

Propagación de grietas en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras e impresos por deposición fundida.

Caleb Josué Ariza González, Daniel David García López

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

PhD Ingeniería Mecánica

Codirector

Jorge Guillermo Diaz Rodríguez

PhD Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

**Dedicatoria**

Al Señor Jesús por sus innumerables bendiciones para conmigo.

A mis padres Jesús Ariza y María Elcy González, por hacer posible con toda su dedicación y esfuerzo que se llegara hasta este punto.

A mi hermano Andrés y a mi cuñada Alba, por el apoyo incondicional durante todo el proceso de pregrado.

A mi sobrino Julián, por ser una maravillosa motivación.

A mi novia Liseth, por darme la dicha de tener paz en el caos de la recta final.

A mis hermanos de vida Stephanny, Gerson, Ever y Henry.

**Caleb Josué Ariza González.**

A Dios por su infinita misericordia.

A mis padres Angel Maria y María Aleyda por su gran amor y apoyo incondicional.

A mis hermanos Eduardo y Camilo por sus enseñanzas más allá de la vida académica.

A mis sobrinos Angel Daniel, Camilo, Maria Angel, Samuel, Celeste y tú quien vienes en camino.

A mi novia Judith, por ser luz en mi camino.

A todos los familiares, profesores y amigos que contribuyeron en mi proceso académico y en este proyecto.

En memoria del docente Roberto Zarama, autor del programa ser pilo paga.

A mi colega Caleb Ariza por su gran compañerismo.

A la Universidad Industrial de Santander por regalarme la mejor etapa de mi vida.

A mí, por creer en mí y en mis sueños. A todos, siempre agradecido.

**Daniel David García López.**

### **Agradecimientos**

A Dios por ser tan maravillosamente grande y bueno, dador de la vida y de la fuerza necesaria para no desfallecer en momentos difíciles y de duda.

Al profesor Alberto Pertúz por su orientación en la realización del presente trabajo.

Al profesor Jorge G. Díaz por su incondicional apoyo, tiempo, dedicación y esmero para que este proyecto fuera una realidad.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander específicamente al Laboratorio de Ensayos Mecánicos en cabeza de su director Prof. Diego Villegas por la realización de los ensayos de flexión a 3 puntos.

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander y a su encargado, Carlos Alberto Villarreal, por la realización de las pruebas microscópicas.

A Tecno-parque-SENA nodo Bucaramanga por los servicios de impresión de las muestras, en especial al ingeniero Rosemberg Sanabria.

## Tabla de contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>2 Marco teórico</b> .....	<b>15</b>
2.1 Antecedentes .....	15
<b>2.1.1 Antecedentes internacionales</b> .....	15
<b>2.1.2 Antecedentes nacionales</b> .....	19
2.2 Referentes teóricos.....	21
<b>2.2.1 Manufactura aditiva</b> .....	21
<b>2.2.2 Mecánica de la fractura</b> .....	22
<b>2.2.3 Mecánica de la fractura lineal elástica (MFLE)</b> .....	23
<b>2.2.4 Norma</b> .....	26
<b>2.2.5 Materiales compuestos</b> .....	31
<b>2.2.6 Onix</b> .....	32
<b>2.2.7 Kevlar</b> .....	33
<b>3 Materiales y Métodos</b> .....	<b>34</b>
3.1 Selección del tipo de probeta .....	34
3.2 Materiales y Equipos.....	35
<b>3.2.1 Onix y Kevlar</b> .....	35
<b>3.2.2 Máquina de Ensayos</b> .....	35
<b>3.2.3 Impresora 3D</b> .....	36
<b>3.2.4 Montaje de experimento</b> .....	37
<b>3.2.5 Microscopio</b> .....	39
<b>3.2.6 Image J</b> .....	40
3.3 Cuerpos de prueba.....	41
3.4 Ensayo de propagación de grieta (Flexión a 3 puntos) .....	42
3.5 Microscopía.....	44
<b>4 Resultados</b> .....	<b>46</b>
4.1 Resultados Flexión 3 puntos .....	46
<b>4.1.1 Longitud de grieta</b> .....	46

<b>4.1.2</b>	Abertura de grieta .....	48
4.2	Resultados Microscopía .....	50
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>55</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>56</b>

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. K para combinaciones de carga y geometrías comunes de grieta .....	24
Tabla 2. Comparación de propiedades mecánicas entre fibras .....	34
Tabla 3: Limite de crecimiento de grieta para cada espesor .....	48

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Manufactura aditiva .....	21
Figura 2. Términos usados en fractura .....	23
Figura 3. Modos de apertura de grieta .....	25
Figura 4. Probeta estándar proporciones y tolerancias .....	28
Figura 5. Disposición del ensayo.....	29
Figura 6. Probeta en forma de disco .....	30
Figura 7. Garras para Probeta de disco DC(T) .....	30
Figura 8. Refuerzo en materiales compuestos .....	32
Figura 9. Fibra de aramida .....	33
Figura 10 Onyx y Kevlar.....	35
Figura 11. equipo MTS Bionix Servohydraulic 370.02.....	36
Figura 12. impresora 3D Mark Two de MarkForged@.....	37
Figura 13. Abertura y longitud de grieta. ....	37
Figura 14. Ensayo .....	38
Figura 15. Equipo microscopia UIS .....	39
Figura 16. Software IMAGE J .....	40
Figura 17. Probeta experimental redondeada .....	41
Figura 18. CAD de la probeta de 25 mm de espesor con refuerzo de fibras de Kevlar.....	42
Figura 19. Vista Esquemática frontal de la probeta a flexión tres puntos .....	43
Figura 20. Imagen de cálculo tipo .....	43
Figura 21. Probetas ensayadas.....	44
Figura 22. Recubrimiento de oro microscopia UIS .....	45
Figura 23. Fuerza vs Longitud de grieta normalizadas .....	47
Figura 24. Fuerza vs Abertura de grieta normalizadas .....	49
Figura 25. Zona de inicio de grieta.....	50
Figura 26. Falla de fibras de Kevlar .....	51
Figura 27. Corte transversal de una fibra de carbono .....	51
Figura 28. Fibra de carbono longitudinal .....	52

# PROPAGACIÓN DE GRIETA EN MATERIALES COMPUESTOS

8

Figura 29. Zona final de la grieta, ruptura manual.....	52
Figura 30. Fibras de Kevlar .....	53
Figura 31. Carga vs Longitud normalizadas en PLA.....	59
Figura 32. Carga Vs Abertura normalizadas en PLA .....	60

**Tabla de anexos**

Anexo 1. Prueba de metodología en PLA ..... 59

**Resumen en Español**

**TITULO:** PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS E IMPRESOS POR DEPOSICIÓN FUNDIDA<sup>1</sup>

**AUTORES:** CALEB JOSUÉ ARIZA GONZÁLEZ Y DANIEL DAVID GARCÍA LÓPEZ<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Ensayo de flexión, materiales compuestos, manufactura aditiva, propagación de grieta.

