especial polietileno, PVC (Policloruro de Vinilo) y ABS (Acrlonitrilo Butadieno Estireno), todos derivados de combustibles fósiles no renovables. Los niveles de plástico reciclado que se utiliza no superan el 30% (en peso), todo lo demás son polímeros denominados "vírgenes". Cuando un vehículo es desechado, tan solo se puede reciclar el 20% del

plástico presente, el PLA es un material fabricado con material residual sin afectación al medio ambiente que está siendo cada vez más utilizado en esta industria, como reemplazo para todo lo derivado del petróleo [10].

Materiales de construcción: Gran parte de los productos empleados dentro del sector de la construcción en base a PLA están relacionados con los suelos, estos productos incluyen alfombras, piso laminado y papel tapiz. Para estas aplicaciones el PLA busca ser un sustituto al PVC, material dominante para esta industria [11].

Modelado: Dentro de la industria, la posibilidad de prototipado por manufactura aditiva o inyección de plástico permite la generación de prototipos previos a fabricaciones masivas, generando mucho ahorro a las empresas y evitando el desperdicio de materiales poliméricos derivados del nylon, dentro de aplicaciones de manufactura por eliminación de material [12].

- Aplicaciones biomédicas:

Implantes quirúrgicos: El PLA es compatible con el tejido vivo, pero se debe considerar la compatibilidad y capacidad de los mamíferos de producir enzimas que podrían asimilar los componentes del material. PLA es utilizado para la fabricación de tornillos, pines, soportes, con la finalidad de proveer una estructura temporal durante el crecimiento del tejido, con una eventual desaparición después de un corto periodo de tiempo [13].

- Aplicaciones Marítimas

El sector marítimo requiere de tecnología y materiales compatibles con la tecnología actual, además de que los materiales empleados deberán tener la durabilidad requerida para resistir las condiciones a las que pueda estar sometido el elemento fabricado. El PLA posee propiedades que permiten su alta resistencia en ambientes de degradación por agua salada y a su vez por microorganismos que se encuentran presentes en playas y puertos, entre los usos principales que se ha dado al PLA destaca la fabricación de repuestos y partes de conjunto, con lo que se genera un enorme ahorro y se evita el desperdicio de material que, generalmente es arrojado al mar, generando aún más contaminación [14].

Entre otras aplicaciones, elementos de PLA impresos en 3D pueden ser utilizados para análisis hidrodinámico, imitando las distintas formas que poseen organismos marinos para así, estudiar su forma de desplazamiento y comportamiento en relación a las grandes fuerzas hidrostáticas a las que están sometidos para obtener datos sobre sus rutas de alimentación y crecimiento promedio, siendo así una aplicación que permite la conservación de especies en peligro [15].

Considerando su amplia versatilidad, el PLA impreso en 3D es frecuentemente utilizado para la fabricación de partes y repuestos para distintos elementos, entre los cuales destacan las bombas de agua, válvulas, intercambiadores de calor, motores, propulsores y catalizadores, existen incluso motores a reacción fabricados completamente en PLA [15].

Dentro de las aplicaciones marítimas se han llegado a construir vehículos marítimos entre los cuales destacan botes con capacidad de hasta 4 personas, destinados principalmente a la toma de muestras cerca de playas y puertos, además su principal aplicación es la fabricación de drones no tripulados para estudios donde se podría poner en riesgo la integridad humana o a su vez la de un dron sofisticado, gracias a su bajo costo se pueden considerar a estos drones como desechables [15].

1.5 Impresión 3D

1.5.1 Descripción del proceso de manufactura aditiva o impresión 3D

La manufactura aditiva o impresión 3D es un proceso de fabricación de un objeto tridimensional en base a un modelo computarizado 3D o cualquier fuente informática mediante un proceso de adición de material fundido o en estado sólido/maleable donde se superponen capas de material gracias a controles numéricos computarizados [16].

La fabricación de objetos tridimensionales se basa en un modelo creado en computadora mediante programas de diseño tridimensional asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), posterior a la creación del modelo se procesa mediante distintos softwares de rebanado (slicer) como Ultimaker Cura. Los slicer generan códigos G utilizados para el movimiento de los servomotores de una impresora 3D en los ejes x, y, z o sus combinaciones dependiendo de la configuración de la impresora, además del motor de extrusión, considerando la cantidad de material según el modelo a imprimirse [17].

La tecnología de impresión 3D abarca una amplia variedad de materiales, utilizados tanto en aplicaciones didácticas, así como para la creación de prototipos o elementos médicos capaces de sustituir huesos dentro del campo de la biomedicina. Entre los mayores beneficios de la impresión 3D destaca el ahorro de tiempo y dinero, además de su versatilidad para ser transportada [15].

Uno de los parámetros fundamentales del proceso de impresión 3D es el patrón de relleno que formarán las capas internas, dentro de las paredes del cuerpo sólido a fabricarse, estos patrones generarán el relleno necesario según la densidad elegida, además de ser la base donde se fabricará la capa superior final de impresión [18].

Existen diferentes patrones de relleno en impresión 3D, entre los cuales destacan:

Concéntrico: Patrón con dirección uniforme de fibras de impresión que se dirigen hacia el centro de la pieza impresa, dependiendo de la densidad de relleno, podrán presentar una utilización de material mayor, posee paralelismo con las caras del elemento sin importar la arista de orientación de la pieza sobre la superficie caliente, genera una mejor adherencia entre capas de material gracias a la casi nula variación de las fibras adyacentes, dependiendo de la arista seleccionada para imprimir, generará una mejor distribución de cargas en cualquier ensayo a analizarse [19].

Triangular: Patrón generado a partir de triángulos huecos, las capas internas generadas se mantienen estáticas y verticales durante toda la fabricación de la pieza, las capas superiores finales podrán no adherirse bien a las paredes internas ya que dependerá completamente de la densidad de relleno de la pieza. Debido a los grandes espacios sin material dentro de cualquier elemento impreso con este patrón, no es recomendado para el análisis de distribución de fuerzas [19], [20].

Giroide: Patrón generado con fibras que se asemejan a círculos, cada capa interna impresa irá girando conforme se avance en el eje perpendicular a la cama de impresión, este patrón genera una distribución del material sobre el espacio interno de la pieza, dependerá igualmente de la densidad de relleno que podrá ser controlada de mejor manera gracias a un mejor uso del espacio vacío generado, es un patrón desarrollado recientemente por lo cual su uso y beneficios aún están sujetos a estudios [19], [21], [22].

1.5.2 Modelado por Deposición de material Fundido (FDM)

El modelado por deposición de material fundido (FDM, por sus siglas en inglés), es una tecnología versátil, ampliamente utilizada en la actualidad gracias a la gran variedad de máquinas (impresoras 3D) con sus respectivas configuraciones, que han abierto campo a un cambio drástico en los enfoques de manufactura, diseño y creación de elementos y partes [23].

El proceso de deposición de material se basa en fundir filamentos de material (generalmente termoplásticos) en forma de finas capas individuales, considerando un sistema de extrusión para la salida del material con dimensiones controladas. Posterior a

la terminación de una capa, se sobrepone una capa adicional de material, considerando la geometría de la pieza a fabricarse. Este proceso se repetirá tantas veces como el slicer haya determinado para la geometría deseada, tal y como se observa en la Figura.1.3 [23].

Se debe considerar, además, que la calidad y uniformidad del filamento de impresión no estará sujeta a control del usuario. Por lo general, dependiendo de la calidad podrán presentar burbujas o inclusiones de humedad que se presentarán como fallos en el acabado o en la estructura de la pieza final [1].

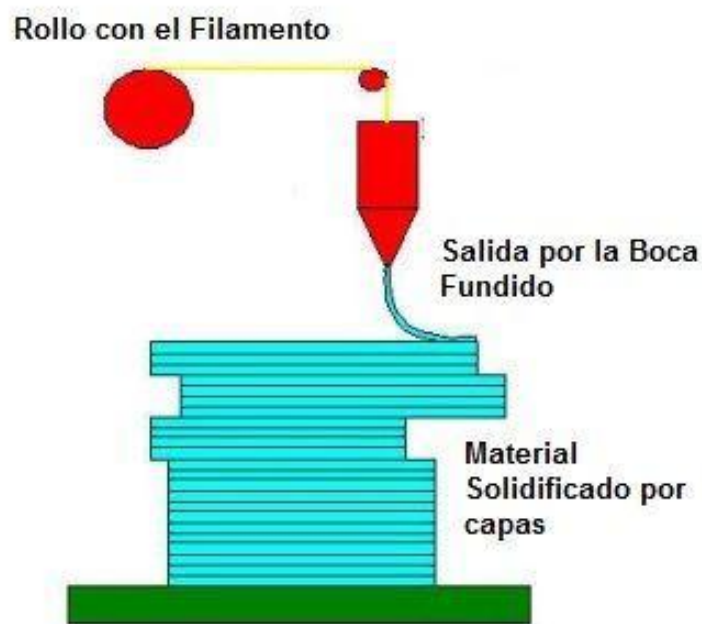


Figura 1. 3 Fundamentos de la tecnología FDM [24]

1.5.3 Tenacidad a la fractura

La tenacidad a la fractura es la resistencia que presenta un material a la propagación de grietas. Para su análisis existen varios métodos, algunos de ellos muy complejos que generalizan el comportamiento de una gran cantidad de materiales con similares características o procesos de fabricación. Sin embargo, estos métodos no siempre generan resultados dentro de los rangos esperados para la caracterización de un material. Es así que, para generar resultados con mayor detalle se definen métodos de análisis utilizando defectos preexistentes, por lo general pre-grietas introducidas en zonas específicas donde se requiera analizar la propagación de una grieta y su comportamiento a lo largo del componente o elemento [25].

Para el análisis de la fractura dentro de un componente, se puede utilizar técnicas de estudio mediante impacto, siendo estas los ensayos Charpy e Izod, donde se busca establecer las características de una fractura cuando los materiales se someten a cargas con altas velocidades de deformación [25].

No obstante, para el análisis de la propagación de una grieta para cualquier tipo de material, se debe tomar en cuenta que una grieta es un concentrador de esfuerzos. La base de esta consideración es que cualquier medición de tenacidad a la fractura es considerablemente menor a los cálculos teóricos. Las diferencias entre estos valores se basan en la presencia de grietas microscópicas que estarán siempre presentes en condiciones normales, grietas presentes tanto superficialmente, como dentro de la estructura del espécimen de análisis [25], [26]. La Figura 1.4 ilustra la presencia de una grieta en el interior de una placa infinita y de una grieta en la arista de otra placa semi-infinita.

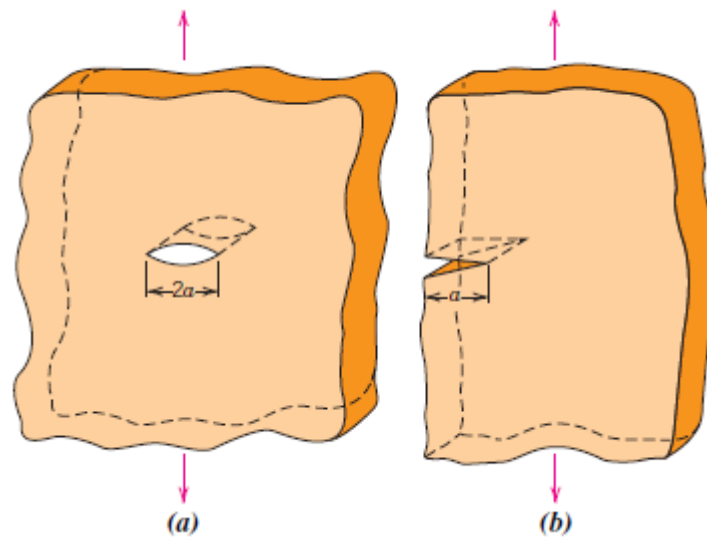


Figura 1. 4 Representación de a) grietas en el interior de una placa infinita, b) grieta en una arista de una placa semi-infinita [25]

Considerando que la tenacidad a la fractura se define como la resistencia de un material a la propagación de grietas, como explicado anteriormente, se debe mencionar que dentro del proceso FDM, las piezas fabricadas poseen capas sobrepuestas con trayectorias definidas por el usuario. Estas trayectorias pueden estar en direcciones opuestas a la propagación uniforme de grietas, dependiendo siempre de las aplicaciones de los componentes fabricados [27].

Para elementos a tracción se debe considerar que una grieta se puede idealizar como si fuese un agujero elíptico a través de una placa y que está orientada perpendicular al

esfuerzo aplicado, donde el esfuerzo máximo ocurrirá en las extremidades de la grieta, ver Figura 1.5 [25].

Para aproximar el valor del esfuerzo máximo en el extremo de una grieta se puede utilizar la siguiente Ecuación:

$$\sigma_M = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

Donde:

σ_0 = Magnitud nominal del esfuerzo aplicado

ρ_t = Radio de curvatura del extremo de la grieta

a = Longitud de la grieta superficial

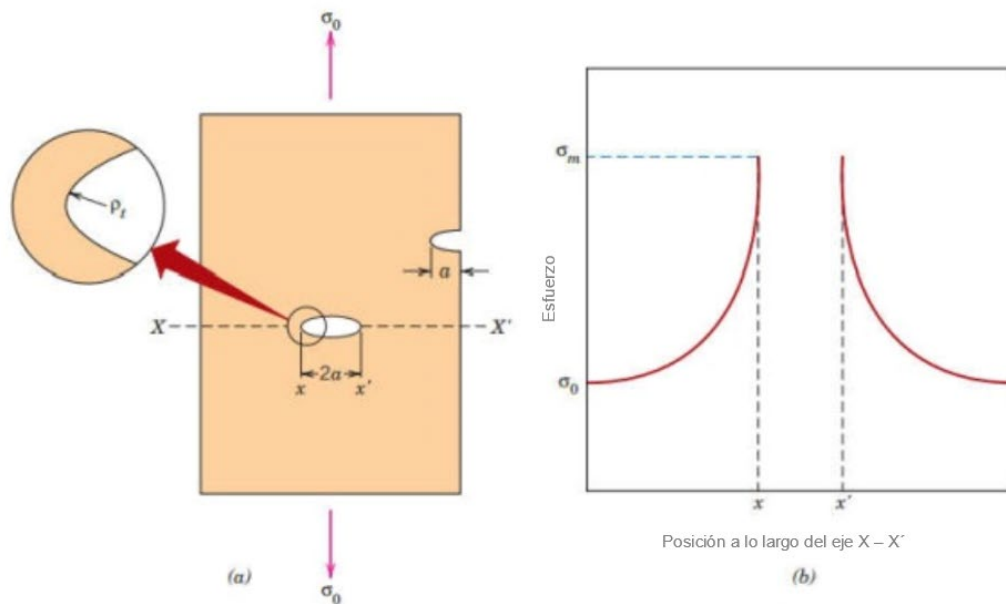


Figura 1. 5 (a) Geometría de grietas internas (b) Amplificación del esfuerzo en los bordes de la grieta. [25]

En la Figura 1.5 se puede apreciar cómo se distribuyen los esfuerzos en la geometría de una grieta, alcanzando su valor máximo en los bordes de una grieta, Conforme mencionado. Vale la pena señalar que se debe considerar esta relación, ya que una grieta es un concentrador de esfuerzos y a su vez, justifica la dirección de propagación de grietas [25].

Una vez definido el esfuerzo máximo en una grieta, con base en la relación σ_m/σ_o se puede definir el factor de concentración de esfuerzos K_t :

Una vez definido el esfuerzo máximo en una grieta, con base en la relación σ_m/σ_o se puede definir el factor de concentración de esfuerzos K_t :

$$K_t = \frac{\sigma_M}{\sigma_o} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

La Ecuación (1.2) representa la medida del grado en que se amplifica el esfuerzo en el extremo de una grieta. Se debe considerar que estos efectos no estarán influenciados por defectos microscópicos y cualquier restricción se presentará a nivel macroscópico por discontinuidades internas, esquinas pronunciadas y muescas en grandes elementos [25].

Para el análisis de la tenacidad a la fractura, se considera que debe existir un esfuerzo crítico que deberá ser excedido para que se propague una grieta, utilizando los principios de la mecánica de la fractura se puede aproximar el esfuerzo crítico a la Ecuación (1.3):

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

Dónde:

σ_c = Esfuerzo crítico

E = Módulo de Young del material

γ_s = Energía específica superficial

a = la mitad del largo de una grieta interna

Todo material frágil contiene una cantidad significativa de defectos y microgrietas que poseen una enorme variedad de tamaños, geometrías y orientaciones. Cuando la magnitud del esfuerzo de tracción en el extremo de algún defecto excede el valor del esfuerzo crítico, se forma una grieta y se propagará, lo cual resultará en la fractura del elemento [25].

Un ensayo común de tenacidad a la fractura puede ser desarrollado al aplicar esfuerzos de tracción a una probeta con algún defecto del cual se conozca su forma y dimensiones. Los esfuerzos aplicados aumentarán en el defecto, lo que actuará como un concentrador de esfuerzos. Para casos simples el factor de intensidad de tensiones K se define con la Ecuación 1.4:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.4)$$

Donde:

f = Factor geométrico para la probeta y su defecto

σ = Esfuerzo aplicado

a = Tamaño del defecto

Al realizar ensayos en probetas donde ya se conozca el tamaño del defecto, se puede determinar el valor de K que permitirá que este crezca, se propague y cause una fractura. Se definirá posteriormente al factor de intensidad de tensiones crítico K_c (Ecuación 1.5) como el valor de tenacidad a la fractura.

$$K_c = f\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (1.5)$$

En la Tabla 1.1 se enlistan los valores de tenacidad a la fractura que presentan distintos materiales. Destaca por su alto valor de tenacidad a la fractura la aleación de acero a 4340, temperada a 425°C, entre los materiales metálicos citados, con un valor de $87.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. También se debe indicar que no se puede correlacionar directamente el límite elástico con la tenacidad a la fractura, como se aprecia con la misma aleación de acero, que fue temperada a una temperatura menor de 260°C, donde a pesar de tener un límite elástico superior, su valor disminuye en casi 30%. Dentro del ámbito de impresiones 3D, la propagación de grietas dependerá de la técnica utilizada para la impresión, de las propiedades de material, considerando así importante el estudio del comportamiento de los parámetros utilizados en la impresión de manera experimental. Según Zolfagharian [28], la optimización de la dirección de la deposición de filamento contribuye a una ampliación en la zona de deformación que se asemeja a un “comportamiento dúctil”, que consecuentemente, favorecerá una propagación de grietas de velocidad baja.

Además, Zolfagharian [28] menciona que los estudios a desarrollarse que incluyan pre-grietas generarán resultados óptimos para la evaluación de la integridad estructural de los elementos mecánicos, considerando que las grietas podrían presentarse de manera natural en un elemento ya utilizado gracias a su vida de servicio o incluso durante su proceso de manufactura o acabado superficial, debido a errores humanos o fallos en herramientas.

Como menciona Kumar [4] en su análisis sobre tenacidad a la fractura de polímeros PLA y ABS reciclados, se considera de suma importancia el análisis de la carga aplicada sobre los especímenes de estudio, ya que los polímeros sometidos a ensayos de tenacidad por impacto generan grietas en distintas direcciones que no permiten determinar o predecir la propagación o comportamiento de una grieta para estos materiales.

Tabla 1. 1 Valores de tenacidad a la fractura de distintos materiales [25]

Material		Límite elástico		K_{IC}	
		MPa	ksi	$MPa\sqrt{m}$	$ksi\sqrt{in}$
		Metales			
Aleación de aluminio (7075-T651)		495	72	24	22
Aleación de aluminio (2024-T3)		345	50	44	40
Aleación de titanio (Ti-6 Al-4V)		910	132	55	50
Aleación de acero (4340 temp. 260°C)		1640	238	50	45.8
Aleación de acero (4340 temp. 425°C)		1420	206	87.4	80
		Cerámicos			
Concreto		-	-	0.2-1.4	0.18-1.27
Vidrio de cal sodada		-	-	0.7-0.8	0.64-0.73
Óxido de aluminio		-	-	2.7-5.0	2.5-4.6
		Polímeros			
Poliestireno (PS)		-	-	0.7-1.1	0.64-1.0
Poli(metil-metacrilato) (PMMA)		53.8-73.1	7.8-10.6	0.7-1.6	0.64-1.5
Policarbonato		62.1	9	2.2	2

1.5.4 Importancia de la tenacidad a la fractura

Entre todas las variables a considerarse para la elección de un material destaca la tenacidad a la fractura del material (K_c o K_{IC}), el esfuerzo aplicado y el tamaño del defecto, sea controlado o existente. Los análisis de tenacidad a la fractura permiten diseñar y elegir distintos materiales, considerando la inevitable existencia de defectos. Si se conoce el tamaño máximo de los defectos en un material, se puede seleccionar todo aquel que posea sus valores de K_c o K_{IC} lo suficientemente altos para evitar la propagación de estos defectos y que se conviertan en fracturas que lleguen al fallo [25].