**DESCRIPCIÓN:**

El estudio presenta la apertura y propagación de grietas en materiales compuestos impresos en 3D. El material tiene una matriz de nailon con fibra de carbono corta incrustada y está reforzado con fibras continuas de Kevlar. Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos a 5 probetas con diferentes espesores. Los ensayos fueron grabados digitalmente para obtener fotografías instantáneas y extraer, mediante técnicas de tratamiento de imágenes, los datos de carga, apertura y longitud de fisura.

No existen estándares para el análisis de propagación de grietas asociados con los materiales compuestos fabricados mediante impresión 3D. Por lo tanto, se utilizó como guía la norma ASTM E-399, utilizada en materiales sólidos isotrópicos, y se eligió el tipo de espécimen SENT.

El límite de crecimiento de fisura se estimó en 8,5 N/mm y la apertura de fisura en 10 N/mm. Además, el análisis de microscopía identificó la fractografía del material según las zonas de los especímenes (inicio de grieta, transición y ruptura final). Los mecanismos de falla observados fueron el agrietamiento de la matriz, el desprendimiento de fibras-matriz y rotura de fibras.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas, PhD Ingeniería Mecánica. Codirector: Jorge Guillermo Diaz Rodríguez, PhD Ingeniería Mecánica.

### Resumen en Inglés

**TITLE:** CRACK PROPAGATION IN FIBER-REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES PRINTED BY FUSED DEPOSITION<sup>3</sup>

**AUTHORS:** CALEB JOSUÉ ARIZA GONZÁLEZ Y DANIEL DAVID GARCÍA LÓPEZ<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Flexural test, composite materials, additive manufacturing, crack propagation

**DESCRIPTION:**

The study presents the opening and propagation of cracks in composite materials printed in 3D. The material has a nylon matrix with embedded short carbon fiber and is reinforced with continuous Kevlar fibers. Three-point bending tests were performed on 5 specimens with different thicknesses. Tests were digitally recorded to obtain instant photographs and extract, through image treatment techniques, the load, opening, and crack length data.

There are no standards for crack propagation analysis associated with composite materials manufactured by 3D printing. So, the ASTM E-399 standard, used in isotropic solid materials, was used as a guide, and the SENT type of specimen was chosen.

The crack growth limit was estimated at 8.5 N/mm, and the crack opening at 10 N/mm. Additionally, microscopy analysis identified the material's fractography according to the specimens' zones (crack initiation, transition, and final rupture). The failure mechanisms observed were matrix cracking, fiber pull-out, and break.

---

<sup>3</sup> Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas, PhD Ingeniería Mecánica. Codirector: Jorge Guillermo Diaz Rodríguez, PhD Ingeniería Mecánica.

## Introducción

La construcción de ciertas piezas mecánicas de manufactura compleja ha sido un inconveniente para las diferentes industrias tecnológicas debido a que esto eleva los costos de producción de un artículo final. Como una alternativa bastante convincente para solucionar el problema mencionado emerge la impresión 3D y en paralelo a ello los materiales poliméricos compuestos.

La impresión 3D permite dar formas hasta ahora inalcanzables por los métodos de manufactura existentes, incluso una impresora 3D tiene la capacidad de disminuir el costo de fabricación de una pieza de geometría compleja (Leon-Becerra et al., 2020). Además de las bondades geométricas, tiene una amplia gama de posibilidades en lo que a los materiales respecta, existen impresoras 3D capaces de construir con plásticos de puntos de fusión relativamente bajos como el PLA (200° C), otras para Nylon (270° C) (Díaz-Rodríguez et al., 2021) y hasta metales pasando por concretos o incluso alimentos.

Una de las técnicas utilizadas por la impresión 3D para fabricar piezas mecánicas es la manufactura aditiva que consiste en depositar progresivamente capas de material fundido sobre las ya aplicadas para dar forma a un producto.

Los materiales compuestos empiezan a tener un papel importante en la industria cuando obtuvieron la capacidad de reemplazar a otros materiales mucho más costosos, pesados y difíciles de trabajar. Actualmente son muy importantes en industrias como la aeronáutica, la automotriz y la construcción, entre otras.

Básicamente un material compuesto es la unión de dos materiales para formar uno nuevo que mejore las capacidades de los materiales base, la mayoría de construye a partir de dos fases, una fase continua y mayoritaria conocida como matriz y una fase discontinua o dispersa conocida como refuerzo. Generalmente el material utilizado para la matriz es dúctil y tenaz mientras que el material de refuerzo tiende a ser frágil y resistente.

A partir de una revisión de literatura Díaz-Rodríguez et al (2021) se identificaron que el comportamiento a fractura de esta clase materiales no está caracterizado. Para la realización del presente estudio se tomó como referencia el Onyx que es un material polimérico

compuesto por una matriz de nylon y un refuerzo de fibras cortas de carbono distribuidas aleatoriamente. Adicional a eso, se refuerza con fibras de un material rígido como lo es el kevlar. Se hicieron ensayos de flexión en tres puntos para medir crecimiento y abertura de grieta, así como microscopía electrónica de barrido para estudiar la morfología de la superficie de falla.

El onyx es una apuesta de la compañía Markforged como alternativa a filamentos convencionales. Tiene una densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$ , una resistencia a la flexión de 81 MPa y un módulo de elasticidad de 1400 MPa. El material de refuerzo que es la fibra de kevlar a su vez tiene 190 MPa de resistencia a la flexión, un módulo de elasticidad muy inferior al del onyx, 27 GPa, una densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$  y se adiciona una resistencia a la tensión de 610 GPa (Markforged Inc, 2018).