Dentro del análisis del diseño de componentes, se debe considerar el tamaño máximo de cualquier defecto pre-existente para así, seleccionar además del material con un adecuado

valor de K_c o K_{IC} , la geometría necesaria para que el esfuerzo aplicado no sobrepase los límites permitidos y lleve al fallo del componente [25].

El estudio de la tenacidad a la fractura presenta una enorme importancia dentro de la determinación de factores de seguridad en el diseño de un método de manufactura o ensayo. Una vez seleccionada la geometría del componente, el material y a su vez el esfuerzo solicitado, determinar el tamaño máximo de defectos presentes permitirá descartar lotes de componentes defectuosos o simplemente agregar un nivel extra de seguridad si estos elementos poseen funciones críticas.[25]

1.5.5 Tenacidad a la fractura – Modo I – II – III

Para análisis de la tenacidad a la fractura, se puede considerar al valor obtenido de los distintos análisis como K_C , considerando el modo de fractura denotado como “I” (número “uno” en romano), que se denomina de esta manera por la dirección de propagación de la grieta obtenida. Debido a que el análisis para este trabajo está basado en fracturas de modo I (ver Figura 1.6), se considerarán a los valores obtenidos de tenacidad a la fractura como K_{IC} .

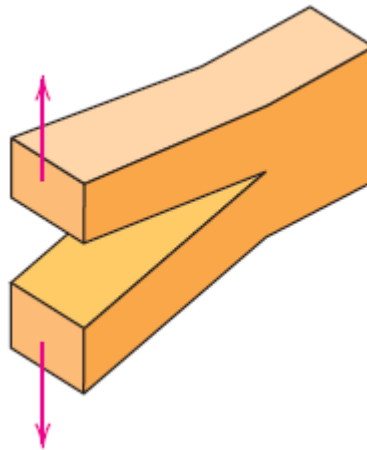


Figura 1. 6 Desplazamiento superficial de una fractura modo I [25].

Como se aprecia en la Figura 1.6 el desplazamiento de la superficie genera una separación del material en un plano paralelo entre las aristas que amplían su separación en medida del crecimiento de la grieta. Los factores con mayor influencia en el crecimiento de este

tipo de grietas provocadas por fractura de tipo I son la temperatura, carga aplicada y microestructura del material [18], [25].

Para el modo II (número “dos” en romano), de análisis de tenacidad a la fractura (ver Figura 1.7.) se considera a la propagación de una grieta como el deslizamiento de dos capas superficiales con esfuerzos distribuidos en direcciones opuestas [25].

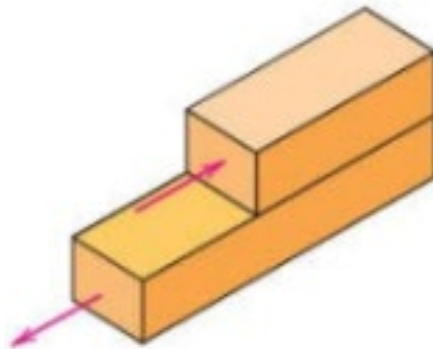


Figura 1. 7 Desplazamiento superficial de una fractura tipo II [25].

En la Figura 1.7 se puede apreciar un ejemplo de deslizamiento superficial para la creación de una fractura tipo II. Se considera a los esfuerzos aplicados completamente opuestos o al menos cada uno de sus componentes en el mismo eje, para que sea posible la existencia de este modo de fractura [25].

Como se aprecia en la Figura 1.8 para una fractura tipo III (número “tres” en romano), se nota una separación de capas superficiales hacia direcciones opuestas, formando una Y, si se observa desde un plano perpendicular a los esfuerzos aplicados, los cuales deberán mantener direcciones opuestas para que se desarrolle este tipo de fractura [25].

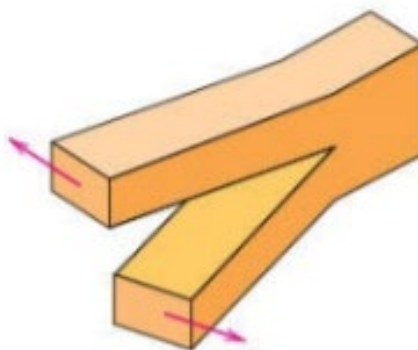


Figura 1. 8 Desplazamiento superficial de una fractura tipo III [25]

1.5.6 Métodos de inserción de pre-grietas

Dentro del alcance de la norma ASTM D5045-14 se indica que toda probeta para ensayos de tenacidad a la fractura requiere de una pre-grieta introducida en el entalle. La inserción de esta pre-grieta puede realizarse mediante el uso de mecanismos o herramientas, considerando las propiedades del material [29].

En el trabajo de Poveda y Sandoval [30], se fabricó un mecanismo para la inserción de pre-grietas en probetas de resina epóxica reforzada con nanopartículas de Titania, con base en el trabajo de Patterson et al. [31]. El mecanismo utilizado (ver Figura 1.9) consistió en una estructura con base sólida y pesada para garantizar estabilidad, además de dos columnas guía y un elemento pivote para sujeción de una cuchilla de afeitador, considerando el uso de dicha cuchilla en la norma ASTM D5045.

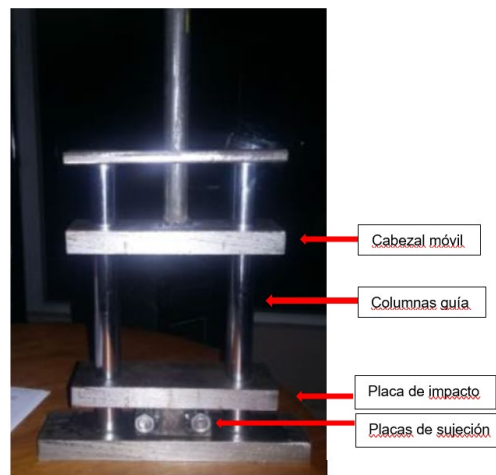


Figura 1. 9 Mecanismo para inserción de pre-grietas en probetas [30].

El mecanismo consiste en un cabezal que impacta contra una lámina móvil que se encuentra dentro del mecanismo de sujeción de cuchillas de afeitador generando así una pre-grieta en el entalle de las probetas, este mecanismo considera la altura de la lámina móvil para evitar que el impacto fracture totalmente la probeta [30].

Según indica la norma ASTM D5045, en caso de que el mecanismo utilizado no permita la inserción de una pre-grieta, se puede realizar una inserción manual, utilizando alguna herramienta que evite provocar algún defecto adicional en el material (ver Figura 1.10). En este caso, la introducción de la pre-grieta se debe realizar con movimientos tipo cierra de manera perpendicular, considerando siempre las relaciones y dimensiones para que el tamaño de la pre-grieta no influya negativamente en el estudio [32].



Figura 1. 10 Inserción manual de pre-grieta [Fuente: propia]

1.5.7 Factores de impresión 3D para probetas de tenacidad a la fractura

Para el análisis de tenacidad a la fractura de elementos impresos en 3D se debe considerar la forma de fabricación y trabajo de una impresora 3D, sea esta mediante el movimiento del cabezal de impresión de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo y sobre todo el movimiento de la cama de impresión, que podrá ser de dentro hacia fuera o de arriba hacia abajo, dependiendo de las diferentes configuraciones de los fabricantes. Notar que el proceso de deposición de material fundido tiene el mismo fundamento de agregar capas sobrepuestas y mantener un sistema uniforme según el patrón de impresión [33].

Los parámetros para combinar dentro de los diferentes programas de post procesamiento de elementos diseñados en 3D para su posterior impresión abarcan el patrón y densidad de relleno, sean estos: red, líneas, triángulos, tri-hexágono, cúbico, octeto, concéntrico, zig-zag, cruz, cruz tridimensional, giroide, rayo, entre otros. Al hablar de la densidad se puede variar el parámetro de 0% (solo existirán las paredes externas de la impresión) hasta 100% (considerando el elemento completamente sólido). Dentro de la variación de densidad de relleno, se recomienda realizar impresiones en intervalos de 10% para no alterar las condiciones de impresión y grosor de paredes de relleno del programa [33].

Existen diversos patrones de relleno (Figura 1.11), donde se aprecian varias formas que pueden adaptarse a las necesidades o gustos del usuario. En el presente trabajo de la investigación, se consideró también que la densidad de relleno influye en el espaciado de las formas desarrolladas durante la impresión. Estos factores pueden tener un efecto importante en las propiedades mecánicas de los elementos impresos en 3D [34].

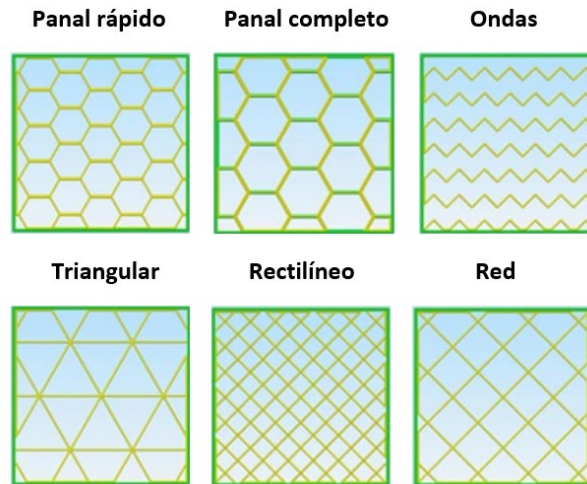


Figura 1. 11 Ejemplos de patrones de relleno en impresión 3D [35]

1.5.8 Importancia de la evaluación de la tenacidad a la fractura en elementos impresos en 3D

Considerando que el PLA es un polímero comercial fabricado con residuos orgánicos, biodegradable, compostable y, sobre todo, no tóxico, cualquier análisis que promueva su uso sobre los distintos polímeros obtenidos a base de petróleo, es de enorme importancia, especialmente si se consideran distintas aplicaciones en ingeniería, donde destaca el prototipado de elementos mecánicos. En esta área los polímeros derivados del petróleo son ampliamente utilizados sin considerar cualquier efecto adverso sobre el medio ambiente [36], [37]

Un factor que influye en gran medida en el análisis de tenacidad a la fractura es la dirección de la carga aplicada que, como se mencionó en la sección 1.5.5 de este trabajo, generará los distintos modos de fractura en un material [13].

1.5.9 Estudio de casos de evaluación de tenacidad a la fractura de PLA obtenido con distintas condiciones de impresión 3D

Existen distintos factores que influyen la tenacidad a la fractura, entre ellos el tipo de disposición de fibras de impresión y la optimización de parámetros automáticos de impresión. Como menciona Gardan et al. [38] en su investigación, impresiones con patrones convencionales presentan desplazamientos y tenacidad a la fractura inferiores a muestras optimizadas con patrones de impresión con formas que consideren la dirección de propagación de grietas. Se observa en la Figura 1.12 que las direcciones de crecimiento

de grieta cambian drásticamente de forma según sea la configuración determinada para el estudio.

Considerando que la deposición de material fundido puede desarrollarse también en moldes para la obtención de probetas e incluyendo su post procesamiento, existen análisis comparativos entre elementos completamente sólidos y aquellos que fueron impresos en 3D con fibras sobrepuestas, las diferencias principales radican en análisis microscópicos que permiten verificar que la tenacidad a la fractura de un elemento sólido es mayor. Sin embargo, para la fabricación de elementos con esta técnica se requiere de una supervisión constante por el fabricante, en relación con la autonomía que brinda la impresión 3D [39], [40].

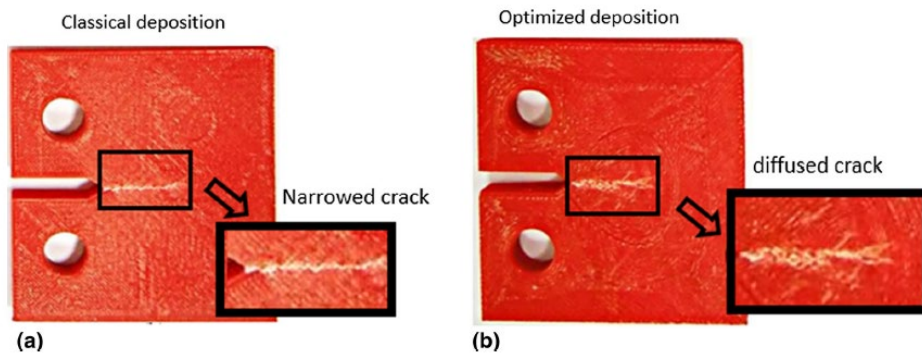


Figura 1. 12 Propagación de grietas en el trabajo de Gardan et al. [41]

En el trabajo de Allum et al. [42] la dirección de prueba además de la configuración y patrón de las fibras son elementos de análisis para determinar distintas propiedades mecánicas de impresiones 3D. En su estudio se menciona también que las consideraciones de unión entre capas de filamento (sin tomar en cuenta el material) son menos importantes que las configuraciones geométricas (patrones y densidad de relleno). El estudio concluye determinando que elementos impresos en 3D no poseen una diferenciación en propiedades respecto a un elemento sólido fabricado con moldes del mismo termoplástico empleado. En la Figura 1.13 se observa el uso de una macrografía a contraluz para la observación de la propagación de una grieta bajo distintas condiciones de impresión 3D, con la finalidad de observar la dirección que toman las grietas de los elementos ensayados.

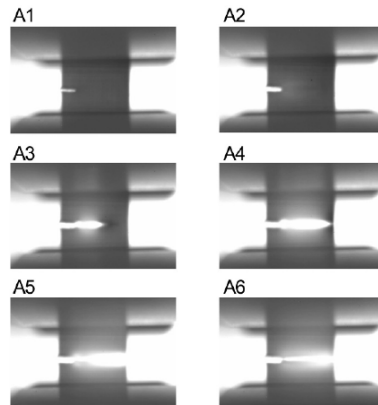


Figura 1. 13 Estudio de propagación de grieta a contraluz [42]

En el estudio de Song et al. [20] se desarrolla una comparación entre la tenacidad a la fractura de elementos impresos en 3D con una densidad de relleno de 100%, así como con elementos fabricados mediante deposición de material en molde (inyección directa). El estudio abarca a su vez el uso de un patrón de impresión unidireccional que genera capas sobrepuestas idénticas, sin considerar las facilidades en la creación de paredes que ofrecen los softwares slicer para impresión 3D. El estudio concluyó que los valores de tenacidad a la fractura son mayor para elementos fabricados mediante inyección directa, pero estos valores no sobrepasan 5% de diferencia en comparación con elementos impresos en 3D con una densidad de relleno de 100%.

Como se aprecia en la Figura 1.14, la grieta presente no posee ramificaciones o cualquier indicio de resistencia a la fractura, considerando que el método de fabricación no generó beneficios a la tenacidad a la fractura de los elementos impresos [20].

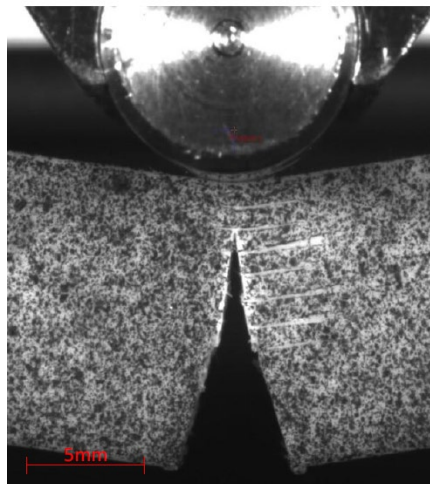


Figura 1. 14 Macrografía de propagación de grieta en el estudio de Song [20].

Silva et al. [21] menciona en su trabajo la importancia de la utilización de patrones de impresión 3D que no posean formas geométricas convencionales como triángulos, cuadrados, líneas rectas y todos sus derivados en forma y tamaño, llegando incluso a poder realizar configuraciones artísticas donde se generan polígonos de entre 6 a 10 lados. La selección de parámetros no geométricos para patrones de impresión 3D, ha despertado el interés de distintos investigadores para determinar las propiedades mecánicas de elementos fabricados con polímeros mediante deposición de material fundido en capas.

Dicho estudio enfatiza la utilización de un patrón con formas tipo “ola de mar” que se irán sobreponiendo con su ángulo de posición variando entre 0 y 180 °, generando así un efecto de giro que se denominó giroide. Este patrón es usado principalmente de forma artística, pero el aumento de propiedades mecánicas gracias a su distribución de esfuerzos sobre sus capas interiores generó el interés suficiente para realizar distintos ensayos de comparación con otros patrones sencillos de impresión 3D y elementos sólidos fabricados en moldes con inyección de material fundido [21], [22].

La Figura 1.15 muestran distintos especímenes impresos en 3D utilizados en el trabajo de Silva et al. [21], donde se empleó variaciones en la densidad de relleno para el patrón de impresión giroide, con la finalidad de analizar las propiedades de los elementos al variar la cantidad de material utilizado.



Figura 1. 15 Elementos de prueba en el estudio de Silva [21]

Por los estudios anteriormente mencionados, se seleccionó un parámetro no geométrico convencional de patrón de relleno en impresión 3D, para el análisis de tenacidad a la fractura del presente trabajo. Gran parte de las caracterizaciones de PLA impreso en 3D únicamente abarcan patrones lineales, concéntricos y en formaciones geométricas que no permiten un ahorro sustancial de material en impresiones a gran escala como lo proveería el patrón giroide. De igual forma, para establecer un parámetro de comparación se seleccionó también el patrón de relleno concéntrico [43], conforme especificado en la Tabla 1.2. Nótese que no se seleccionó el patrón convencional lineal, a pesar de ser empleado

en distintos trabajos reportados en la literatura (ver Tabla 1.2.) por las razones especificadas anteriormente.

En la Tabla 1.2 también se observa que la densidad de relleno empleada para estudios de tenacidad a la fractura oscila entre 75 y 100 %. Sin embargo, en el trabajo de Milovanovic et al. [44], se reportó que una densidad de relleno de 60 % exhibe resultados de tenacidad a la fractura de probetas de PLA similares al 80 %, con un ahorro significativo de material. Para verificar esta hipótesis se decidió trabajar con densidades de relleno del 60 y 80 %. El trabajo de Srinivasan et al. [45] también ilustra el uso de densidades de relleno tan bajas cuanto el 60 %, donde además se realizó una comparación con compuestos de PLA reforzados con fibra de carbono, considerando densidades de relleno desde el 20 hasta 70 %, obteniéndose resultados de tenacidad a la fractura favorables a este estudio y avalando, consecuentemente, los dos valores seleccionados para este parámetro de impresión.

Tabla 1. 2 Tabla comparativa de estudios

Material	Medio de fabricación	T [°C]	Densidad de relleno [%]	Patrón de relleno	Tipo de ensayo	Resultados*	Ref.
PLA (reciclado)	Inyección directa en molde	215	100	No aplica	Tenacidad a la fractura	↑ Tenacidad a la fractura 24%	[27]
PLA / PLA +Carbono	Impresión 3D	200	50/60/70	Linear	Tracción / Impacto	↑ Tenacidad a la fractura 14%	[45]
PLA	Impresión 3D	205	100	Giroide	Tenacidad a la fractura	↑ Tenacidad a la fractura 12%	[21]
PLA	Impresión 3D	200	80 / 60	Zig-Zag	Impacto	↑ Tenacidad a la fractura 5%	[3]
PLA	Impresión 3D	205	60	Unidireccional (asistida)	Tenacidad a la fractura	↑ Tenacidad a la fractura 25%	[41]
PLA + Fibra de carbono	Impresión 3D / Inyección en molde	225	80 / 100	Concéntrico	Tenacidad a la fractura	↑ Tenacidad a la fractura 8% / 35%	[43]
PLA	Impresión 3D	220	75	Linear	Tenacidad a la fractura	Determinación de efectos en Modo I y II	[46]

*Los porcentajes aquí descritos representan el incremento con respecto a ensayos realizados con patrones lineares o modelos por inyección.