El ensayo se diseñó en base a la norma ASTM E-399. Sin embargo, esta norma está pensada para materiales isotrópicos, no para materiales compuestos impresos en 3D, por lo que queda abierta la pregunta de la tenacidad a fractura.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Caracterizar el comportamiento de materiales compuestos impresos por AM (deposición fundida) en presencia de grietas con el fin de obtener su curva de tenacidad en función de la abertura de la punta de grieta y propagación bajo carga monotónica.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las normas de ensayos de tenacidad para materiales poliméricos y materiales compuestos de matriz polimérica con el fin de seleccionar el tipo de norma y muestra más adecuado.
- Determinar una relación de la longitud y apertura de grieta en función de la fuerza aplicada a partir de ensayos de deformación plana en modo I, con el fin de establecer el límite de crecimiento de grieta para un espesor determinado.
- Determinar una relación entre la longitud y apertura de grieta en función de la fuerza aplicada en ensayos de deformación plana en modo I, con el fin de establecer una regla de crecimiento de grieta.
- Analizar resultados por medio de la teoría de la mecánica de fractura lineal elástica y análisis fractográfico para relacionar superficie con tipo de falla

## 2 Marco teórico

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

##### 2.1.1.1 Caracterización mecánica, microestructural y a fractura de un material nanoestructurado.

De acuerdo a Gietl et al (2020) el objetivo de este proyecto fue caracterizar las propiedades mecánicas y el comportamiento a fractura de nanocompuestos de poliácido láctico (PLA) reforzados con una montmorillonita organomodificada (MMT), obtenidos mediante un proceso de extrusión calandra y haciendo uso del método del trabajo esencial de fractura (EWF).

En el adelanto del trabajo se realizaron diferentes configuraciones de materiales denominados films (películas del material nanoestructurado PLA/MMT), mediante extrusión de doble husillo y un calandrado, en algunas estructuras se utilizó un agente nucleante. Además, se les realizó un tratamiento térmico a las probetas, que consistió en el calentamiento a una temperatura de 60° C durante un periodo de 20 minutos, seguido de un temple por inmersión en agua helada, esto permitió estudiar el comportamiento en dos estados: de rejuvenecimiento (después del tratamiento) y de envejecimiento (antes del tratamiento).

La morfología de las probetas de los materiales compuestos nanoestructurados fue definida mediante la tecnología de difracción de rayos x a grandes ángulos (WAXS) y la caracterización estructural se realizó mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de barrido, SEM.

Para la evaluación del comportamiento a fractura de manera detallada, se utilizó la mecánica de la fractura post cedencia (PYFM), sobre probetas de doble entalla agudizada denominadas DDENT rejuvenecidas y envejecidas. Como resultados se obtienen las diferentes curvas de esfuerzo vs desplazamiento para la orientación TD y MD (dirección longitudinal y

transversal de las nanoestructuras de PLA) con sus respectivos análisis de propagación de grieta que caracterizan la fractura de cada probeta.

Este proyecto contribuye como un posible modelo de referencia en nuestro estudio de la caracterización a fractura del compuesto Onyx FR impreso por AM.

### **2.1.1.2 Estudio de la fractura de materiales compuestos por una matriz de plástico y partículas.**

El estudio de la fractura de materiales compuestos por una matriz de plástico y partículas fue llevado a cabo por Taborda-Rios et al (2017) donde se estudia el comportamiento a fractura de materiales compuestos por una matriz polimérica y una fase elastomérica, teniendo en cuenta los diferentes micro mecanismos de deformación y fractura que presentan los polímeros sintéticos, se usaron dos tipos de matrices, termoplásticas y termoestables.

En el desarrollo de este trabajo se aplican los conceptos de mecánica de la fractura elástico-lineal (LEFM), la cual se acobija a la ley de elasticidad de Young y describe el comportamiento de grietas en materiales lineales perfectamente elásticos. Por otra parte, en materiales donde la deformación plástica es muy grande, se utiliza el método de mecánica de la fractura elasto-plástica (EPFM). Además, se define el criterio del factor de intensidad de tensión ( $K$ ) y la energía de fractura intrínseca ( $G$ ) y la relación existente entre estas.

Dentro del estudio de fractura de los materiales mostrados en este proyecto, se utilizaron dos analíticas, el ensayo de torsión doble DT, donde la probeta es de forma rectangular con una entalla longitudinal que la atraviesa completamente, apoyada simétricamente sobre dos soportes y sometida a torsión, para determinar los parámetros de fractura de mezclas de poliéster insaturado y elastómeros y el ensayo de SENT (también conocido como ensayo de flexión a tres puntos), que se llevó a cabo bajo la norma Europea para la fractura, medida que cubre aspectos importantes en plásticos que no se tienen en cuenta en la norma ASTM E-399 para metales, como lo es la determinación del factor ( $G$ ).

Como resultados se obtienen los diferentes aspectos que afectan de manera sensible la tenacidad a la fractura. Esta investigación sugiere varias formas de evaluar la fractura para

diversos materiales, además de incluir las normas con las cuales llevar a cabo los ensayos, referentes importantes para tener en cuenta en la caracterización mecánica de compuestos a fractura impresos por manufactura aditiva.

### **2.1.1.3 Análisis experimental y numérico del método del intercepto para evaluar la extensión estable de grieta en una probeta C(T) de acero.**

Según Internacional metalmecánica (2015) esta publicación estudia la tenacidad a la fractura como producto de la curva de resistencia J, también conocida como curva J-R, a partir de un ensayo de fractura de probeta única, teniendo en cuenta el proceso de extensión estable de grieta y las correcciones pertinentes de acuerdo con el tamaño de esta.

En el avance de este trabajo, se da a conocer el método del intercepto aplicado a una probeta C(T) bajo la norma ASTM A 508, registrando los valores p-v-a carga, desplazamiento y extensión de grieta respectivamente, generando así la ley de crecimiento de grieta la cual rige la evolución de su tamaño en el desarrollo del ensayo. Con los datos aportados por el método se construyó la curva J-R para la probeta, luego los resultados obtenidos mediante el intercepto, se verificaron mediante una modelación bidimensional de la probeta C(T) mediante la ley de crecimiento obtenida para emular el ensayo de fractura con crecimiento estable de grieta por el método de elementos finitos.