2 METODOLOGÍA

En la Figura 2.1 se presenta el esquema que describe la metodología empleada en el presente trabajo.

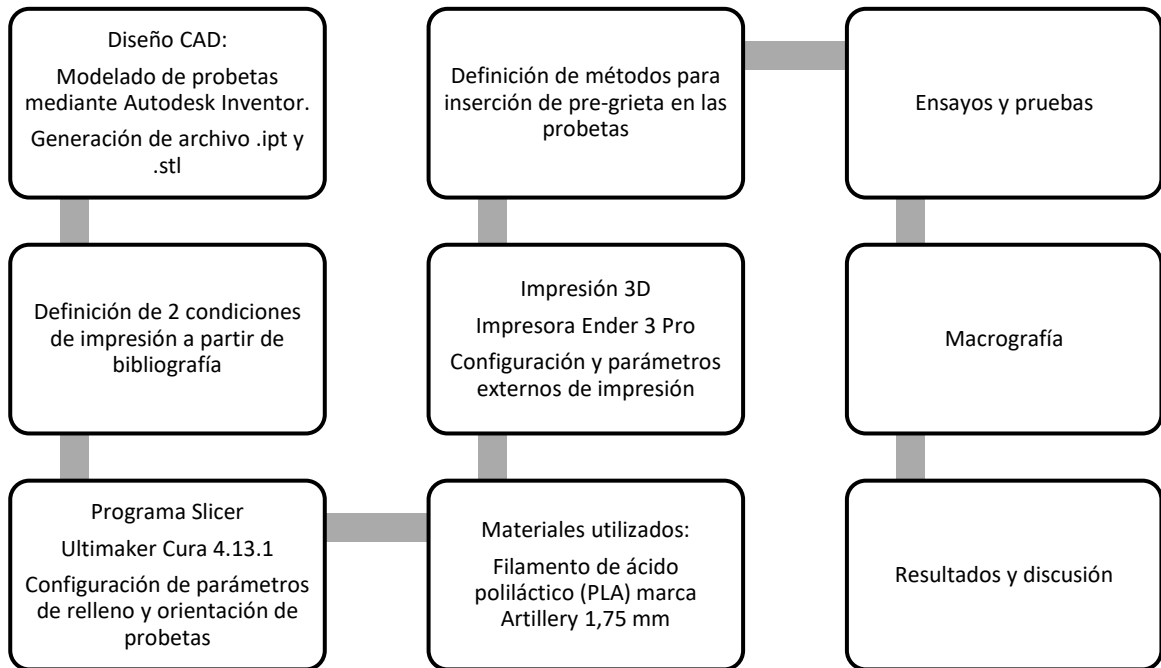


Figura 2. 1 Metodología de trabajo [Fuente: propia]

2.1 Materiales y equipos

2.1.1 Filamento de (PLA)

El filamento empleado para el presente trabajo es PLA de marca Artillery, con diámetro 1.75 ± 0.02 mm, se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2. 2 Filamento 3D (ejemplo) [47].

Las características del material utilizado se presentan en la Tabla 2.1:

Tabla 2. 1 Propiedades filamento Artillery Blanco.

Propiedad	Unidad	Valor/Rango
Temperatura recomendada de impresión	[C°]	185 – 210
Diámetro	[mm]	1.75
Temperatura recomendada de cama de impresión	[C°]	55 - 85
Densidad	[g/cm ³]	1,24
Peso (por rollo)	[kg]	1.0
Resistencia última a la tracción	[MPa]	53.97
Módulo elástico	[GPa]	2.2

Fuente: [48]

2.1.2 Impresora 3D – ENDER 3 PRO

La impresora utilizada en el presente trabajo fue una ENDER 3 PRO, presentada en la Figura 2.3:

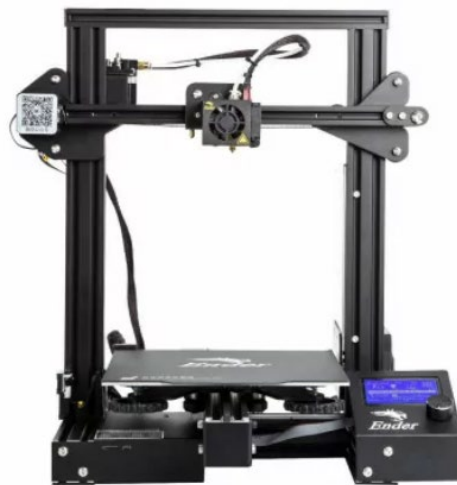


Figura 2. 3 Impresora Ender 3 Pro [49].

Las características de la impresora, proporcionadas por el fabricante se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2. 2 Características impresora 3D Ender 3 Pro

Característica	Descripción
Dimensiones [mm]	200x200x250
Diámetro de boquilla recomendada (nozzle) [mm]	0.4
Diámetro de filamento [mm]	1.75
Temperatura máxima de impresión [C°]	255
Temperatura máxima de cama [C°]	90
Velocidad máxima de impresión [mm/s]	80
Materiales permitidos para impresión	PLA/TPU/ABS

Fuente: [49]

2.1.3 Mototool Truper

Para correcciones en las impresiones realizadas, además de la eliminación de residuos del elemento de adhesión, se utilizó un mototool manual igual al que se observa en la Figura 2.4:



Figura 2. 4 Mototool trooper (imagen referencial)[50]

Las características proporcionadas por el fabricante se presentan en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Características Mototool Trooper

Característica	Descripción
Potencia del motor [W]	150
Diámetro del collet (sujeción) [mm]	1/8"
Conexión eléctrica [V]	110/220

2.1.4 Herramienta de sujeción de cuchillas

Debido a que se realizaron pruebas preliminares utilizando el mecanismo definido en la literatura, especificado en la sección 1.5.6 de la revisión bibliográfica, y que el peso que impactaba no permitía controlar el tamaño de la pre-grieta se decidió utilizar el segundo método descrito anteriormente, que corresponde a la inserción manual.

Por lo tanto, dentro del proceso de inserción de pre-grietas en las probetas a ensayarse, se utilizó una herramienta para sujeción de cuchillas (preferiblemente de la marca ASTRA), se obtuvo esta herramienta mediante impresión 3D y el modelo de la misma fue proporcionado por la página de modelos 3D Thingiverse (<https://www.thingiverse.com>), dicha herramienta se aprecia en la Figura 2.5:



Figura 2.5 Herramienta de sujeción de hojas de afeitarse (imagen referencial) [51]

2.1.5 Cuchillas de afeitarse

Como elemento principal del proceso de inserción de pre-grietas se utilizaron cuchillas de afeitarse de la marca ASTRA, considerando la herramienta obtenida en internet para evitar el riesgo de cortes durante el proceso. En la Figura 2.6 se presenta una imagen referencial para considerar la forma de la cuchilla utilizada:



Figura 2. 6 Cuchillas de afeitar ASTRA (imagen referencial) [52]

2.1.6 Microscopio OLYMPUS

Para la realización de macrografías se utilizó un microscopio marca OLYMPUS GX4 con software integrado Stream Essentials propio del fabricante. En la Figura 2.7 se presenta una fotografía del equipo, además, en la Tabla 2.4 se describen sus características técnicas.



Figura 2. 7 Microscopio OLYMPUS. [Fuente: propia]

Tabla 2. 4 Características Microscopio Metalográfico

Equipo	Marca	Modelo	Serie
Microscopio metalográfico OLYMPUS GX4	MEIJI	IM7200	1808

2.2 Preparación de probetas de PLA

2.2.1 Modelado mediante diseño asistido por computadora (CAD) de probetas

Considerando la norma establecida para el ensayo (ASTM D5045-14), se procedió a modelar las probetas en el programa Autodesk Inventor, se consideró además que el entalle (notch) requerido para el ensayo, sea modelado directamente desde el software CAD y no introducido posteriormente mediante procesos manuales. Con esto se logró además aportar un rango menor de incertidumbre e incrementar la uniformidad de las probetas.

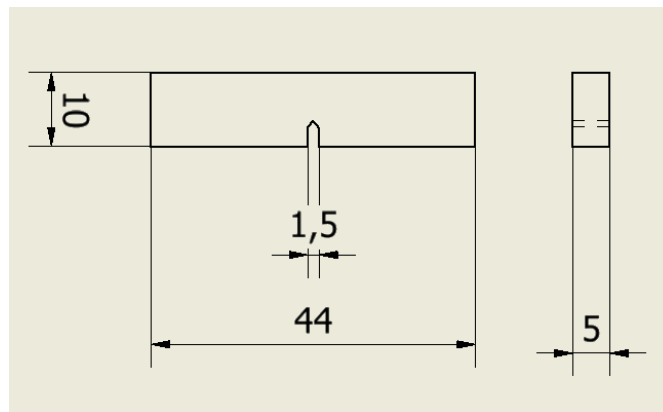


Figura 2. 8 Probetas según ASTM D5045 – Diseñadas en Autodesk Inventor.
[Fuente: propia]

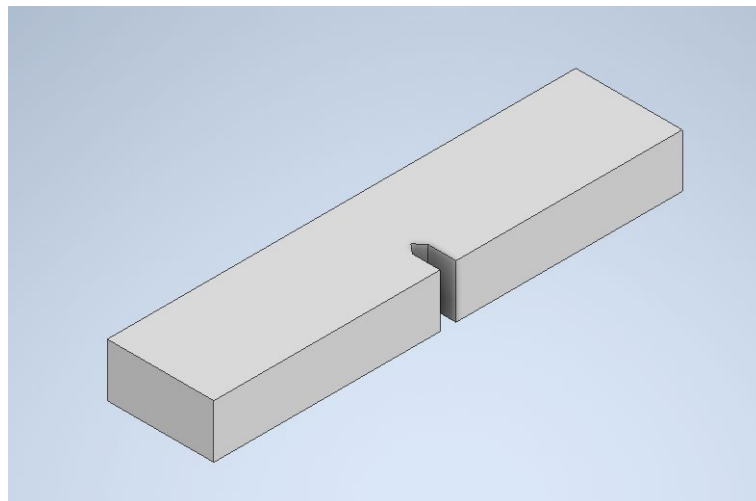


Figura 2. 9 Probetas según ASTM D5045-14 diseñadas en Autodesk Inventor (boceto tridimensional).
[Fuente: propia]

2.2.2 Rebanado del archivo CAD en Slicer

Mediante el programa de rebanado Ultimaker Cura (Figura 2.10), Fse procedió a la realización del proceso de “rebanado” o separación en capas del modelo STL, exportado del modelo IPT proveniente del programa Autodesk Inventor. El proceso de rebanado permitió generar el código G para la impresión de probetas. En la Tabla 2.5 se detallan los parámetros de impresión seleccionados, mismos que fueron obtenidos a partir de revisión bibliográfica. Algunos de estos parámetros se establecieron directamente por el modelo de impresora utilizado.

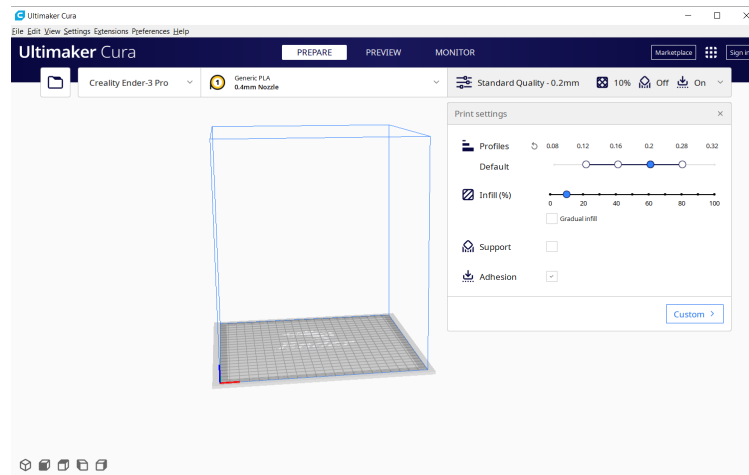


Figura 2. 10 Software "Slicer" utilizado para el rebanado CAD.
[Fuente: propia]

Tabla 2. 5 Parámetros de impresión 3D

Parámetro de impresión	Valores utilizados	Ref.
Temperatura de boquilla [C°]	200	[49], [53]
Temperatura superficie de impresión [C°]	60	[49], [54]
Altura de capa [mm]	0.16	[28], [41], [55]
Densidad de relleno [%]	60/80	[53], [56], [57]
Patrones de relleno	Concéntrico/Giroide **	[53], [57]
Diámetro interno de boquilla [mm]	0.4	N/A
Grosor de pared [mm]	0.8	N/A
Adherencia a cama de impresión	Borde/Falda (Brim)	N/A
Longitud de borde [mm]	8	N/A

**Las densidades de relleno seleccionadas fueron establecidas con base en la literatura, Tabla 1.1 de la sección 1.5.8

2.3 Definición de dos condiciones de impresión 3D para ensayos de tenacidad a la fractura

Para la definición de estas condiciones de impresión 3D para las probetas de PLA, se empleó la revisión bibliográfica descrita en la sección 1.5.9, además de la Tabla 1,2, correspondiente al estudio de casos presentado en esta sección. De los distintos parámetros identificados en el estudio de casos, se seleccionaron como variables, las combinaciones de los patrones de relleno concéntrico y giroide, además de las densidades de relleno 60 y 80%.

Como menciona Gardan et al. [41] en su investigación, los criterios de selección de condiciones de impresión se basan principalmente en verificar los patrones y densidad de relleno, las distintas combinaciones permitirían la implementación de hasta un 30% en los valores obtenidos en tenacidad a la fractura.

Considerando que, el FDM se basa en el modelamiento de capas sobrepuestas de material fundido, se consideraron criterios importantes entre los cuales destaca la distribución de las fibras dentro de las paredes de impresión; este parámetro se consideró con base en la posible distribución de una grieta en los ensayos realizados, se tomó en cuenta además la forma que toma el patrón de impresión interno, el modelador (slicer) utilizado (Ultimaker Cura) permitía las siguientes configuraciones: cuadrícula, líneas, triángulos, hexágonos, cubos, concéntrico, zig-zag, cruz, giroide, rayo. Considerando y observando las distintas previsualizaciones permitidas, además de revisión bibliográfica se determinó que los parámetros óptimos para el presente trabajo fueron: giroide y concéntrico [41].

En las Figuras 2.11 y 2.12 se ilustran los patrones de relleno giroide y concéntrico respectivamente.



Figura 2. 11 Impresión 3D en patrón giroide (Imagen referencial) [22]

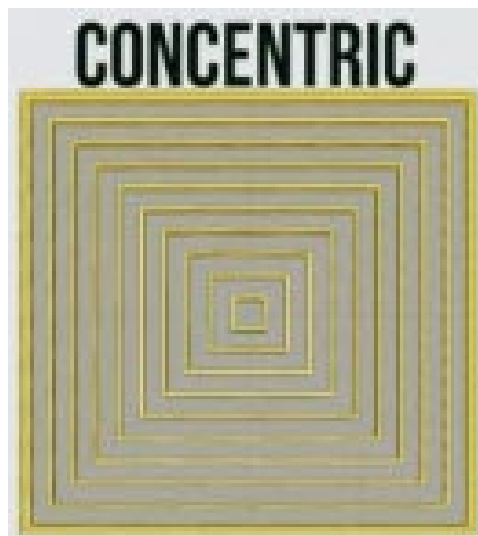


Figura 2. 12 Imagen referencial de patrón de impresión 3D concéntrico [35]

2.3.1 Impresión de probetas de PLA para ensayos tenacidad a la fractura

Para la impresión de probetas de PLA se procedió a realizar pruebas preliminares donde se utilizó distintas combinaciones de distribución y orientación de probetas en el programa (slicer) utilizado, estos lotes permitieron establecer las configuraciones finales para realizar el proceso de impresión 3D.

Se consideró además la utilización de una falda (brim) como configuración de adherencia a la cama de impresión, las dimensiones de este parámetro se establecieron predeterminadamente por el programa Ultimaker Cura, teniendo en cuenta las dimensiones de trabajo que posee la impresora Ender 3 Pro, como se detalló previamente en la Tabla 2.2.

En la Figura 2.13, existe una orientación específica para cada lote de probetas, sin considerar las posibles combinaciones de parámetros para impresión, se utilizó una orientación perpendicular al lado más largo de la mesa de trabajo, debido a los apoyos presentes, con la finalidad de reducir al máximo las variaciones por vibración producidas por la mesa donde se encuentra la impresora 3D.

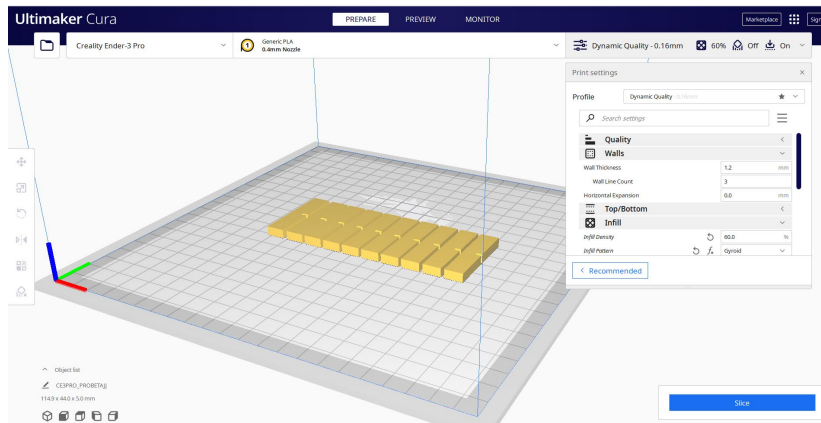


Figura 2. 13 Configuración en slicer Ultimaker Cura. [Fuente: propia]

En la Figura 2.14 se presenta el proceso de impresión de probetas en lotes según lo requerido.



Figura 2. 14 Impresión de probetas en lote. [Fuente: propia]

Para el análisis de vibración se presenta en la Figura 2.15 el esquema de la mesa de apoyo de la impresora 3D considerando la disposición de los soportes y las posibles consecuencias del movimiento en los diferentes ejes que realiza la impresora.

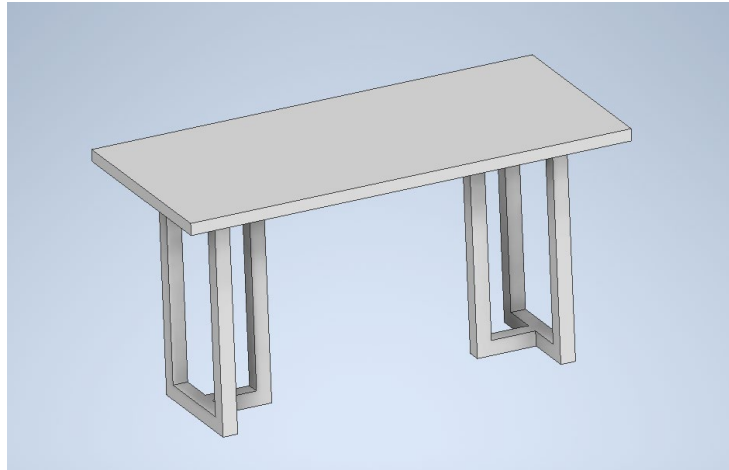


Figura 2. 15 Esquema de mesa de trabajo para impresora 3D. [Fuente: propia]

El esquema de apoyo de la mesa de trabajo se presenta en la Figura 2.16 como una línea roja con sujeción fija, en realidad el apoyo es una pared que se encuentra completamente apoyada sobre una arista lateral de la mesa.