La curva J-R es la representación de la triada p-v-a nominada anteriormente, de la cual se comprobó que puede ser obtenida mediante el método del intercepto sin salirse de los márgenes de error experimental en comparación con el método alternativo de construcción de la misma curva, propuesto por Donoso, Zahr y Landes (DZL). A partir de estos resultados se planteó la posibilidad de la realización del ensayo de fractura teniendo solo los parámetros de p-v, más las medidas inicial y final de la grieta, sin la necesidad de los valores simultáneos de extensión de grieta.

#### **2.1.1.4 Propagación de grietas por fatiga de acero al carbono con y sin soldadura.**

Según Markforged (2020) el objetivo de este proyecto fue estudiar la propagación de grietas por fatiga en una lámina de acero estructural AISI 1018, bajo un proceso de soldadura MIG y en su material base.

El pre-agrietamiento y ensayo de propagación de grieta por fatiga se llevaron a cabo en probetas estándar tipo compacto (CT) de acuerdo con la norma ASTM E 647-05 a carga constante y con una frecuencia de 10 Hz en una máquina servo-hidráulica instron 8801. La longitud de grieta se midió bajo la función *compliance*, especificada en la norma. El desplazamiento de abertura se midió con un extensómetro ubicado en la cara frontal de la probeta. Los resultados obtenidos del ensayo se plasmaron en gráficas representativas de PGF y CGF, pruebas de grieta por fatiga sin soldadura y probetas con cordón de soldadura respectivamente.

Se obtuvieron diferencias significativas de la constante de Paris para las PGF y CGF concluyendo así que es más difícil propagar una grieta por fatiga en el material soldado, atribuyendo esto a la combinación de una microestructura que muestra un tamaño de grano grande en la zona afectada por el calor y de la presencia de esfuerzos residuales de compresión, provenientes del proceso de soldadura aplicado (MIG).

#### **2.1.1.5 Estimation of the fracture toughness of tungsten fibre reinforced tungsten composite.**

Según Ingemecánica (2018) en la búsqueda de un material que combine las propiedades mecánicas necesarias para satisfacer cualquier aplicación eficientemente, se encontraba el tungsteno como ideal, no obstante la limitación encontrada en su fragilidad inherente en la temperatura de transición dúctil frágil (DFTT) y en la operación con sobrecalentamiento, hizo que el objetivo de este proyecto se centrara en una estimación de la resistencia a la fractura del tungsteno reforzado con fibras cortas producidas con polvo metalúrgico y fibras largas mediante una deposición química en capas de vapor (CVD) ambos refuerzos de

tungsteno. Este tipo de ensayo para la evaluación de la resistencia a la fractura se llevó a cabo bajo la norma ASTM E399 y ASTM E1820.

En el desarrollo de este proyecto, se realizó un paralelo para las normas anteriormente nombradas, para nuestro interés nos fijamos en el ensayo regido bajo la norma ASTM E399, donde se calcularon los valores de resistencia a la fractura mediante el análisis de curvas de carga vs desplazamiento, teniendo en cuenta los criterios de tamaño y su relación con la longitud de grieta y el espesor de la muestra.

Como resultados se analizan los diferentes compuestos fabricados y cuales ofrecieron una mayor adherencia a la matriz, disminuyendo el crecimiento intergranular, todo esto bajo curvas de carga vs desplazamiento que permitían diferenciar los valores de precarga y carga máxima para cada probeta.

## **2.1.2 Antecedentes nacionales**

### **2.1.2.1 Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto en la fibra de vidrio.**

De acuerdo a Mecasinc el objetivo de este proyecto fue la caracterización mecánica de dos tipos de materiales compuestos, resina poliéster como matriz, reforzada con fibra de bambú y con fibra de vidrio realizando ensayos de tracción, flexión e impacto bajo las normas internacionales ASTM 3039-08, D790-10 y D256-10 respectivamente.

En el desarrollo de este proyecto se estableció un proceso químico con hidróxido de sodio al 5% en masa, con el fin de mejorar la compatibilidad entre matriz de poliéster/fibra. Las propiedades mecánicas obtenidas en los materiales compuestos se compararon con la matriz de poliéster con el fin de conocer el aporte mecánico de cada una de estas. Para mejorar el análisis de adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz de poliéster se realizaron barridos con microscopía en las zonas de fractura de las diferentes muestras.

Se concluyó que todos los compuestos ensayados a tracción presentaron un comportamiento frágil, además de esto tuvieron una resistencia última a flexión mayor a diferencia de la matriz de poliéster. Comprobando así que existe un aporte mecánico en cuanto a las probetas reforzadas con fibras de bambú y vidrio.

Este proyecto nos aporta la metodología a seguir para realizar una caracterización mecánica además de brindar herramientas como el uso de la microscopía de barrido para analizar la compatibilidad de las fibras utilizadas en el compuesto.

### **2.1.2.2 Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas.**

Pertuz et al (2020) presentaron el artículo Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas cuyo objetivo de este proyecto fue estudiar el daño y falla progresiva en materiales compuestos de fibras largas producidos por manufactura aditiva.

En el desarrollo metodológico de este proyecto se fabricaron 4 tipos diferentes probetas en cuanto a geometría y composición (fibra corta, fibra larga), variando los parámetros que hacen más sensibles los cambios en la rigidez y resistencia del material, entre los cuales están; la orientación de las fibras, espesor de capa y temperatura del extrusor, además de la formación de porosidades.

Se concluyó que la dirección de impresión con mayor resistencia es aquella que tiene su orientación paralela a la carga, que el tamaño de capa se relaciona directamente con la porosidad y éste a su vez mejora o empeora la adherencia interlaminar, fenómeno que afecta o no la tendencia de propagación del daño, además de detallar las investigaciones relacionadas al comportamiento de los compuestos a cargas de tracción, compresión, fatiga, contacto, impacto, considerando los efectos de la temperatura, humedad y termofluencia.

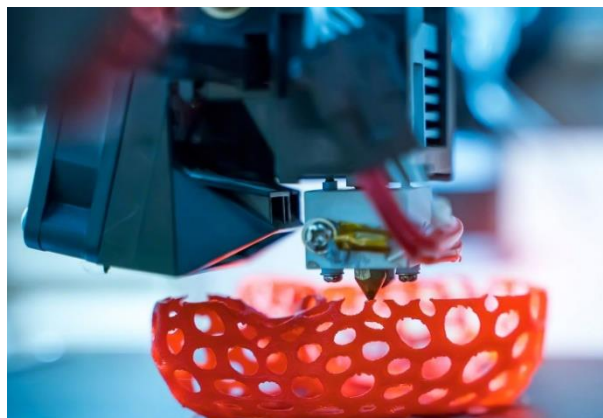
El aporte de este es proyecto abre la necesidad por comprender mejor los mecanismos de falla y desarrollar modelos para predecirlos, los cuales sean más completos y que incluyan la caracterización de estructuras de relleno y la anisotropía de las piezas, con el fin de aumentar las posibles aplicaciones de la AM.

## 2.2 Referentes teóricos

### 2.2.1 Manufactura aditiva

Es una técnica de fabricación de objetos, que se ha venido desarrollando desde mediados de la década de los años 80, revolucionando la industria manufacturera y su tradicional método de producción, basado en la remoción de material. Es así como la impresión 3D popularmente conocida como AM (manufactura aditiva) llega a romper los esquemas habituales con su proceso de adición de material, construyendo piezas capa por capa, de acuerdo con un modelo digital preestablecido, la naturaleza de dicha técnica permite una disminución significativa de los costos pues al ser un proceso de adición, se evita la generación de residuos, el exceso y el desperdicio del material, lo que normalmente sucede en los métodos de remoción de la manufactura tradicional (Díaz-Rodríguez et al., 2021).

La AM hace posible la elaboración de piezas o elementos de difícil geometría como se observa en la figura 1, que serían casi imposibles de fabricar mediante la manufactura tradicional, además de reducir el costo y el tiempo de este procedimiento. Actualmente la impresión 3D es muy utilizada en la fabricación de herramientas para procesos de fundición y mecanizado, plantillas de montaje, accesorios domésticos y guías médicas; mientras que en términos de materiales es competente para la elaboración de piezas en metal, plástico, caucho, cera y materiales compuestos, de esta forma la AM se está apoderando de numerosas industrias como la aeroespacial, automotriz, la robótica, arquitectura, entre otras.



*Figura 1. Manufactura aditiva*

fuelle: [www.mecalux.com.co/blog/fabricacion-aditiva](http://www.mecalux.com.co/blog/fabricacion-aditiva).

La impresión 3D precisa de un software, asimismo el respectivo hardware de la impresora y el material (Leon-Becerra et al., 2020). La máquina se va desplazando sobre el plano, adicionando materia sobre las coordenadas programadas, siempre de abajo hacia arriba y de esta manera va formando el objeto en tres dimensiones, idéntico al modelo diseñado.

### 2.2.2 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura estudia el comportamiento de componentes estructurales que contienen grietas. El objetivo principal de esta rama de la mecánica es predecir cuándo, cómo se produce y/o como se propaga una grieta (Ramirez Cruz et al., 2018).

Las grietas pueden tener una propagación catastrófica (comportamiento de un material altamente frágil), plástica (hasta tener un colapso por fallo de ductilidad) o lenta sometida a fatiga.

#### **Definiciones:**

**Grieta:** intersección de una fractura parcial con una superficie libre (González, 2020).

**Punta de grieta:** es el extremo de una grieta en la dirección de propagación, es el punto donde dos superficies de fractura se conectan (González, 2020).

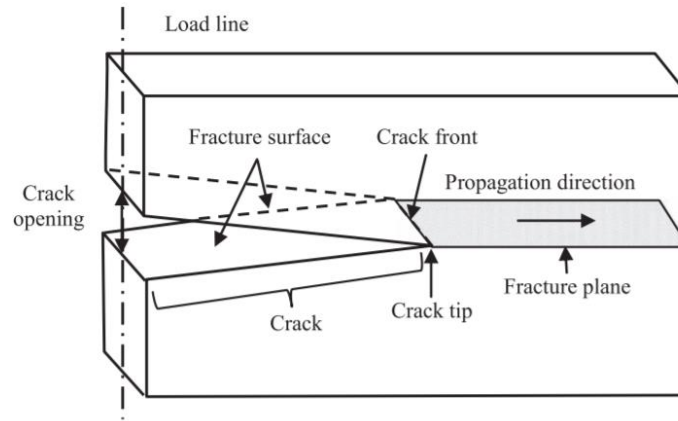
**Apertura de grieta:** es la distancia que separa las superficies de fractura en el punto inicial de la grieta (González, 2020).

**Línea de carga:** es el eje sobre el cual se realiza la carga de la pieza (González, 2020).

**Dirección de propagación:** es la dirección sobre la cual se propaga la grieta (González, 2020).

**Plano de fractura:** es el plano sobre el cual se propaga la grieta (González, 2020).

Conceptos resumidos en la figura 2 que se muestra a continuación:



*Figura 2. Términos usados en fractura*

Fuente: Practical approach to fracture mechanics (González, 2020).

### 2.2.3 Mecánica de la fractura lineal elástica (MFLE).

Se aplica a componentes que tienen deformación plástica muy pequeña en la raíz de la grieta comparado con las dimensiones del componente. Adicionalmente, el material tiene un comportamiento frágil, similar al del vidrio (Ramirez Cruz et al., 2018).

#### 2.2.3.1 Factor intensificador de tensiones (K).

Es un factor que relaciona la carga, la geometría y el tamaño del defecto del componente y se muestra genéricamente en la ecuación (1). El K describe el campo de esfuerzos de un componente fisurado (Ramirez Cruz et al., 2018).

$$K_i = \sigma * \sqrt{\pi * a} * f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

donde  $\sigma_\infty$ , es el esfuerzo aplicado, a es la longitud de la grieta, w es una dimensión característica de la pieza, y  $f^*(a/w)$  es una función adimensional que tiene en cuenta la geometría de la pieza y el subíndice i describe los modos de apertura descritos en la figura 3. La tabla 1 muestra el K para algunas configuraciones.

Tabla 1.  $K$  para combinaciones de carga y geometrías comunes de grieta

Fuente: Introduction to fracture mechanics (Ramirez Cruz et al., 2018).