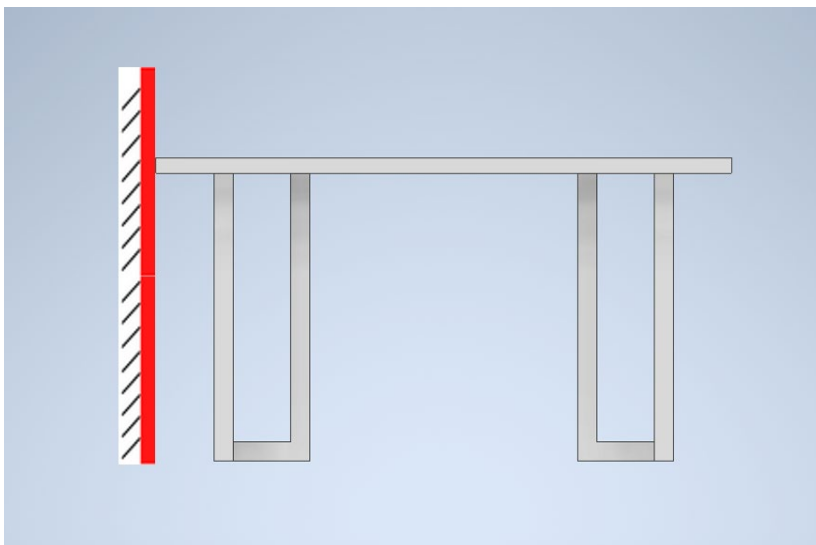


Figura 2. 16 Esquema de apoyos de mesa de trabajo. [Fuente: propia]

Los apoyos inferiores de la mesa se presentan como un esquema tipo T, tal y como se aprecia en la Figura 2.17, este tipo de apoyo, al no ser en forma de cruz, presenta un rango de vibración, esto se debe a que la mesa de apoyo está diseñada de forma estética mas no considerará el apoyo requerido para una impresora 3D.

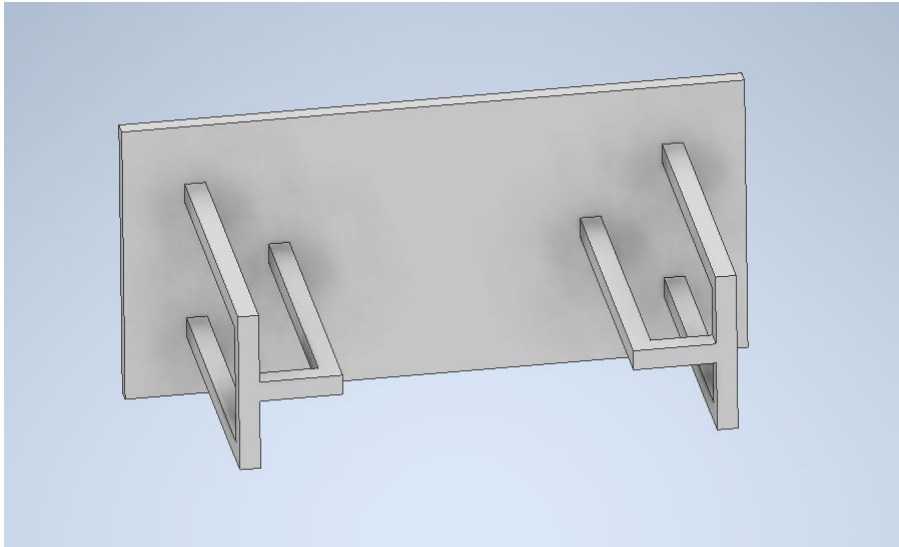


Figura 2. 17 Tipos de apoyos inferiores de mesa de trabajo. [Fuente: propia]

Los apoyos tipo T están distribuidos de forma simétrica como se aprecia en la Figura 2.18, no se consideran dimensiones específicas gracias a su simetría y a los apoyos utilizados para anclar la mesa y reducir al máximo las vibraciones producidas.

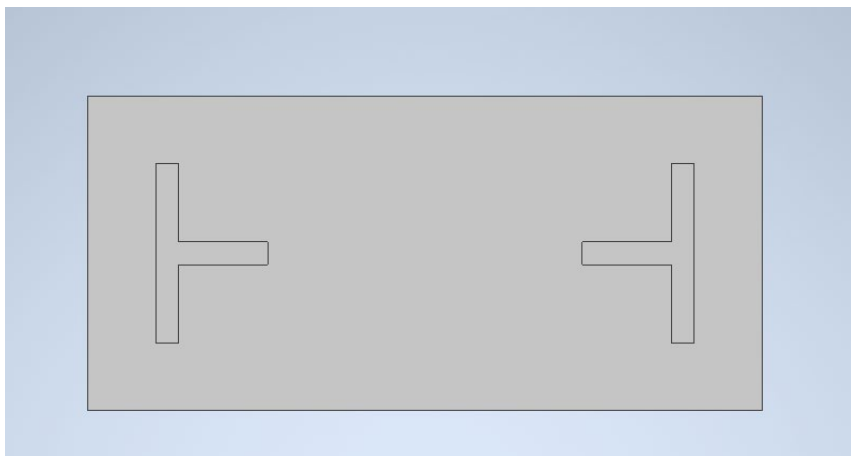


Figura 2. 18 Configuración y distribución de apoyos inferiores de mesa de trabajo. [Fuente: propia]

El análisis de la mesa de trabajo y su influencia en las vibraciones fue requerido en el presente trabajo ya que cualquier movimiento externo a la impresora 3D puede influir en las primeras 10 capas de impresión, produciendo alteraciones en la uniformidad de las capas de relleno de la impresión y por tanto influyendo en los resultados [58].

2.3.2 Definición de un método para la introducción de la pre-grieta en las probetas de PLA impresas en 3D

Considerando los métodos descritos en la literatura, presentados en la sección 1.5.6 de la revisión bibliográfica, se realizaron ensayos preliminares empleando el método de introducción de pre-grieta con un mecanismo de impacto.



Figura 2. 19 Mecanismo para inserción de pre-grieta [30]

Una cuchilla de afeitar fue sujeta por las placas inferiores. Sobre la cuchilla se colocó la probeta hacia el lado del entalle para que se pueda generar la pre-grieta. Posteriormente, se aplicó la placa de peso sobre la probeta para evitar cualquier movimiento inesperado que lleve a que la pre-grieta no se genere dentro del entalle.

Se procedió a dejar caer la placa móvil sobre la placa de peso para generar la pre-grieta. En estas pruebas preliminares se emplearon distintas alturas para determinar el tamaño de la pre-grieta y si este satisfacía las condiciones dadas por la norma ASTM D5045-14. La realización de estas pruebas preliminares se observa en la Figura 2.20.



Figura 2. 20 Pruebas preliminares en mecanismo de impacto para generar pre-grieta. [Fuente: propia]

El segundo método aplicado fue emplear una herramienta disponible en una base gratuita de archivos de impresión 3D para la sujeción de una cuchilla de afeitar (ver Figura 2.21). Inicialmente se colocó la cuchilla de afeitar en la parte más profunda del entalle y se procedió a realizar movimientos continuos de manera manual, tipo sierra hasta lograr generar una pre-grieta con la profundidad requerida por la norma ASTM D5045-14. Se utilizó un calibrador para controlar el tamaño de la pre-grieta, además de un bolígrafo punta fina para señalar un estimado de la profundidad requerida de aproximadamente 1.5 mm, valor calculado con las dimensiones de la probeta.

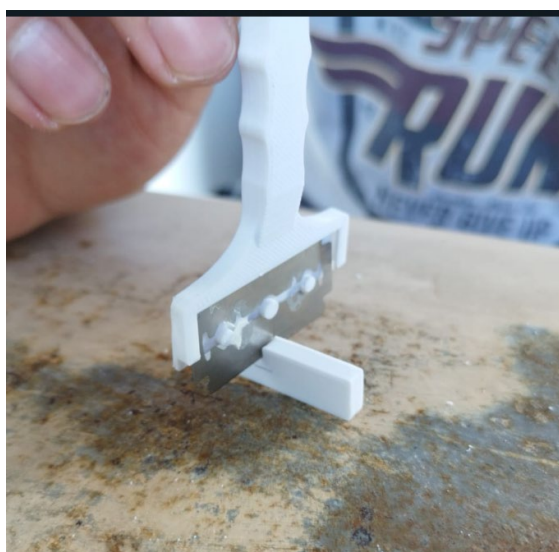


Figura 2. 21 Método manual para inserción de pre-grieta. [Fuente: propia]

Para introducir una pre-grieta manualmente en todas las probetas impresas en 3D se requiere de una base sólida donde se pueda apoyar las probetas para posteriormente utilizar una cuchilla e introducir la pre-grieta controlando su profundidad. Todas y cada una de las probetas (Figura 2.22) fueron señaladas acorde a la necesidad de control del tamaño de la pre-grieta a insertarse.

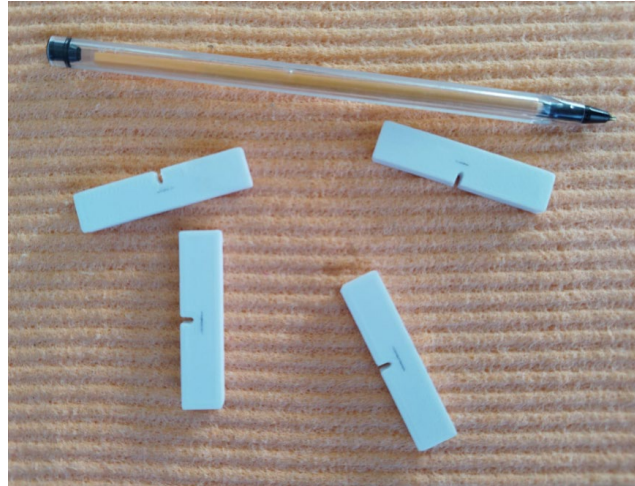


Figura 2. 22 Probetas señaladas listas para inserción de pre-grieta. [Fuente: propia]

2.3.3 Evaluación de la tenacidad a la fractura de las probetas de PLA

Para la evaluación efecto de las dos condiciones de impresión 3D seleccionadas para el análisis de tenacidad a la fractura de las probetas de PLA, se empleó la norma ASTM D5045-14, se procedió a verificar que las dimensiones de las probetas cumplan lo establecido según la norma (ver Figura 2.23) y las dimensiones elegidas en el Anexo I. Además, se comprobó que las dimensiones estén dentro de los rangos permitidos por la máquina de ensayos utilizada.

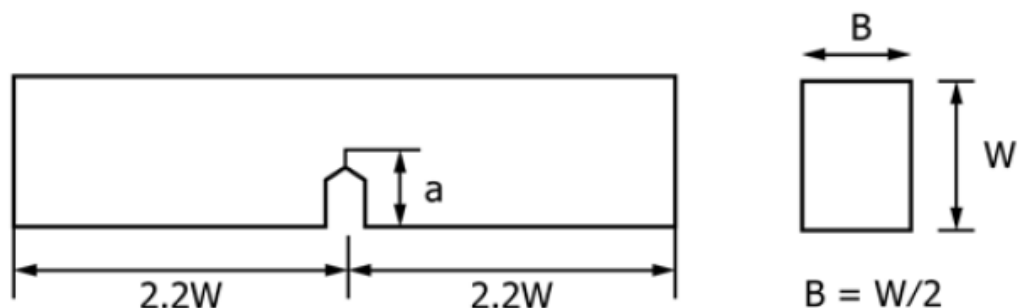


Figura 2. 23 Dimensiones de probetas según ASTM D5045-14 [59]

Se realizó un ensayo de tenacidad a la fractura de acuerdo con la norma ASTM D5045-14, se utilizó una máquina universal de ensayos Tinius Olsen 25kN, presentada en la Figura 2.24.

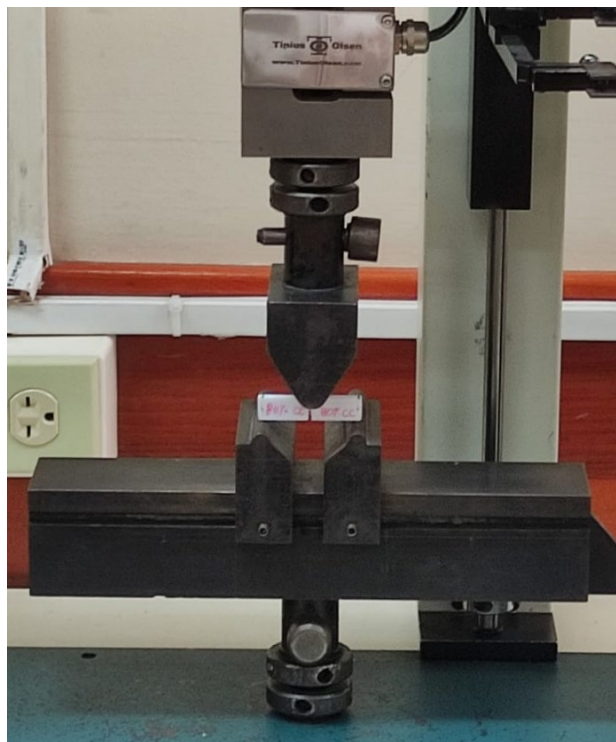


Figura 2. 24 Ubicación de probetas en máquina universal de ensayos. [Fuente: propia]

La máquina universal de ensayos permite aplicar la carga en dirección paralela al entalle y pre-grieta de las diferentes probetas, obteniendo así los valores de carga máxima que soporta cada probeta, considerando las dimensiones individuales. La Figura 2.25 ilustra una probeta fracturada posterior al ensayo realizado, se puede visualizar que la cara donde se apoyó el cabezal móvil de la máquina universal de ensayos posee una ligera curvatura, además de la fractura presente.

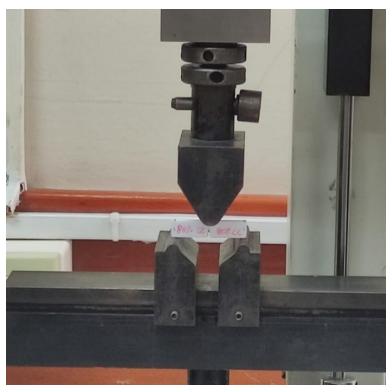


Figura 2. 25 Probeta post-ensayo de tenacidad a la fractura. [Fuente: propia]

2.3.4 Determinación de tenacidad a la fractura

Se procedió a recopilar datos previos y posteriores a la realización del ensayo en la máquina universal, considerando las dimensiones de la probeta ensayada (incluyendo parámetros de entalle y pre-grieta), tal y como se muestra en el Anexo I, para una posterior tabulación que permitirá el cálculo de la tenacidad a la fractura.

Del ensayo de tenacidad a la fractura se procedió a tabular los valores de carga y desplazamiento del cabezal móvil para la construcción de gráficas carga vs desplazamiento (Figura 2.26), se aprecia también la obtención de P_Q . El valor obtenido fue analizado con base en la condición de linealidad, siempre y cuando la curva graficada a partir de los datos esté dentro del rango de la recta AB, en cuyo caso se considera a P_{max} como P_Q , caso contrario se considerará una recta AB' cuya pendiente debe tener hasta un 5% de desviación. El valor establecido de P_Q es un parámetro de suma importancia para el cálculo de K_Q .

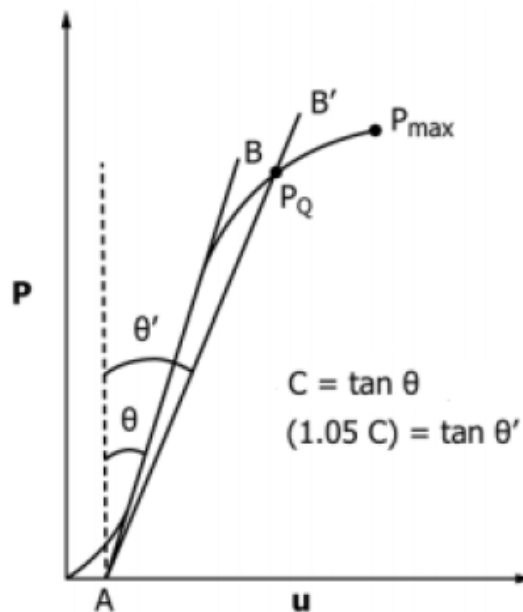


Figura 2. 26 Ejemplo de gráfica carga vs desplazamiento [46]

Se emplearon las siguientes ecuaciones para el cálculo de los valores preliminares y definitivos de K_{IC} :

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{\frac{3}{2}}} f(x) \quad (2.1)$$

Considerando:

$$f(x) = 6x^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)}{(1+2x)(1-x)^{\frac{3}{2}}} \right), x = \frac{a}{W} \quad (2.2)$$

$$0 < x < 1$$

$$B, a, (W - a) : > 2.5 \left(\frac{K_Q}{S_y} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde:

K_Q : Valor preliminar o final de K_{IC}

S_y : Resistencia a la fluencia del material

Se debe utilizar la ecuación (2.3) como comprobación del ensayo, en caso de verificar esta condición, se puede emplear el valor de K_Q como K_{IC} caso contrario se procederá a descartar el ensayo.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Impresión de probetas para ensayos de tenacidad a la fractura

Con la finalidad de verificar que las dimensiones preestablecidas en el diseño de las probetas, además de certificar la calidad del material empleado, se realizó la impresión de probetas de prueba. Esto por otra parte permitió comprobar las dimensiones del entalle y probar los métodos de introducción de la pre-grieta. Se presenta a continuación ciertos aspectos determinados por este proceso:

- Gracias al uso de un borde o falda (brim), como se mencionó en la sección 2.3.1, se logró una correcta adherencia a la superficie de impresión, pero, se requiere del uso de la herramienta mototool para eliminar este auxiliar de impresión y generar una superficie uniforme que no provoque concentradores de esfuerzos al utilizar los apoyos de la máquina universal de ensayos.
- Se observa que la forma de entalle (ya detallado e introducido en la impresión 3D, sin necesidad de un maquinado posterior) es adecuada y posee una punta ideal para la inserción de la pre-grieta.
- El acabado superficial de las caras paralelas a la superficie de impresión es similar y apropiado para la visualización de la propagación de la grieta, considerando el color blanco seleccionado para este trabajo.
- Se consideró que la dimensión “ a ” del entalle esté de acuerdo con lo mínimo establecido en la norma, es decir 1.5mm, ya que esto permitió que la propagación de la grieta sea fácilmente apreciable durante la observación utilizando el microscopio óptico para obtener las correspondientes macrografías.

Por lo tanto, se concluye que las probetas impresas de PLA impresas en 3D presentaron la calidad superficial deseada, sin presencia de rebabas o desfase de capas y estabilidad dimensional. Resultados similares fueron obtenidos en los trabajos de Milovanovic et al. [33] y Rahmatabadi et al.[29], presentados previamente en la Sección 1.5.0, Tabla 1.2.

3.2 Definición de método y proceso de introducción de la pre-grieta en probetas de tenacidad a la fractura

Posterior a las pruebas preliminares definidas en la sección 2.3.2 se determinó que el método a emplearse para la introducción de la pre-grieta en las probetas de PLA impresas en 3D fue el mecanismo de inserción manual, utilizando una herramienta de sujeción de cuchillas. El uso de un método que emplea una herramienta de esta forma no se ha reportado en trabajos anteriores, ya que la inserción de pre-grietas en las probetas según lo reportado en bibliografía solo se realizaba con pinzas comunes para una sujeción de las cuchillas de manera segura.

De esta forma, con la utilización del método manual, se logró generar pre-grietas con una profundidad aproximada de 1.5 mm, valor requerido según lo establecido en la norma ASTM D5045-14. Es importante notar que, el control de la profundidad fue el factor determinante para la selección de este método.

Cabe recalcar que se buscó la utilización de un mecanismo para inserción de pre-grieta como se observó en la investigación de S. Poveda y S. Sandoval[30], quienes construyeron dicho mecanismo con base en el trabajo de Patterson et al.[31]. Este dispositivo fue útil para generar pre-grietas en probetas de resina epóxica y materiales compuestos de esta matriz termoestable, materiales altamente rígidos y mucho más frágiles que las probetas de PLA.

Posterior a las pruebas preliminares de introducción de la pre-grieta, se observó que el método por mecanismo de impacto no permitía controlar el tamaño de la misma, y a su vez, en ciertos casos generaba una fractura total de la probeta. Por lo tanto, se procedió a descartar este método.

El proceso de inserción de pre-grieta en forma manual requiere de consideraciones importantes como el uso de la herramienta de sujeción de cuchillas que se puede observar en la Figura 2.5 y su uso en la Figura 2.21. Se debe tomar las precauciones necesarias para evitar el riesgo de cortes y mantener una dirección fija en la pre-grieta [60].

3.3 Evaluación de la tenacidad a la fractura de las probetas de PLA - Cálculo de K_{IC}

Mediante el uso de las ecuaciones (2.1) y (2.2) se procedió a calcular los valores de variables y funciones requeridos para el cálculo de K_{IC} , además, mediante la aplicación de la ecuación (2.3) se comprobó si los resultados obtenidos están dentro de la condición establecida para esta ecuación. Para ello, se realizó la codificación de los parámetros de impresión detallada en la Tabla 3.1 y posteriormente, los datos para verificar la condición establecida en la ecuación (2.3) se tabularon en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 1 Codificación de probetas para los resultados de tenacidad a la fractura.

CÓDIGO			Definición
DÍGITO 1	DÍGITO 2	DÍGITO 3*	
6	C	n	Densidad de relleno 60 % - Patrón de relleno: Concéntrico
6	G	n	Densidad de relleno 60 % - Patrón de relleno: Giroide
8	C	n	Densidad de relleno 80 % - Patrón de relleno: Concéntrico
8	g	n	Densidad de relleno 80 % - Patrón de relleno: Giroide

* En la tabla "n" representa el número de probeta según el orden en que fueron ensayadas.

Tabla 3. 2 Resultados tabulados según la norma ASTM D5045-14.

	Tipo	Código	B	W	(W-a)	P_Q	f(x)	K_Q	$2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$	Cumple la norma
			[cm]	[cm]	[m]	[kN]		[MPa x \sqrt{m}]		
1	60cc	6C1	0.49	1.01	0.51	0.14	10.48	2.87	0.07	Sí
2		6C2	0.51	1	0.5	0.13	10.65	2.66	0.06	Sí
3		6C3	0.49	1.01	0.51	0.15	10.48	3.16	0.09	Sí
4		6C4	0.5	1.02	0.52	0.15	10.33	3.03	0.08	Sí
5	80cc	8C1	0.5	1	0.5	0.15	10.65	3.20	0.09	Sí
6		8C2	0.5	1	0.5	0.14	10.65	3.02	0.08	Sí
7		8C3	0.49	1.01	0.51	0.13	10.48	2.86	0.07	Sí
8		8C4	0.49	1.02	0.52	0.14	10.33	3.01	0.08	Sí
9	60gy	6G1	0.48	1.02	0.52	0.16	10.33	3.50	0.11	Sí
10		6G2	0.48	1	0.5	0.19	10.65	4.20	0.16	Sí
11		6G3	0.5	1.01	0.51	0.16	10.48	3.30	0.10	Sí
12		6G4	0.49	1.01	0.51	0.16	10.48	3.42	0.11	Sí
13	80gy	8G1	0.49	1.02	0.52	0.19	10.33	3.93	0.14	Sí
14		8G2	0.49	1	0.5	0.18	10.65	3.86	0.13	Sí
15		8G3	0.5	1.02	0.52	0.20	10.33	4.07	0.15	Sí
16		8G4	0.48	1	0.5	0.19	10.65	4.22	0.16	Sí

Como se detalla en la Tabla 3.2, todas las probetas ensayadas cumplieron las 3 condiciones necesarias para su aprobación, se ha de considerar dentro de las conclusiones que existen valores límite que podrían justificarse por incrustaciones de material en las capas de relleno o a su vez presencia de humedad dentro del filamento de PLA utilizado.

Es importante mencionar que, valores de K_Q , que como se demostró corresponden efectivamente a la tenacidad a la fractura K_{IC} , son similares a los reportados en la literatura en los trabajos de Srinivasan et al. [45] y Khan et al. [43], de la Tabla 1.2. del estudio de casos para probetas de PLA impresas en 3D. En el caso, del patrón giroide, de los estudios descritos en la literatura indicados por Silva et al. [21], y Milovanovic et al. [44], se observa que el valor de K_{IC} es mayor para dicho patrón, revelando con ello que el patrón de relleno giroide, presenta beneficios para el análisis de tenacidad a la fractura de elementos impresos en 3D, utilizando PLA.

3.4 Resultados visuales de ensayos de tenacidad a la fractura (propagación de la grieta)

Gracias al uso del microscopio óptico se obtuvo macrográficas, que permitieron visualizar la uniformidad de la propagación de las grietas en las distintas probetas que fueron ensayadas en base a la norma ASTM D5045-14. En la Figura 3.1 se presenta un ejemplo de macrografía obtenida para una probeta 80CC, gracias a la utilización del software integrado del microscopio OLYMPUS. Se observa que la dimensión de la grieta propagada corresponde en este caso a 9,208 mm, y se encuentra dentro de los valores esperados por la norma.

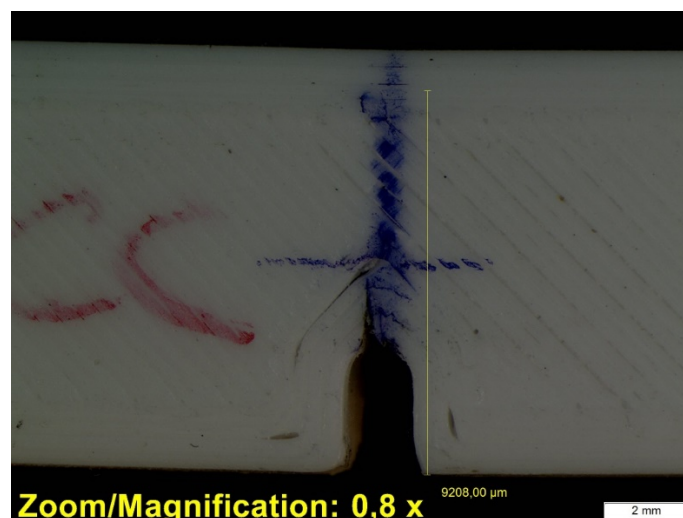


Figura 3. 1 Ejemplo de macrografía 80CC [Fuente: propia].

En los Anexos II, III, IV y V se presentan las macrográficas de las probetas 80 y 60 % de relleno con patrones concéntrico y giroide, respectivamente. En tales probetas también se pueden apreciar las medidas computarizadas obtenidas para el tamaño de grieta. En el trabajo de Silva et al. [21], también se observó la propagación de grietas en el rango de dimensiones obtenido en este trabajo, con lo cual se corrobora que el método de inserción de la pre-grieta y las condiciones del ensayo mecánico realizado permiten la generación de datos de tenacidad a la fractura comparables con otros estudios.

Considerando la dirección de las fibras de PLA en capas superficiales, además de los patrones de relleno utilizados, se puede apreciar en las macrográficas obtenidas que, la propagación de las grietas en probetas de PLA se mantiene uniforme en gran parte de los casos, considerando excepciones de máximo una entre 16 probetas, según los lotes realizados para todos los ensayos, como la probeta 6G1, de la Tabla 3.2, presentada en la macrografía de la Figura B.9, del Anexo IV.

Las diferentes combinaciones de condiciones de impresión (sin determinar la más adecuada), dentro del alcance de este trabajo, presentan propagaciones uniformes en las grietas producidas, considerando la inserción de pre-grieta en cada una de las probetas ensayadas. Cabe recalcar que, para ensayos preliminares no se utilizó probetas con pre-grieta, aun así, se visualizó grietas uniformes en direcciones casi paralelas al entalle introducido.

La utilización de tinta de color, además de fondos acorde a la dirección de la luz del microscopio, adicional a los parámetros que el software integrado del microscopio permite una mejor visualización de la grieta. Además de la dirección de propagación, en las macrográficas de los Anexos del II al V, se aprecia, que las probetas no exhiben ramificaciones de las grietas que puedan comprometer la integridad estructural total del elemento analizado.

3.5 Relación Carga – Desplazamiento en probetas ensayadas

En la Figura 3.2 se aprecia que, para el grupo de probetas con condición 60% de relleno – patrón concéntrico (código 6Cn), el rango de carga máxima varía desde 122 hasta 144 [N]. Para este grupo de estudio, el valor calculado de K_Q es de $2.93 \pm 0.13 [MPa\sqrt{m}]$. Posterior a la validación de resultados del ensayo se comprobó su validez, determinando así que los valores de K_Q corresponden a los valores de K_{IC} , conforme indicado anteriormente.

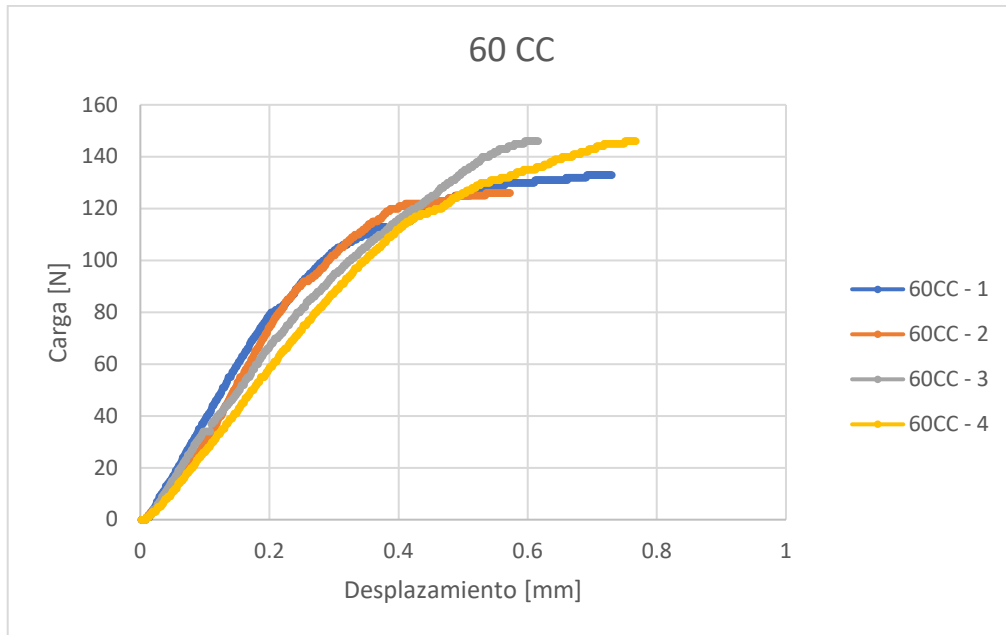


Figura 3. 2 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 60CC [Fuente: propia].

Las curvas presentadas en la Figura 3.4 no exhiben desviaciones considerables entre la tendencia de las 4 probetas ensayadas. Por lo tanto, se puede asumir que el método de manufactura que ya incluye el entalle en las probetas y el método de introducción de las pre-grietas fueron uniformes. Además, el material utilizado no fue alterado de ninguna forma, generando así valores de comprobación dentro de los rangos de la norma.

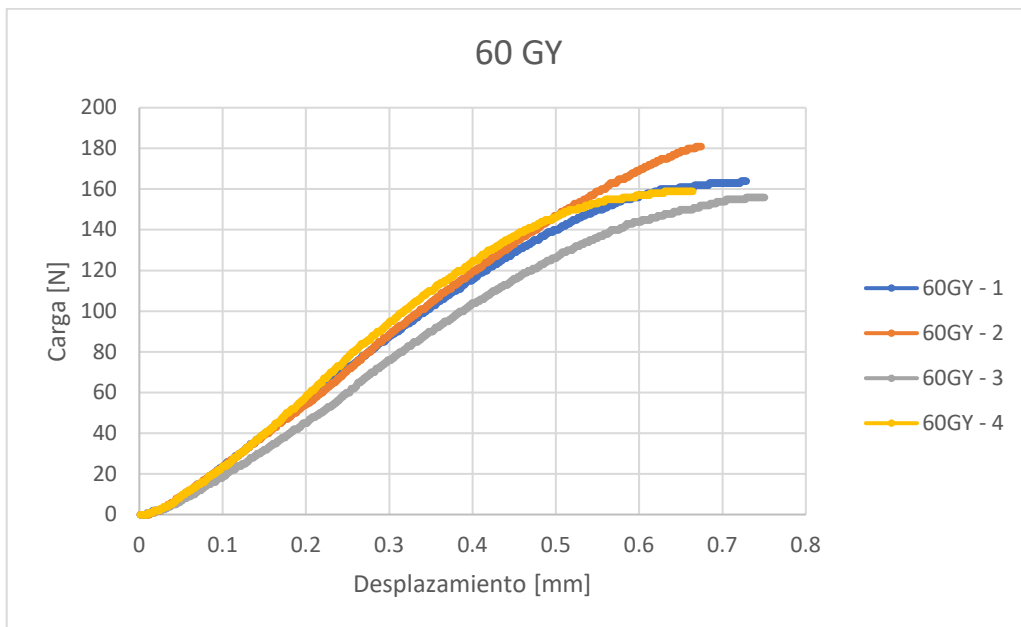


Figura 3. 3 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 60GY [Fuente: propia].

En la Figura 3.5 para el grupo de probetas con condición 60% de relleno – patrón giroide, que el rango de carga máxima varía desde 148 hasta 182 [N]. Para este grupo, el valor calculado de K_Q es de $3.61 \pm 0.48 [MPa\sqrt{m}]$. Posterior a la validación de resultados del ensayo se comprobó su validez, determinando así que los valores de K_Q corresponden a los valores de K_{IC} .

Las curvas de la Figura 3.3 presentan mayor uniformidad en comparación con el grupo 60% concéntrico de la Figura 3.2, considerando su patrón giroide. Por lo tanto, se puede apreciar que para el presente estudio la distribución de fibras de este patrón genera mejores resultados con base a las configuraciones tanto de impresión como las utilizadas en el ensayo en máquina universal. Resultados similares fueron observados en el trabajo de Milovanovic et al.[44], que evaluó la tenacidad a la fractura de probetas de PLA impresas en 3D empleando una densidad de relleno del 60 % y patrón giroide, donde se describió que el patrón giroide es mejor debido a la uniformidad en la propagación de grietas, además de un consumo óptimo de material en relación con otros patrones de relleno.

Para el grupo de probetas ensayadas con condición 80% de relleno – patrón concéntrico (Figura 3.6), el rango de carga máxima varía desde 132 hasta 151 [N]. Para este grupo, el valor calculado de K_Q es de $3.02 \pm 0.05 [MPa\sqrt{m}]$. Posterior a la validación de resultados del ensayo se comprobó su validez, determinando así que los valores de K_Q corresponden a los valores de K_{IC} .

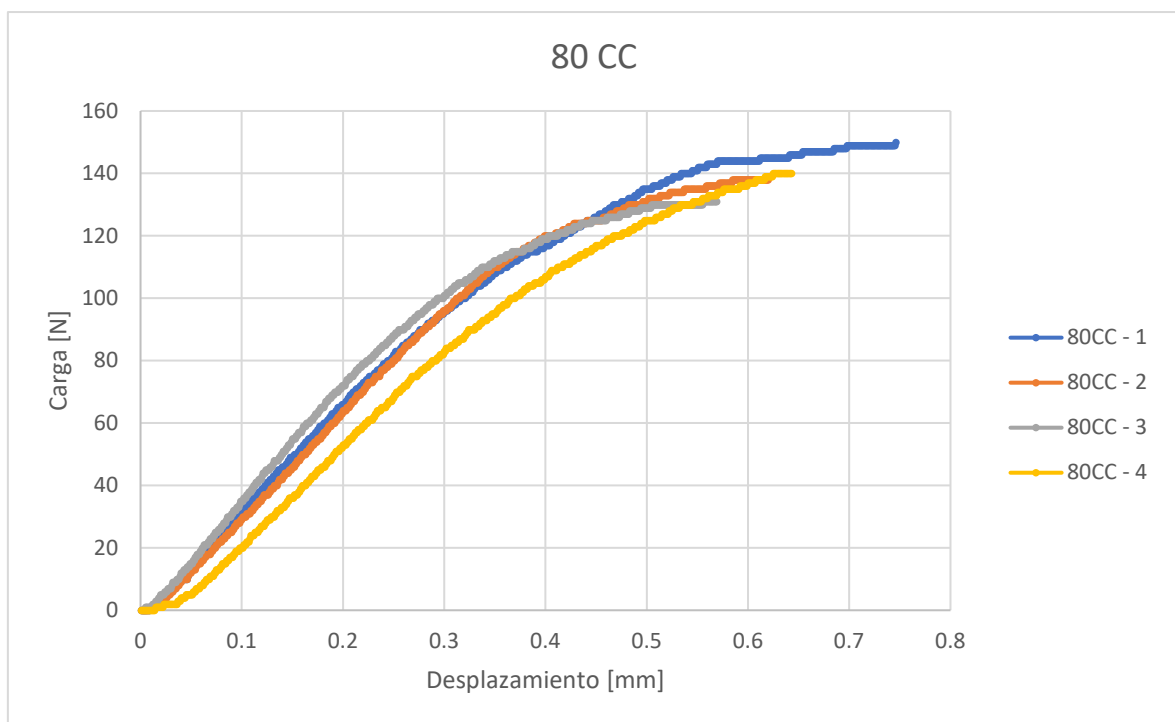


Figura 3. 4 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 80CC [Fuente: propia].

Considerando un aumento del 20% en la densidad de relleno, en comparación con el grupo 60% concéntrico, este grupo de probetas presenta curvas bastante uniformes tanto en rangos máximos como en forma, en comparación con el grupo 60% giroide que presenta rangos de carga máxima inferiores. Una posible explicación a este comportamiento radica en el hecho que, una densidad de relleno mayor permitirá la generación de capas con mayor espacio de contacto entre sí. Una tendencia similar en resultados fue observada también en el trabajo de Silva et al.[21]

En la Figura 3.7 se observa que, para el grupo de probetas con condición 80% de relleno – patrón giroide, el rango de carga máxima varía desde 175 hasta 197 [N]. Para este grupo, el estudio, el valor calculado de K_Q es de $4.02 \pm 0.07 [MPa\sqrt{m}]$. Posteriormente a la validación de resultados del ensayo se comprobó su validez, determinando así que los valores de K_Q corresponden a los valores de K_{IC} .

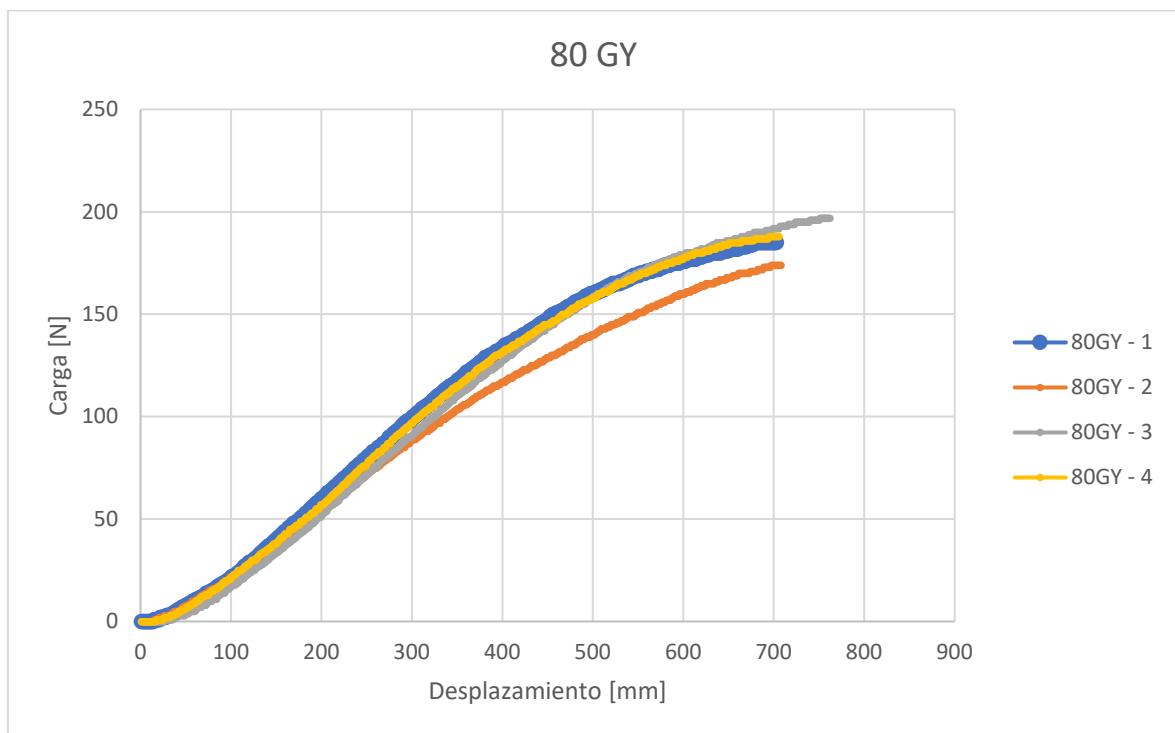


Figura 3. 5 Curva carga vs. desplazamiento en probetas ensayadas tipo 80GY [Fuente: propia].