Tipo de Grieta	Factor intensificador de esfuerzos, $K_I$
Grieta central, longitud $2\alpha$ en un plato infinito	$\sigma_\infty \sqrt{\pi\alpha}$
Grieta de borde, longitud $\alpha$ , en una placa semi-infinita	$1.12\sigma_\infty \sqrt{\pi\alpha}$
Grieta central en forma de centavo, radio $\alpha$ , en cuerpo infinito	$2\sigma_\infty \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$
Grieta central, longitud $2\alpha$ , en ancho de placa $W$	$\sigma_\infty \sqrt{W \tan\left(\frac{\pi\alpha}{W}\right)}$
2 grietas de borde simétricas, cada una de longitud $\alpha$ en placa de ancho total $W$	$\sigma_\infty \sqrt{W \left( \tan\left(\frac{\pi\alpha}{W}\right) + 0.1 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi\alpha}{W}\right) \right)}$

### 2.2.3.2 Tenacidad $K_{Ic}$

La primera aproximación exitosa fue hecha por parte de George Irwin y Max L. Williams en 1957, mediante el *factor de intensidad de esfuerzos*, expresado de forma general en la ecuación (2):

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

donde  $K$  es factor de intensidad de esfuerzos,  $Y$  es el parámetro geométrico,  $\sigma$  es el esfuerzo remoto aplicado y  $a$  es el tamaño de la grieta (González, 2020).

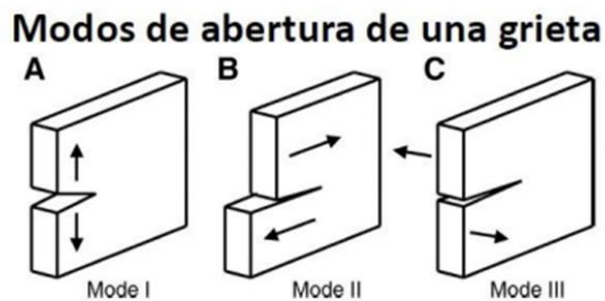
En el caso de que  $K$  llegue al valor crítico  $K_C$ , conocido como *tenacidad a la fractura*, el componente falla. Los valores de  $K_C$  pueden ser determinados mediante ensayos mecánicos de laboratorio, como los descritos en la norma ASTM E399.

La aplicación de la ecuación (2) permite determinar, si es conocido el tamaño de la grieta, el parámetro geométrico y la tenacidad a la fractura, la resistencia restante  $\sigma_f$  de la pieza es presentada en la ecuación (3):

$$\sigma_f = \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a}} \quad (3)$$

### 2.2.3.3 Propagación de grieta

Es la herramienta que nos permite mediante un ensayo controlado y bajo unos parámetros establecidos en la norma ASTM E 399 (ASTM E 399) estudiar el comportamiento del material, con el fin de obtener una aproximación a las propiedades de este, teniendo en cuenta, la velocidad de apertura de la grieta, la longitud de esta, asimismo el ángulo de variación mediante modelos matemáticos establecidos como lo son el factor de intensidad de tensiones. Los tres modos de apertura de grieta se aprecian en la figura 3. Modo I: Modo de apertura; modo II: Modo deslizante; modo III: modo de rotura transversal (Collins, 2018).



*Figura 3. Modos de apertura de grieta*  
fuente: Introduction to fracture mechanics (Ramirez Cruz et al., 2018).

En la propagación de grietas se conoce la carga aplicada, el parámetro geométrico y la tenacidad a la fractura, es posible determinar el tamaño de la grieta crítica  $a_c$  que es presentada en la ecuación (4):

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_c}{Y\sigma} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Finalmente, para determinar la velocidad de propagación de la grieta es necesario recurrir a la ley de Paris, ecuación (5) introducida por Paul Paris en 1961, expresada en forma temporal:

$$\frac{da}{dN} = CK^m = \Delta K \quad (5)$$

Donde  $K$  es el factor de intensidad de esfuerzos,  $da/dN$  es aumento del tamaño de propagación por ciclo de carga. La grieta y  $C$  y  $m$  son constantes empíricas determinadas experimentalmente.

#### 2.2.4 Norma

#### NORMA ASTM E399: ENSAYOS DE FRACTURA PARA MATERIALES METÁLICOS.

*¿Qué se puede hallar con la implementación de esta norma?*

La norma (ASTM E 399) describe muestras y procedimientos para determinar la tenacidad a fractura ( $K_{Ic}$  (fuerza\*longitud<sup>-3/2</sup>)) de probetas metálicas de dimensiones específicas, sometidas a cierto tipo de esfuerzos y a velocidades de deformación determinadas.

Esta resistencia a la fractura puede ser calculada para tres modos de carga:

1. **Apertura:** en este modo se realiza un esfuerzo de tipo axial a tensión sobre el material, de este modo se puede determinar el coeficiente I:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(2\pi r)^{1/2} = K_I \quad (6)$$

2. **Deslizamiento:** en este modo se realiza un esfuerzo de tipo cortante sobre el material, similar a un deslizamiento de planos, de este modo se puede determinar:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \tau_{xy}(2\pi r)^{1/2} = K_{II} \quad (7)$$

3. **Desgarramiento:** en este modo se realiza un esfuerzo de tipo cortante, similar al desgarramiento entre dos planos, de este modo se puede determinar:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \tau_{yz} (2\pi r)^{1/2} = K_{III} \quad (8)$$

*¿Cómo se debe realizar?*

***Preparación de la muestra:***

Se selecciona una pieza de material a ensayar y se realiza el maquinado de la pieza, el tamaño del ligamento o sección efectiva no debe ser menor a  $2.5 * (K_{Ic} / \sigma_{YS})^2$ , y su espesor debe ser tal que la razón de cargas  $P_{max} / P_Q$  no sea mayor a 1.10, por lo general la razón ***Anchura/Espesor*** se iguala a 2, la longitud de la muesca debe ser la mitad del ancho del espécimen y el punto de grieta puede ser de cara plana, en ángulo o de forma circular.

***Posicionamiento en el equipo y experimentación:***

Es un requisito primordial colocar y ajustar la muestra de forma precisa en el equipo, puesto que desviaciones en el posicionamiento pueden alterar el tipo de esfuerzo calculado para el material.