Finalmente, considerando los resultados tabulados en la Tabla 3.2, se puede apreciar un rango de K_{IC} , de 2.66 hasta $4.22 [MPa\sqrt{m}]$, considerando los datos utilizados para los cálculos, se observan valores normales de tenacidad a la fractura de las probetas de PLA

impresas en 3D, en comparación con distintos polímeros que podrían ser utilizados para aplicaciones similares, considerando también las técnicas de fabricación utilizadas.

Considerando el trabajo de Gardan et al.[27], donde se realiza un ensayo con probetas a PLA (densidad de relleno 80%, patrón de relleno giroide), y las normas y parámetros distintos, al realizar una comparación se aprecian rangos similares en la carga soportada por probetas con patrones de impresión sin optimizar.

El hecho de generar parámetros de resistencia en la zona de fractura de las probetas reportadas en el estudio de Gardan et al.[27], provoca un incremento de hasta 150% en la carga soportada por las probetas, ampliando así su valor de K_{IC} . Así, este estudio amplía los conocimientos para la utilización de elementos impresos en 3D con refuerzos en zonas donde se conoce de antemano que existirán fracturas.

Si se compara por otra parte, al PLA (termoplástico) con otros materiales poliméricos, este presenta características superiores de tenacidad a la fractura, por ejemplo, en la investigación de Poveda y Sandoval [30], se realizan ensayos de tenacidad a la fractura bajo la misma norma (ASTM D5045-14), en probetas de resina epoxi reforzada con nanoestructuras de Titania, se aprecian resultados inferiores considerando que es un material termoestable con proceso de fabricación por molde y una posible distribución interna completamente simétrica, reduciendo su tenacidad a la fractura. Las aplicaciones consideradas para los materiales deberán ser completamente distintas, basándose en los parámetros y caracterización de los polímeros utilizados.

Por lo tanto, en la Figura 3.6 se observa que, para efectos prácticos, un patrón de relleno del 60 % y configuración giroide presenta resultados de tenacidad a la fractura similares a los obtenidos para una densidad de relleno del 80 %, utilizando el mismo patrón de impresión. Esto genera un ahorro de material del 20%, lo cual tiene un impacto en costos de producción de elementos y componentes mecánicos significativo, considerando la desviación estándar de las probetas ensayadas. Por otro lado, de igual forma, los resultados de tenacidad a la fractura fueron prácticamente los mismos para el 60 y 80 % de relleno cuando el patrón geométrico utilizado fue concéntrico (ver Figura 3.6).

Dicho patrón, independientemente de la densidad analizada en este estudio, presentó valores más bajos de tenacidad a la fractura que el correspondiente patrón giroide. Nuevamente, vale la pena recalcar que el patrón giroide, debido a su geometría de capas de PLA dispuestas en patrones repetitivos tipo “ola de mar” fue superior debido a la forma en cómo una grieta se propaga, además del espacio entre capas y la reducción de espacios

vacíos internos, conforme mencionado anteriormente. Esto valida la selección de este patrón de impresión en el presente trabajo.

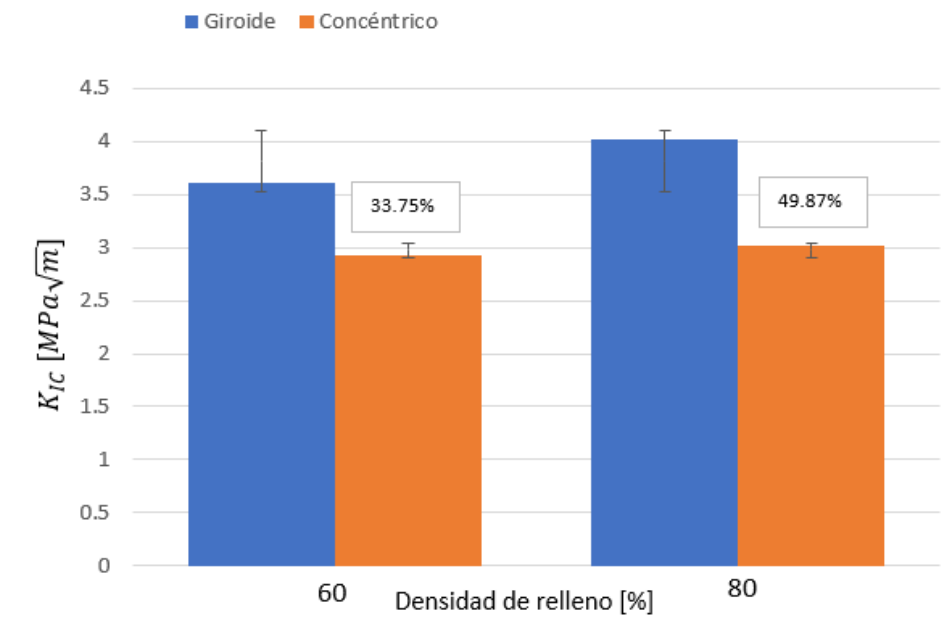


Figura 3. 6 Gráfico comparativo de tenacidad a la fractura (densidad/patrón de relleno) [Fuente: propia].

3.6 Conclusiones

En el presente trabajo se evaluó la tenacidad a la fractura de probetas de PLA impresas en 3D preparadas con dos condiciones de impresión, sin exposición a ambiente de degradación salino, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- De los distintos parámetros de impresión (velocidad, densidad y patrón de relleno, etc.) se identificó que i) el patrón de relleno y ii) densidad de relleno, tienen una influencia significativa en la tenacidad a la fractura de probetas de PLA, a través de una revisión bibliográfica. Se utilizó la combinación de los parámetros de impresión: densidad y patrón de relleno, generando así probetas con densidades de 80 y 60% con patrones concéntrico y giroide, para analizar su tenacidad a la fractura y establecer una condición óptima de impresión.
- La metodología empleada consideró los parámetros predeterminados por el software slicer, junto con las condiciones seleccionadas, además de la realización de un corto análisis de vibraciones de la superficie de apoyo de la impresora, para evitar desviaciones en las capas iniciales de impresión. Así, esta metodología de impresión permitió generar uniformidad en las probetas impresas. Se consideró además la utilización de herramientas adicionales auxiliares para remover completamente el borde de adherencia y evitar alteraciones en los valores obtenidos en los ensayos mecánicos debido a defectos en la superficie.
- En el presente trabajo se definió que el mejor método para introducción de pre-grietas en las probetas de PLA fue el método de inserción manual, a diferencia de métodos aplicando mecanismos de impacto, reportados en la literatura para polímeros termoestables como la resina epóxica y sus materiales compuestos. Al ser el PLA un material termoplástico, que experimenta un mayor nivel de deformación que los polímeros termoestables, el método empleado permitió tener un control de las dimensiones de la pre-grieta, conforme demostrado en la Tabla 3.2, donde se comprobó que para el ensayo realizado las pre-grietas se encontraban dentro de los límites establecidos por la norma ASTM D5045-14.
- Una densidad de relleno del 60 % y patrón de impresión giroide presenta resultados de tenacidad a la fractura similares a los obtenidos para una densidad de relleno del 80 %, utilizando el mismo patrón de impresión. Esto genera un ahorro de material del 20%, lo cual tiene un impacto en costos de producción de elementos y componentes mecánicos significativo. De igual forma, los resultados de tenacidad a la fractura fueron prácticamente los mismos para el 60 y 80 % de relleno cuando el patrón geométrico utilizado fue concéntrico. Dicho patrón, independientemente

de la densidad analizada en este estudio, presentó valores más bajos de tenacidad a la fractura que el correspondiente patrón giroide. Por tanto, se concluye que la combinación 60% densidad de relleno – patrón giroide, son las condiciones de impresión óptimas para la manufactura de probetas de tenacidad a la fractura, con el consecuente ahorro de material y reducción de tiempo de impresión.

3.7 Recomendaciones

- Determinar la influencia de parámetros de densidad de relleno inferiores al 60% (40 y 50%, por ejemplo) y su influencia en la tenacidad a la fractura, considerando que los parámetros y elementos impresos en 3D no requieren de un relleno total en su interior.
- Considerar la influencia del calentamiento de la cuchilla utilizada para inserción de pre-grietas, debido a la dificultad que se tiene para generar este parámetro con la dimensión establecida de forma manual, además de buscar un método adecuado para medir si la pre-grieta es uniforme en toda la arista del entalle, durante el proceso de inserción.
- Considerar parámetros de optimización en impresión 3D para caracterización mecánica del material, analizando la influencia de rellenos específicos en las zonas de evaluación para ensayos de flexión, torsión y tenacidad a la fractura.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Moreno Nieto, M. Alonso-García, M. A. Pardo-Vicente, and L. Rodríguez-Parada, "Product Design by Additive Manufacturing for Water Environments: Study of Degradation and Absorption Behavior of PLA and PETG," *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 1036, vol. 13, no. 7, p. 1036, Mar. 2021, doi: 10.3390/POLYM13071036.
- [2] Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, and C. Yan, "A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019 102:9, vol. 102, no. 9, pp. 2877–2889, Feb. 2019, doi: 10.1007/S00170-019-03332-X.
- [3] A. R. Torun, E. C. Yıldız, Ş. H. Kaya, and N. Choupani, "Mixed-mode fracture behavior of 3D-printed PLA with zigzag filling," *Green Mater*, vol. 9, no. 1, pp. 29–36, May 2020, doi: 10.1680/JGRMA.20.00013/ASSET/IMAGES/SMALL/JGRMA9-0029-F9.GIF.
- [4] R. Kumar, R. Singh, and I. Farina, "On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications," *PSU Research Review*, vol. 2, no. 2, pp. 115–137, Dec. 2018, doi: 10.1108/PRR-07-2018-0018/FULL/PDF.
- [5] S. Sharafi, M. H. Santare, J. Gerdes, and S. G. Advani, "A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites," *Addit Manuf*, vol. 38, p. 101830, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101830.
- [6] K. Hamad, M. Kaseem, H.W. Yang, F. Deri, and Y. G. Ko, "Properties and medical applications of polylactic acid: A review," www.expresspolymlett.com, 2015.
- [7] "Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications - Lee Tin Sin - Google Libros." https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=atexWMS35UkC&oi=fnd&pg=PP1&dq=pla+applications&ots=cfCB34SrNh&sig=3ZZ9Uf9Mlfp2yzHFI33rHuyngUg&redir_esc=y#v=onepage&q=pla%20applications&f=false (accessed Jan. 14, 2023).
- [8] "▷ PLA vs ABS. La comparativa definitiva 2020 - Bitfab." <https://bitfab.io/es/blog/pla-vs-abs/> (accessed Jan. 14, 2023).
- [9] E. H. Baran and H. Yildirim Erbil, "Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review," *Colloids and Interfaces* 2019, Vol. 3, Page 43, vol. 3, no. 2, p. 43, Mar. 2019, doi: 10.3390/COLLOIDS3020043.
- [10] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107. Elsevier B.V., pp. 367–392, Dec. 15, 2016. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [11] E. Kostidi and N. Nikitakos, "Is It Time for the Maritime Industry to Embrace 3d Printed Spare Parts?," *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 12, no. 3, pp. 557–564, Nov. 2018, doi: 10.12716/1001.12.03.16.
- [12] K. B. Mustapha and K. M. Metwalli, "A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites," *European Polymer Journal*, vol. 156. Elsevier Ltd, Aug. 05, 2021. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110591.
- [13] S. Sharafi, M. H. Santare, J. Gerdes, and S. G. Advani, "A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites," *Additive Manufacturing*, vol. 38. Elsevier B.V., Feb. 01, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2020.101830.
- [14] J. Bergsma, M. van der Zalm, J. Pruynt, J. M. Bergsma, and J. F. J. Pruynt, "3D-Printing and the Maritime Construction Sector Improving the competitiveness of

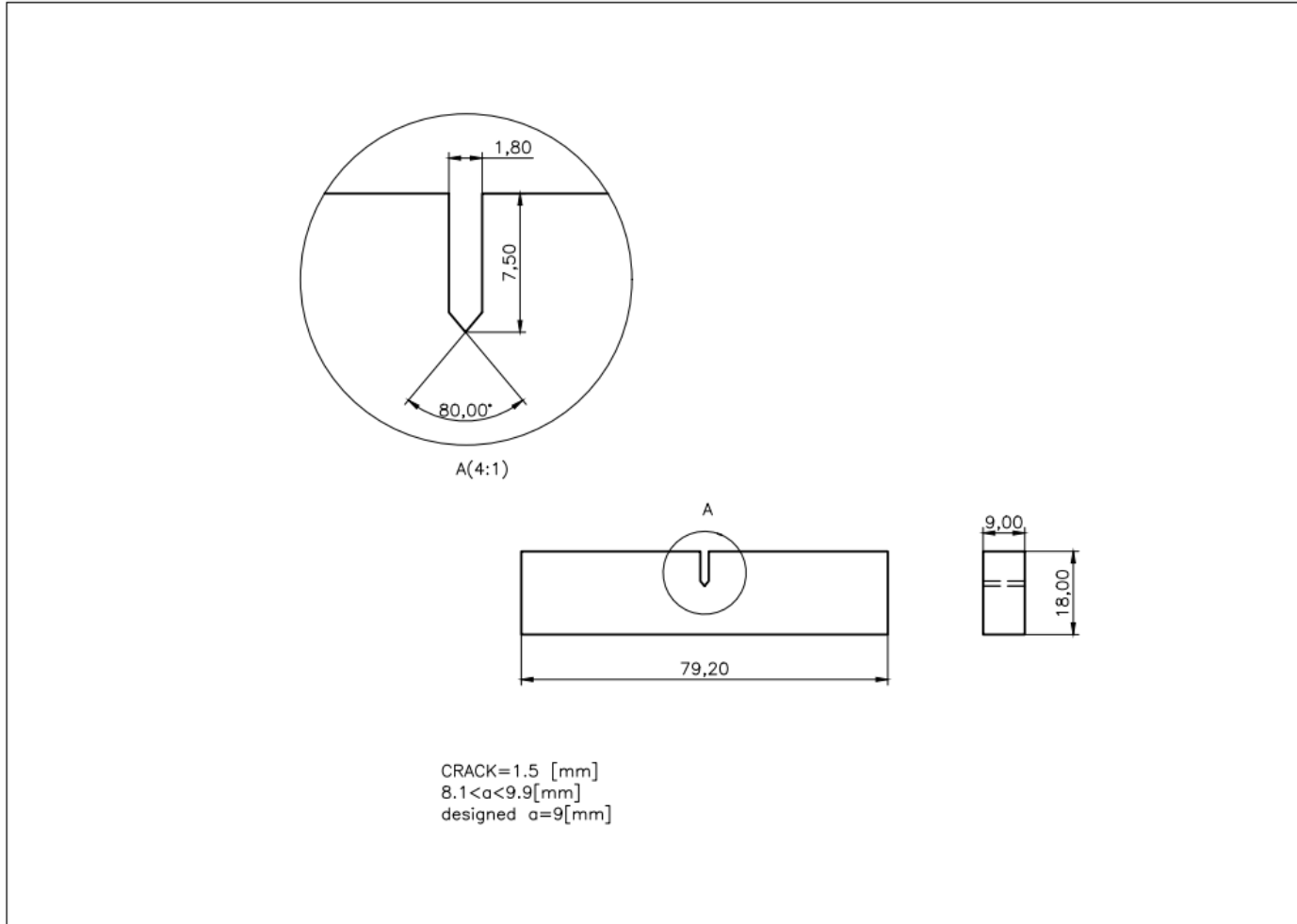
- green ship recycling View project CGT determination for ships View project SEE PROFILE 3D-Printing and the Maritime Construction Sector,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308674408>
- [15] K. Bayramoğlu, K. Deniz KAYA, S. Yilmaz, B. Göksu, and B. Murato, “UTILIZATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN MARINE APPLICATIONS”.
- [16] V. G. Gokhare, D. N. Raut, and D. K. Shinde, “A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing.” [Online]. Available: www.ijert.org
- [17] M. Eisenberg, “3D printing for children: What to build next?,” *Int J Child Comput Interact*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.ijcci.2012.08.004.
- [18] J. Garrido et al., “3D printing as an enabling technology to implement maritime plastic Circular Economy,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 635–641. doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.089.
- [19] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, and A. Mustafa, “Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid,” *Polym Test*, vol. 87, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106557.
- [20] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K. Y. Lee, and V. L. Tagarielli, “Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA,” *Mater Des*, vol. 123, pp. 154–164, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.051.
- [21] C. Silva, A. I. Pais, G. Caldas, B. P. P. A. Gouveia, J. L. Alves, and J. Belinha, “Study on 3D printing of gyroid-based structures for superior structural behaviour,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 6, no. 4, pp. 689–703, Dec. 2021, doi: 10.1007/s40964-021-00191-5.
- [22] “Cura Gyroid Infill: All You Need to Know | All3DP.” <https://all3dp.com/2/cura-gyroid-infill/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [23] R. Colella, F. P. Chietera, and L. Catarinucci, “Analysis of fdm and dlp 3d-printing technologies to prototype electromagnetic devices for rfid applications†,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 3, pp. 1–13, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21030897.
- [24] “Designing and 3D printing continuous fibre-reinforced composites with a high fracture toughness - KU Leuven.” https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS1594230&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&fromSitemap=1 (accessed Jul. 04, 2022).
- [25] W. D. Callister and J. G. David Rethwisch, “MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING.”
- [26] M. Zouaoui, O. Saifouni, J. Gardan, A. Makke, N. Recho, and J. Kauffmann, “Improvement of fracture toughness based on auxetic patterns fabricated by metallic extrusion in 3D printing,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 42, pp. 680–686, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.12.086.
- [27] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, “A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2016, pp. 144–151. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.019.
- [28] A. Zolfagharian, M. R. Khosravani, and A. Kaynak, “Fracture resistance analysis of 3D-printed polymers,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/polym12020302.
- [29] D. Rahmatabadi, I. Ghasemi, M. Baniassadi, K. Abrinia, and M. Baghani, “3D printing of PLA-TPU with different component ratios: Fracture toughness, mechanical properties, and morphology,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 3970–3981, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.024.
- [30] S. Poveda Sotomayor and S. Sandoval Rivera, “EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA Y RESISTENCIA AL IMPACTO DE MATERIALES POLIMÉRICOS

- REFORZADOS CON NANOESTRUCTURAS A BASE DE TITANIA,” Quito, May 2021.
- [31] A. E. Patterson, C. Chadha, I. M. Jasiuk, and J. T. Allison, “Design and repeatability analysis of desktop tool for rapid pre-cracking of notched ductile plastic fracture specimens,” *Eng Fract Mech*, vol. 217, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.106536.
- [32] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,” *Adv Drug Deliv Rev*, vol. 107, pp. 367–392, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.ADDR.2016.06.012.
- [33] A. Milovanović et al., “Influence of printing parameters on the eligibility of plane-strain fracture toughness results for PLA polymer,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 41, pp. 290–297, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROSTR.2022.05.034.
- [34] S. A. Raj, E. Muthukumar, and K. Jayakrishna, “A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties,” *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 5, pp. 11219–11226, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2018.01.146.
- [35] “3D Print Infill Patterns Explained – The 3D Bros.” <https://the3dbros.com/3d-print-infill-patterns-explained/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [36] M. Nofar, D. Sacligil, P. J. Carreau, M. R. Kamal, and M. C. Heuzey, “Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 125. Elsevier B.V., pp. 307–360, Mar. 15, 2019. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.12.002.
- [37] W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, and M. Revilla-León, “3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review,” *J Dent*, vol. 109, p. 103630, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JDENT.2021.103630.
- [38] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, “Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling,” *International Journal of Fracture* 2017 210:1, vol. 210, no. 1, pp. 1–15, Dec. 2017, doi: 10.1007/S10704-017-0257-4.
- [39] K. Bayramoğlu, K. Deniz KAYA, S. Yilmaz, B. Göksu, and B. Murato, “UTILIZATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN MARINE APPLICATIONS.”
- [40] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, “A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 144–151, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROSTR.2016.06.019.
- [41] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, “Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling,” *Int J Fract*, vol. 210, no. 1–2, pp. 1–15, Mar. 2018, doi: 10.1007/s10704-017-0257-4.
- [42] J. Allum, A. Gleadall, and V. v. Silberschmidt, “Fracture of 3D-printed polymers: Crucial role of filament-scale geometric features,” *Eng Fract Mech*, vol. 224, p. 106818, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2019.106818.
- [43] A. S. Khan, A. Ali, G. Hussain, and M. Ilyas, “An experimental study on interfacial fracture toughness of 3-D printed ABS/CF-PLA composite under mode I, II, and mixed-mode loading:,” <https://doi.org/10.1177/0892705719874860>, vol. 34, no. 12, pp. 1599–1622, Sep. 2019, doi: 10.1177/0892705719874860.
- [44] A. Milovanovic et al., “Influence of printing parameters on the eligibility of plane-strain fracture toughness results for PLA polymer,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2022, pp. 290–297. doi: 10.1016/j.prostr.2022.05.034.