Al iniciar el procedimiento se debe tener una velocidad de carga definida, de tal forma que el espécimen se comporte de acuerdo con el rango especificado, velocidades de carga muy altas pueden invalidar los resultados obtenidos.

Al finalizar el experimento, se procede a calcular con los datos generados los coeficientes de resistencia y razones requeridas en caso de que sea necesario repetir el experimento si no se cumplen con las condiciones especificadas.

***Reporte:***

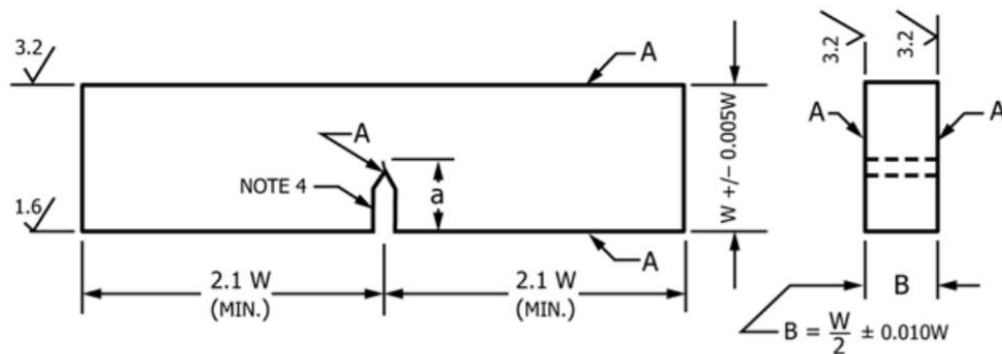
Al finalizar la fase de preparación y experimentación se debe reportar la orientación y dimensiones de la pieza, el modo de carga y el código de orientación del plano de fractura.

Adicionalmente se debe reportar la composición química o tipo de aleación, tratamientos termo mecánicos realizados, forma del material base, temperatura de ensayo, humedad

relativa, velocidad de carga, esfuerzo de cedencia, coeficiente de resistencia a la fractura y la razón de cargas e información extra dependiente del tipo de espécimen.

**Anexo A3: Requerimientos especiales para testeo de especímenes en doblez (SENT)**

**Especímen:** El espécimen para ensayo de doblez (**Single Edge Notch Tensión, SENT**) es una viga con una sola muesca, es sometida a flexión a tres puntos. La longitud de soporte ( $L$ ) es por lo general tres veces el ancho ( $W$ ) de la probeta. Las dimensiones vienen especificadas en la figura 4:



*Figura 4. Probeta estándar proporciones y tolerancias*

Fuente: Norma ASTM E 399.

**Preparación:** Por lo general las muestras vienen pre agrietadas, especialmente si son requeridas para ensayos de fatiga.

**Equipo:** El equipo a utilizar por lo general es una maquina universal de ensayos, la cual se configura con sus respectivos accesorios para replicar un sistema a doblez en tres puntos como se observa en la figura 5:

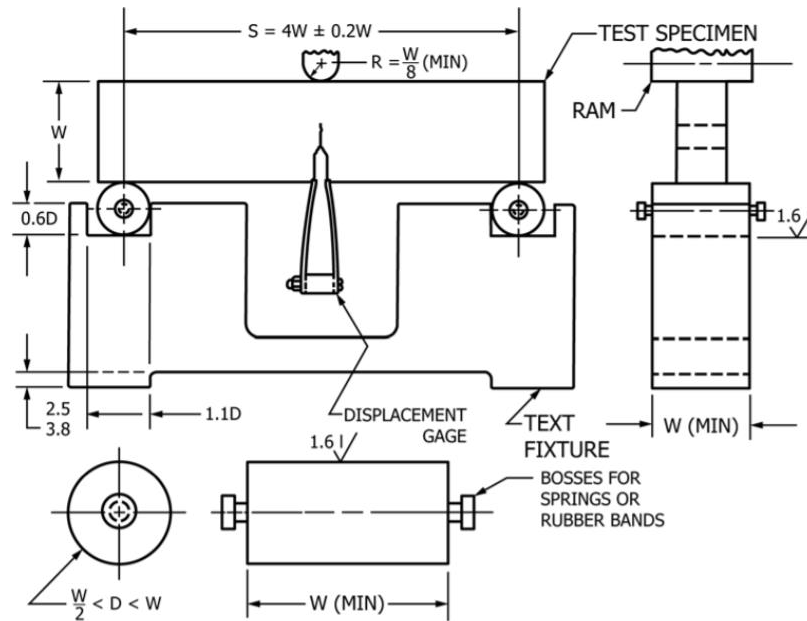


Figura 5. Disposición del ensayo  
fuente: Norma ASTM E 399.

**Procedimiento:** Se posiciona la probeta de forma centrada en el sistema y se procede a iniciar la carga, a una velocidad en el rango entre  $0.55$  y  $2.75 \text{ MPa} \cdot (\text{m})^{1/2}/\text{s}$  para especímenes de una pulgada de ancho.

Para concluir esta sección, se debe decir que no existe una norma para ensayos de fractura para materiales compuestos impresos por manufactura aditiva.

#### **Anexo A5: Requerimientos de ensayo para especímenes compactos de disco, DC(T)**

**Especímen:** El espécimen DC(T) es una probeta plana de muesca única y pre agrietada por fatiga la cual es cargada a tensión. Su configuración se puede apreciar en la figura 6:

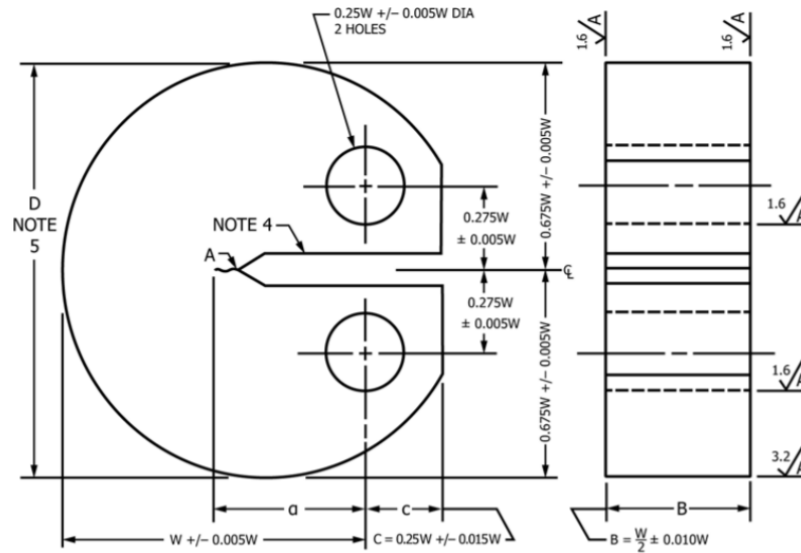


Figura 6. Probeta en forma de disco  
fuente: Norma ASTM E 399.