- [45] S. Srinivasan Ganesh Iyer and O. Keles, "Effect of raster angle on mechanical properties of 3D printed short carbon fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene," *Composites Communications*, vol. 32, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.coco.2022.101163.
- [46] C. Valean et al., "The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness," *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, pp. 1134–1139, 2020, doi: 10.1016/J.PROSTR.2020.11.128.
- [47] "Filamento PLA Blanco para impresión 3D marca PopBit 1.75mm 1Kg." <https://www.cimech3d.cl/producto/filamento-pla-blanco-para-impresion-3d-marca-popbit-1-75mm-1kg/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [48] "Artillery PLA 3D Printer Filament 1.75mm 1kg Spool +/-0.02mm High-quality filaments ABS TPU & PETG 1KG/case Packed Multi-colors Filamento White." <https://artillery3d.com/products/artillery-3d-printer-filament-pla-175mm-1kg-roll-high-quality-3d-filaments-abs-tpu-amp-petg-10kg-carton-multi-colors-filamento-impresora-32> (accessed Nov. 22, 2022).
- [49] "Impresora 3D Ender 3D Pro - 220*220*250 mm." <https://createc3d.com/es/productos/1077-impresora-3d-creality-3d-pro-220220250-mm.html> (accessed Nov. 22, 2022).
- [50] "Moto Tool Truper 150w Profes Moto-A2 17449." <https://fierros.com/productos/moto-tool-truper-150w-profes-moto-a2-17449> (accessed Nov. 22, 2022).
- [51] "Astra Razor Blade Holder by miquelmartin - Thingiverse." <https://www.thingiverse.com/thing:2024019> (accessed Nov. 22, 2022).
- [52] "Cuchillas de afeitar doble filo ASTRA acero inoxidable 10u - CARASA." <https://carasatienda.com/tijeras-navajas-y-recambios/cuchillas-de-afeitar-doble-filo-astra-acero-inoxidable-10u/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [53] S. Ganeshkumar et al., "Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3D-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS," *Materials*, vol. 15, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15155142.
- [54] "How Does The FDM 3D Printing Technology Work? - Manufactur3D." <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-3d-printing-technology/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [55] K. Li et al., "Behaviour of 3D printed PLA and PLA-PHA in marine environments," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 424, no. 1, p. 012013, Jan. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/424/1/012013.
- [56] M. Rismalia, S. C. Hidajat, I. G. R. Permana, B. Hadisujoto, M. Muslimin, and F. Triawan, "Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044041.
- [57] "What is Infill in 3D Printing - Detailed Guide 2021 - Robu.in | Indian Online Store | RC Hobby | Robotics." <https://robu.in/infill-in-3d-printing-explained/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [58] B. Wittbrodt and J. M. Pearce, "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components," *Addit Manuf*, vol. 8, pp. 110–116, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.09.006.
- [59] "Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials 1", doi: 10.1520/D5045-14.
- [60] P. Lanzillotti, J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, "Strengthening in fracture toughness of a smart material manufactured by 3D printing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1353–1358, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.08.342.

5 ANEXOS

ANEXO I PLANO DE PROBETAS



ANEXO II. MACROGRAFÍAS PROBETAS 80% CONCÉNTRICO

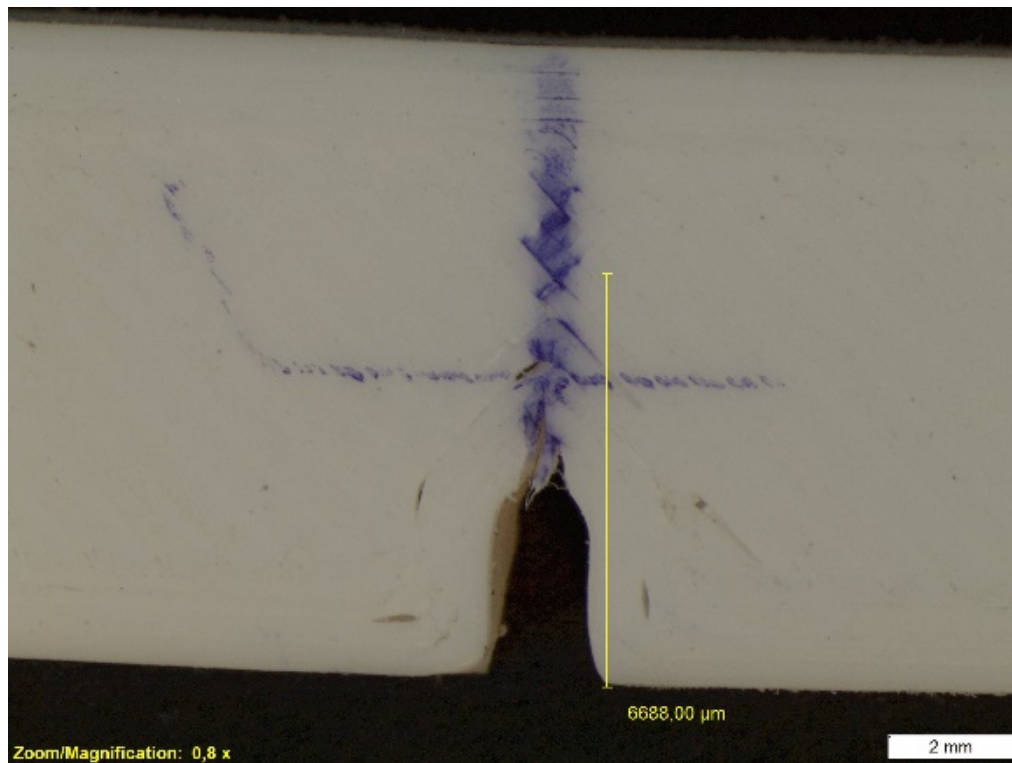


Figura B. 1 Macrografía 8C1 [Fuente: propia].

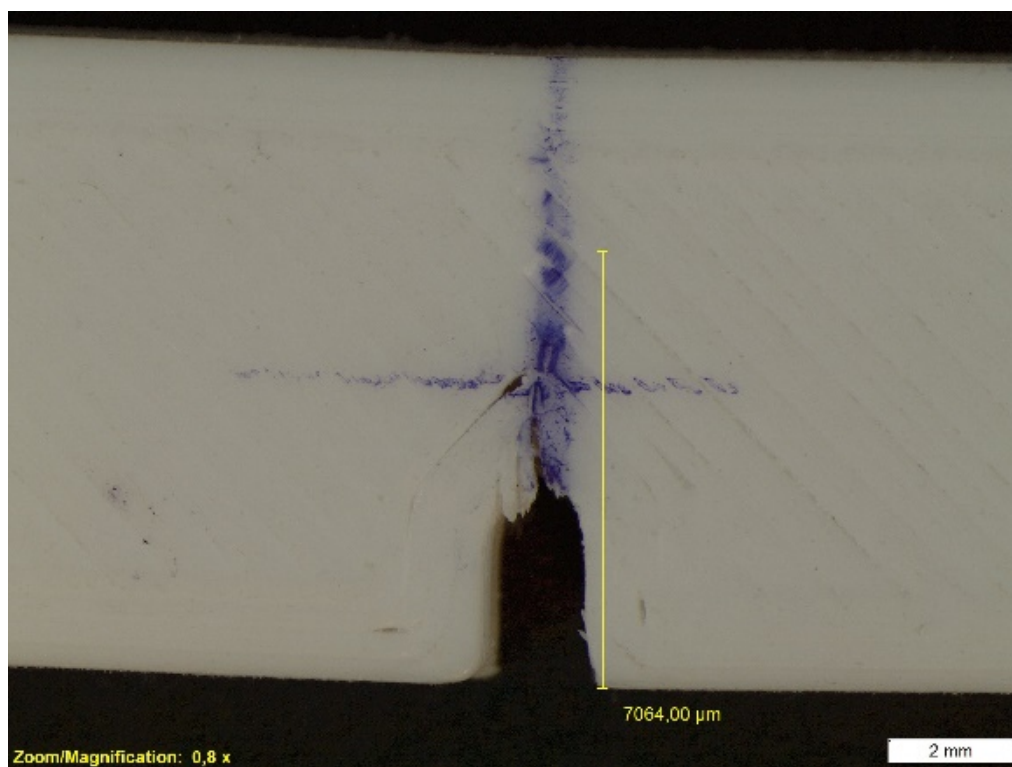


Figura B. 2 Macrografía 8C2 [Fuente: propia].

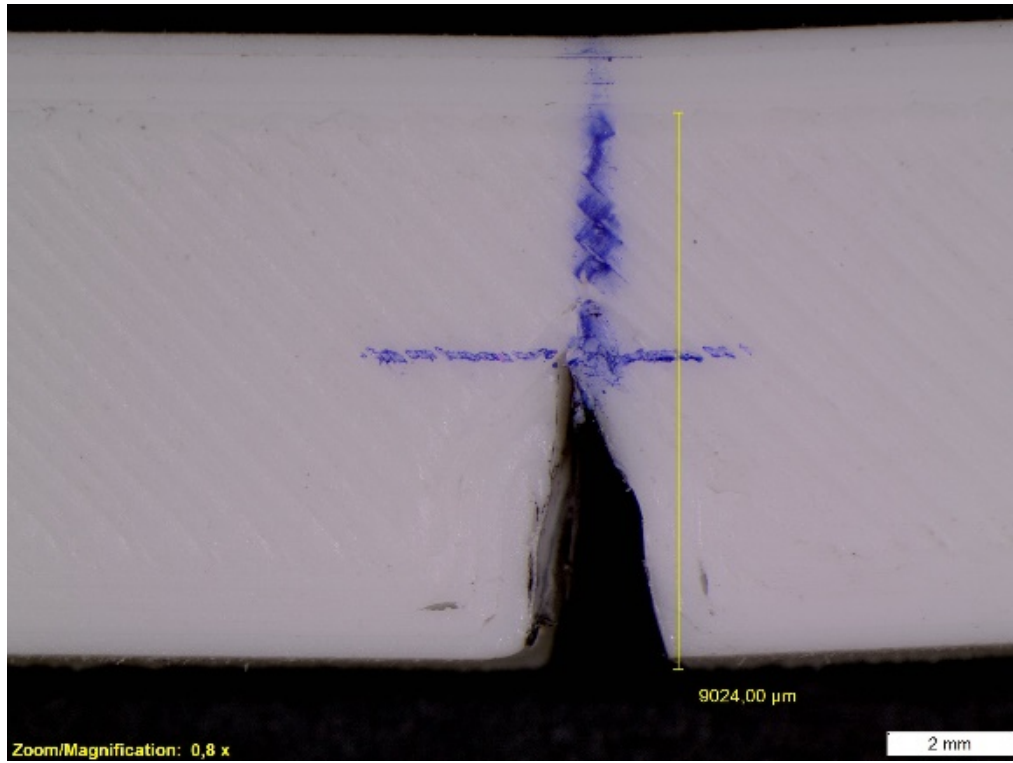


Figura B. 3 Macrografía 8C3 [Fuente: propia].

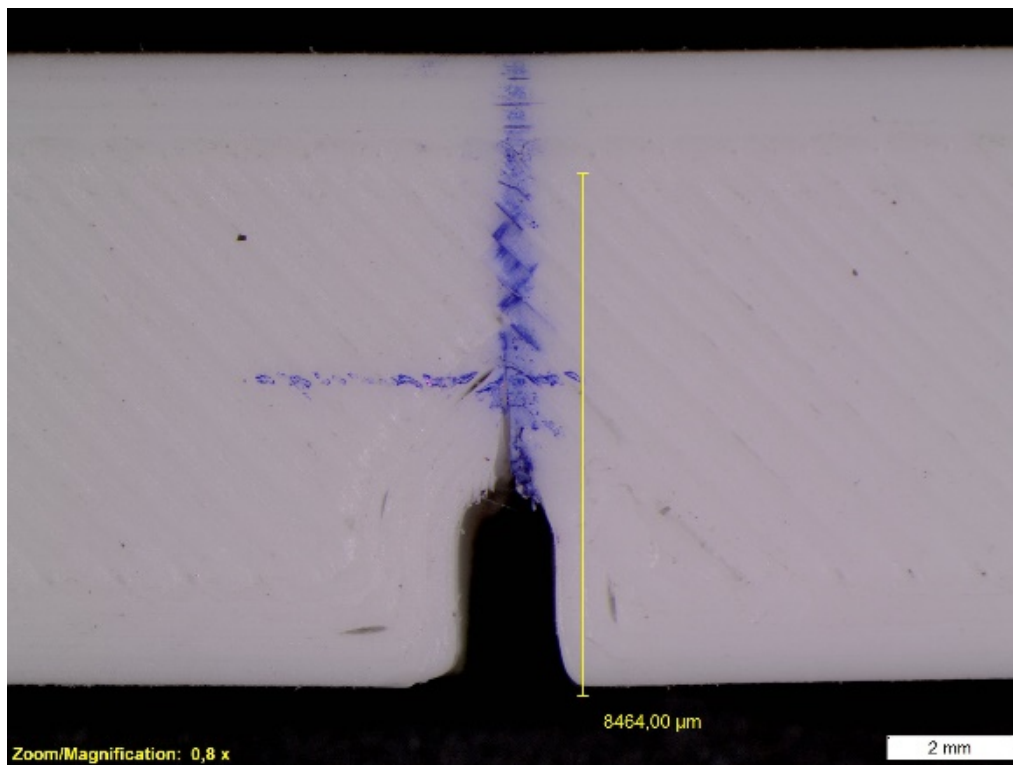


Figura B. 4 Macrografía 8C4 [Fuente: propia].

ANEXO III MACROGRAFÍAS PROBETAS 80% GIROIDE



Figura B. 5 Macrografía 8G1 [Fuente: propia].

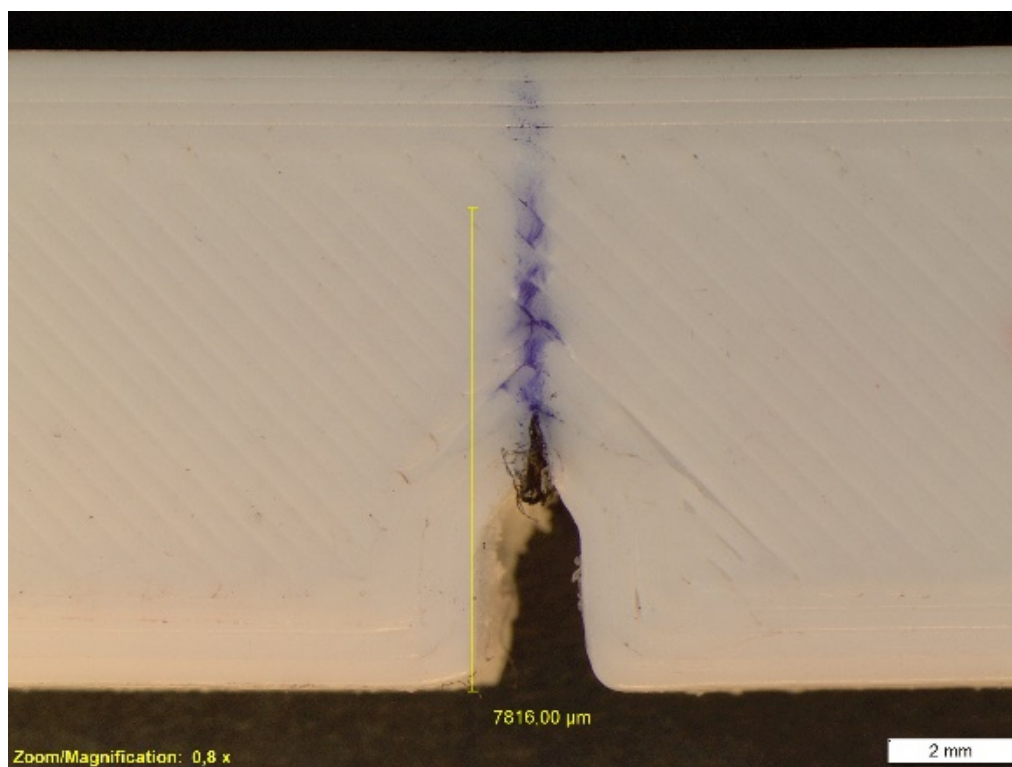


Figura B. 6 Macrografía 8G2 [Fuente: propia].



Figura B. 7 Macrografía 8G3 [Fuente: propia].

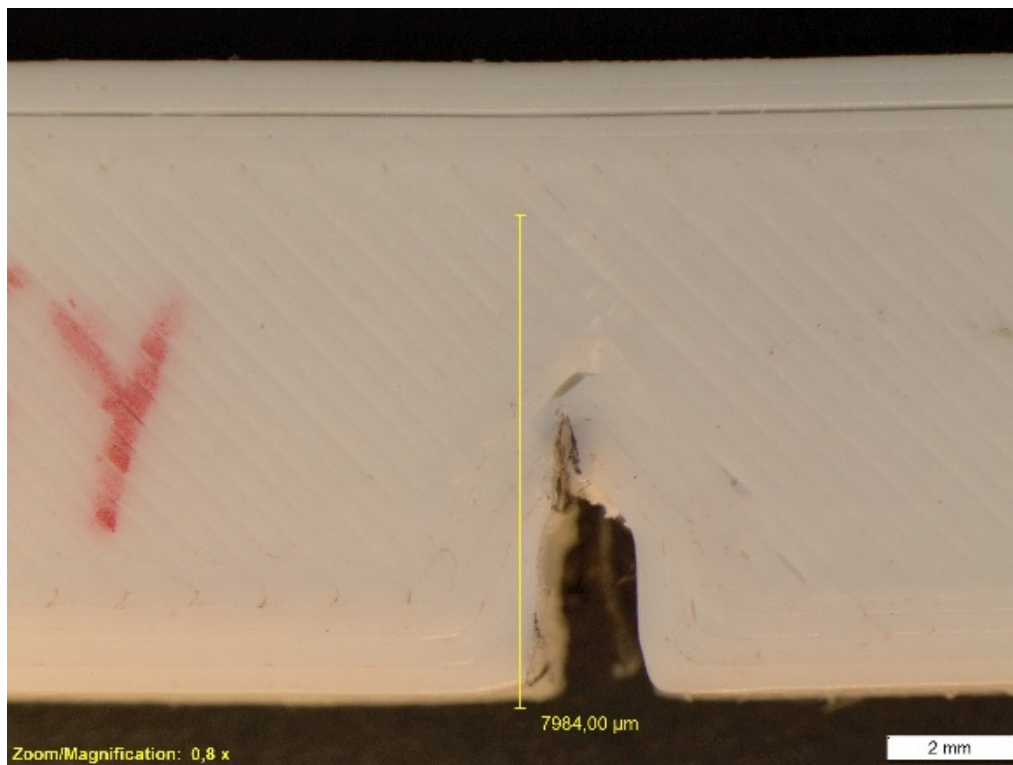


Figura B. 8 Macrografía 8G4 [Fuente: propia].

ANEXO IV MACROGRAFÍAS PROBETAS 60% GIROIDE

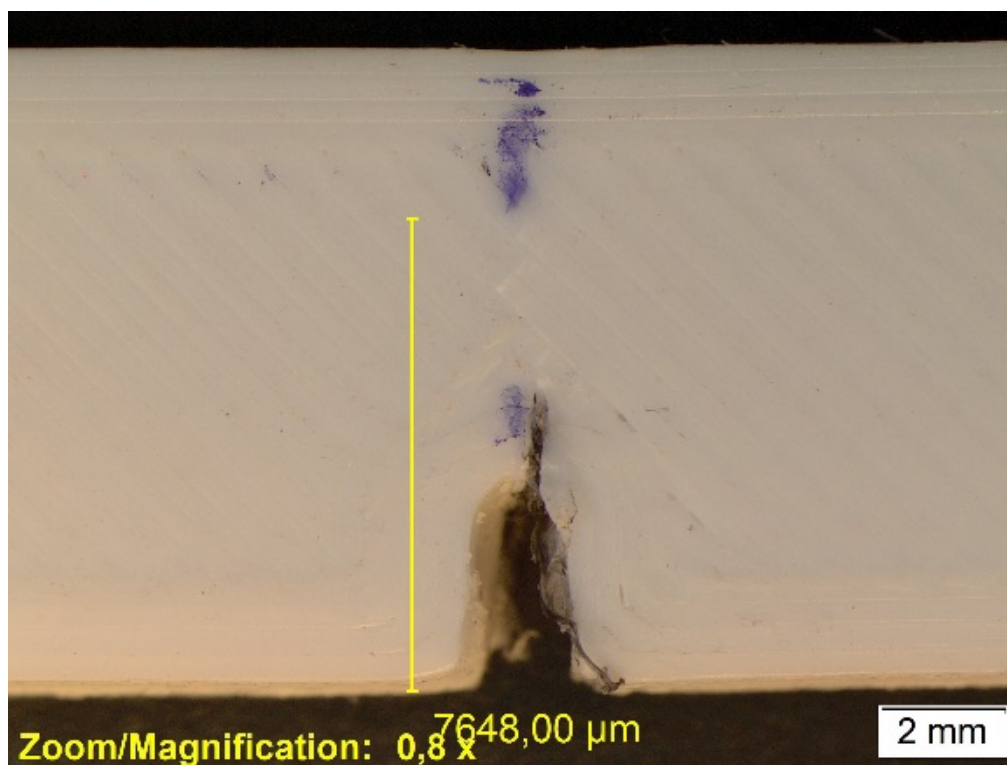


Figura B. 9 Macrografía 6G1 [Fuente: propia].

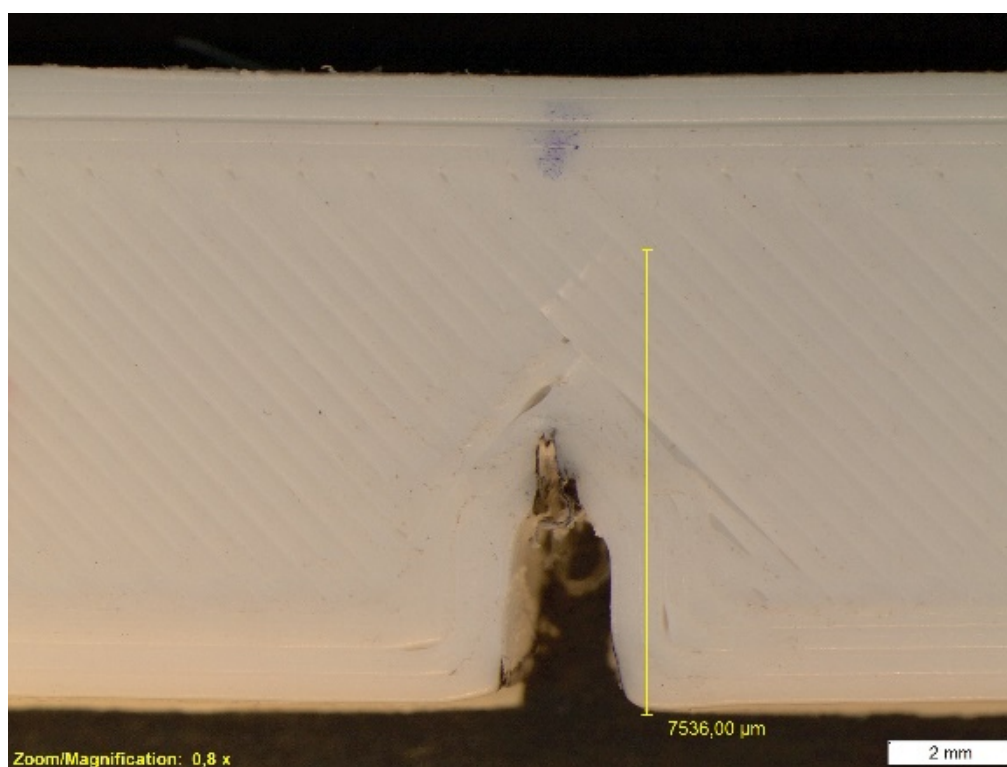


Figura B. 10 Macrografía 6G2 [Fuente: propia].

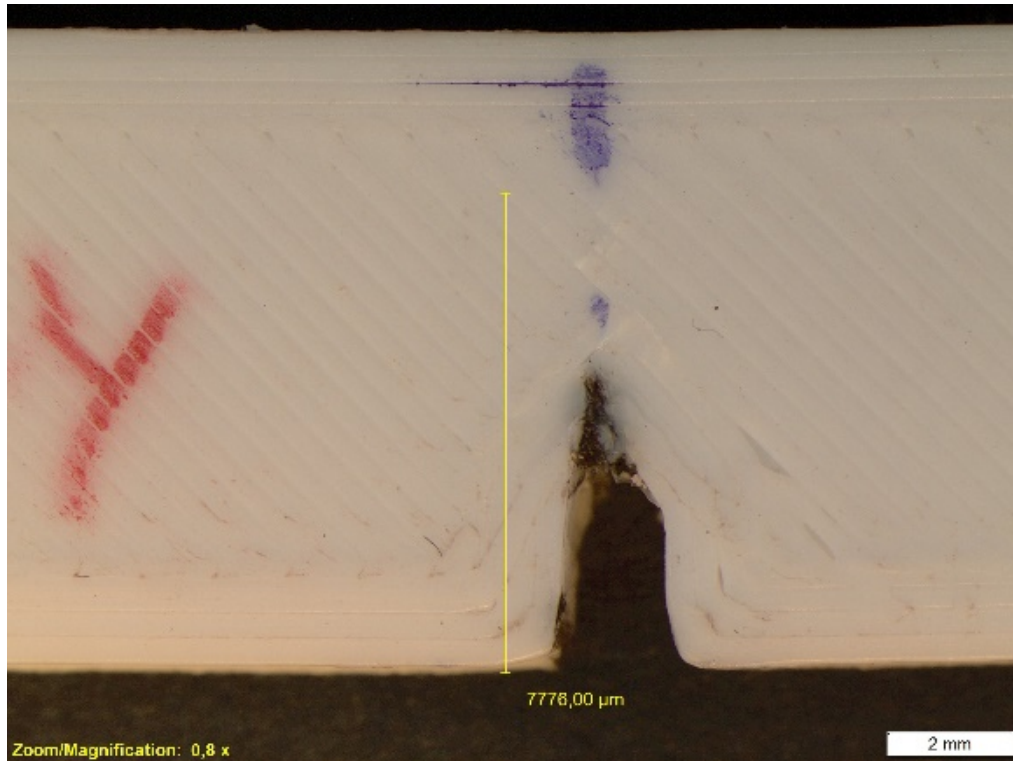


Figura B. 11 Macrografía 6G3 [Fuente: propia].

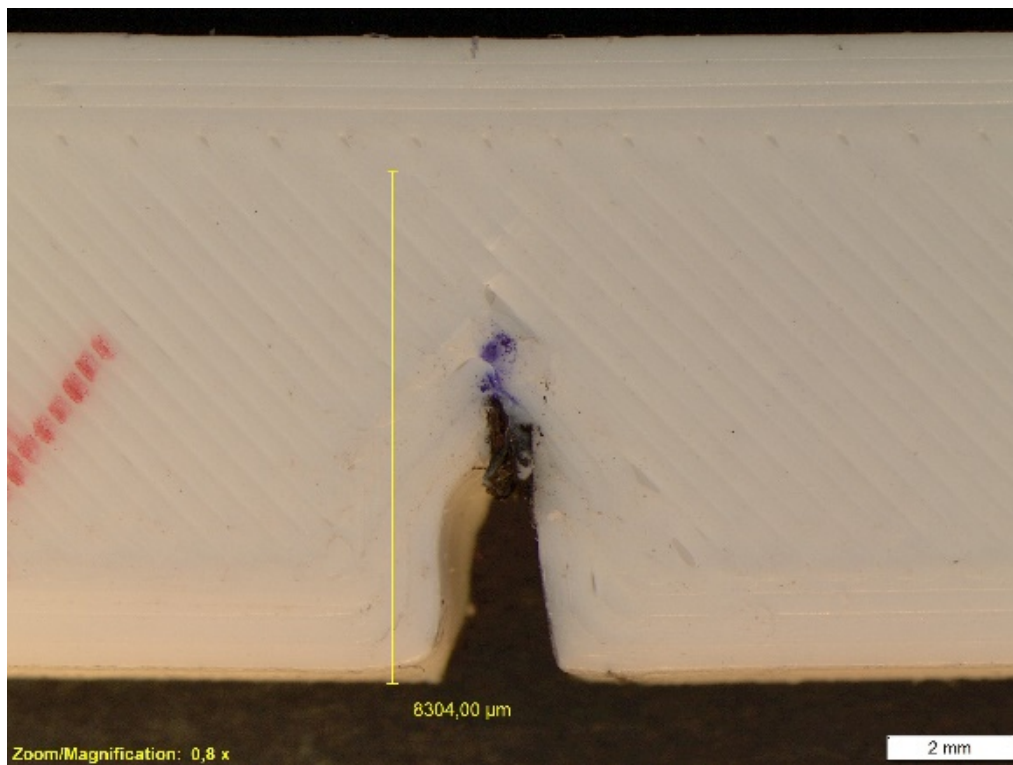


Figura B. 12 Macrografía 6G4 [Fuente: propia].

ANEXO V MACROGRAFÍAS PROBETAS 60% CONCÉNTRICO

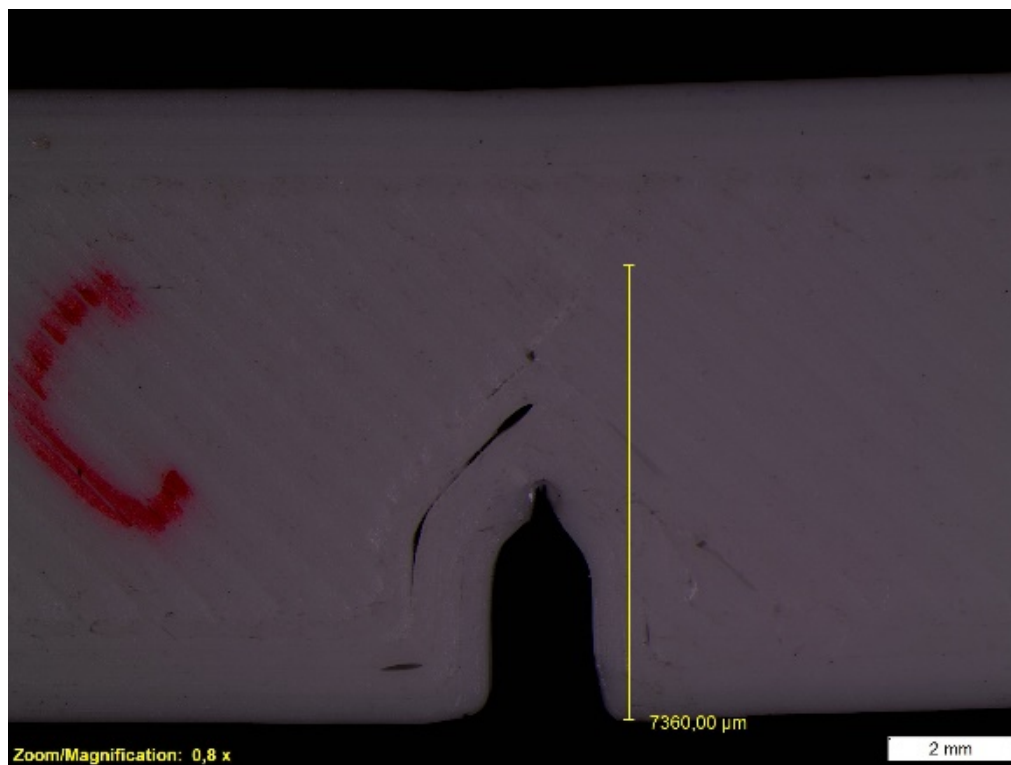


Figura B. 13 Macrografía 6C1 [Fuente: propia].

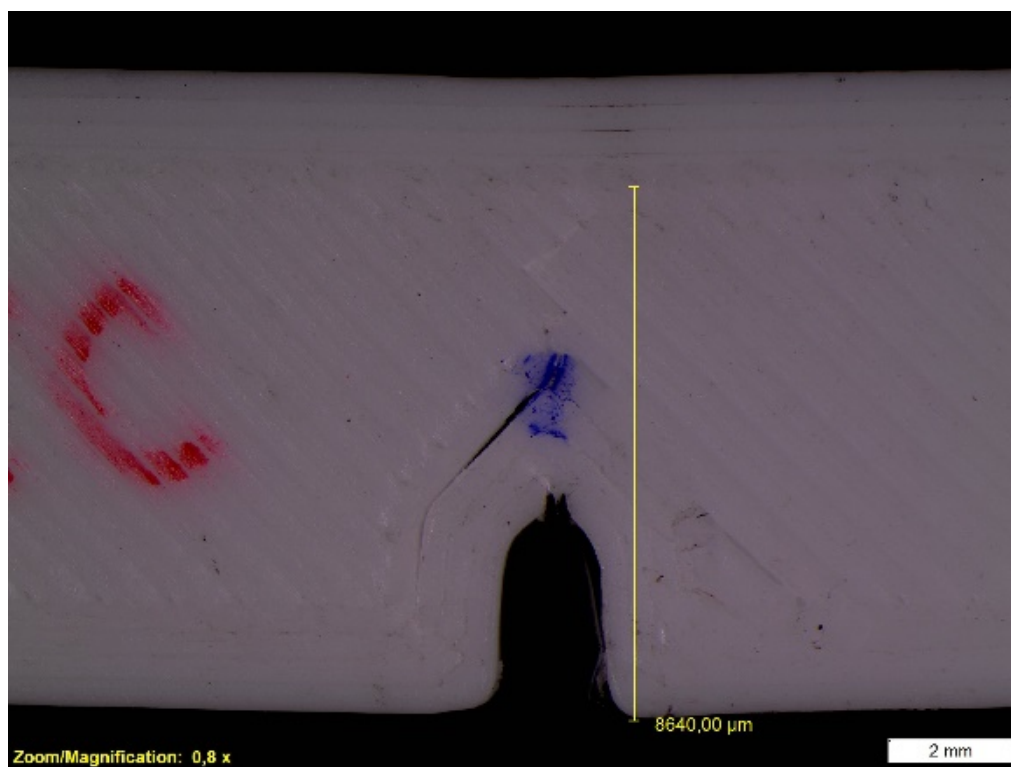


Figura B. 14 Macrografía 6C2 [Fuente: propia].

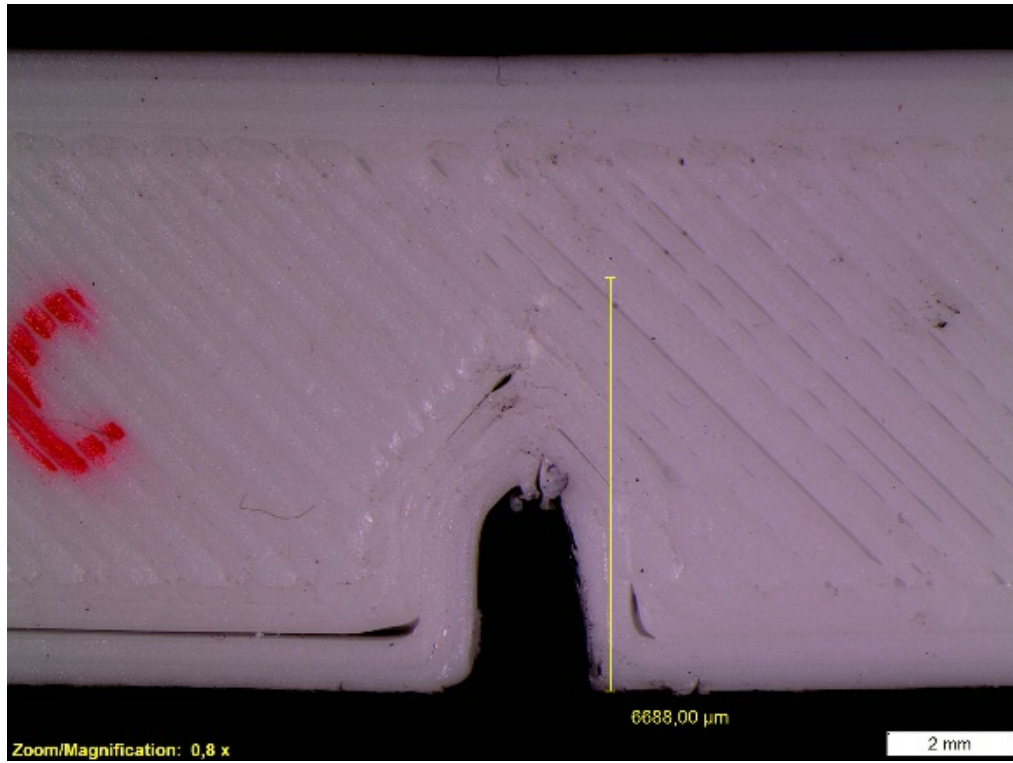


Figura B. 15 Macrografía 6C3 [Fuente: propia].

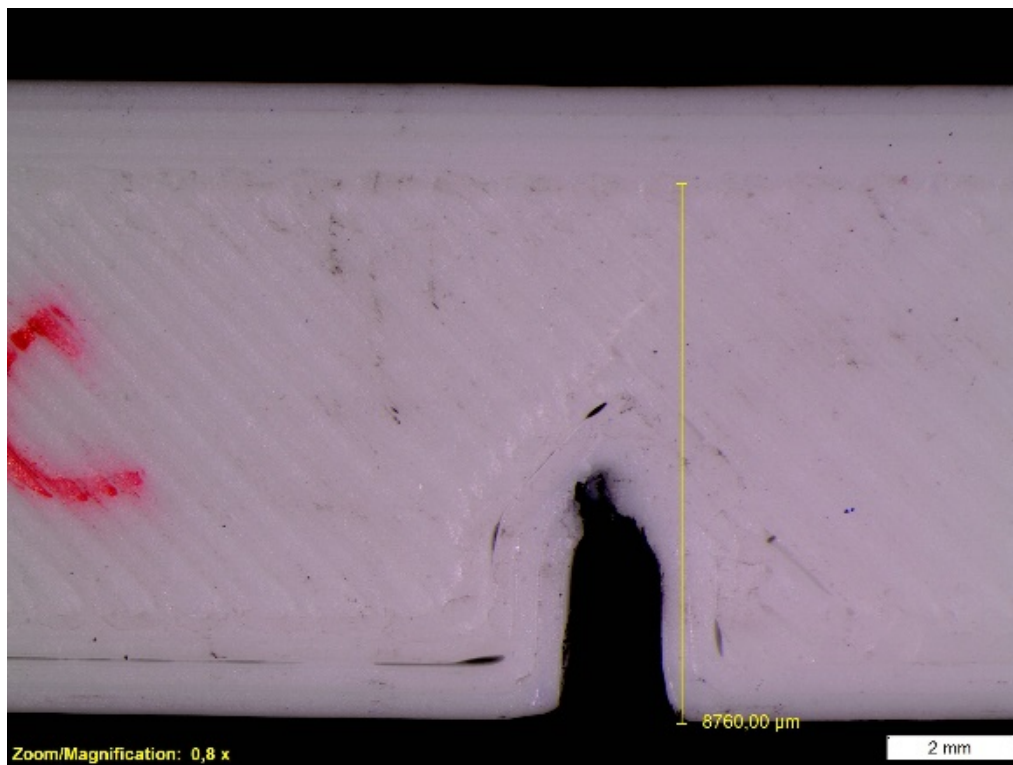


Figura B. 16 Macrografía 6C4 [Fuente: propia].