**Preparación:** Este tipo de probeta no requiere procedimientos particulares de preparación, la forma de preparación de una probeta estándar también aplica para esta configuración.

**Equipo:** Para el montaje en el equipo, es necesario el uso de garras tipo Clevis para sostener la probeta en posición. Su configuración se puede apreciar en la figura 7:

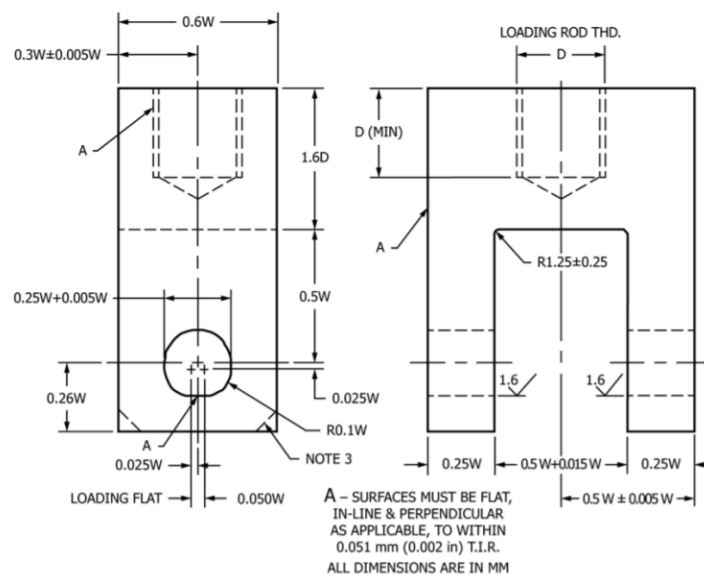


Figura 7. Garras para Probeta de disco DC(T)  
fuente: Norma ASTM E 399.

**Procedimiento:** Se debe tener especial cuidado al realizar el montaje puesto que una mala alineación puede ocasionar la carga excéntrica en la probeta, la cual a su vez puede alterar los resultados y anular el ensayo. La velocidad de carga debe estar en el rango entre 0.55 y 2.75  $MPa*(m)^{1/2}/s$  para especímenes de una pulgada de ancho.

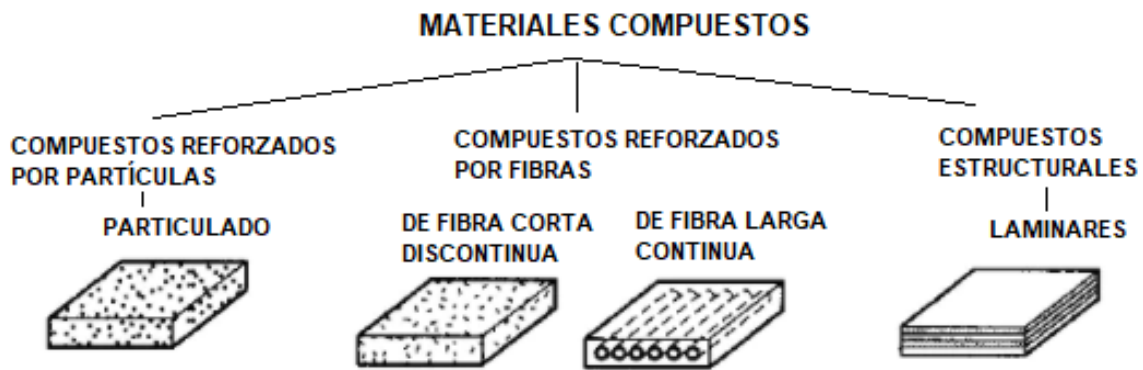
### 2.2.5 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son combinación de dos o más micro o macro constituyentes distintos en cuanto a forma y composición química, además de ser insolubles entre sí. Estos componentes deben cumplir ciertos requisitos, de manera que exista una fase discontinua y rígida, conocida como refuerzo y otra fase por lo general menos rígida denominada matriz como se aprecia en la (figura 8). De esta forma se busca que las propiedades del material resultante sean superiores a la de los componentes por separado.

Una característica en los materiales compuestos es que son muy anisótropos, a causa de la falta de homogeneidad en la distribución y orientación de los elementos de refuerzo dentro de la matriz, como también de la efectiva adherencia entre estos mismos. Es por esta razón que se deben considerar previamente los constituyentes del conjunto.

Un ejemplo de materiales compuestos lo encontramos en la industria aeronáutica, quienes buscaban que la estructura de sus aeronaves tuviese una reducción de peso, mayores prestaciones y por ende una mayor durabilidad, ya que esto les ahorraría millones en tareas de mantenimiento. Asimismo, la naturaleza nos muestra que también posee materiales compuestos uno de estos y quizá el más común es la madera, la cual se constituye de fibras largas de celulosa (refuerzo) rodeadas de lignina (matriz) (Parrado-Agudelo & Narváez-Tovar, 2019).

La figura 8 describe los diferentes tipos de refuerzos que se encuentran en los materiales compuestos.



*Figura 8. Refuerzo en materiales compuestos*  
fuente: Autores

Se conoce como la fase discontinua que se agrega al material compuesto, con el fin de conferirle las propiedades que la matriz no posee, por ende, es el encargado de absorber las tensiones e incrementar la resistencia y la rigidez mecánica del conjunto. El refuerzo puede ser del siguiente tipo:

- Refuerzo por fibras cortas.
- Refuerzo por fibras largas.
- Refuerzo por láminas.

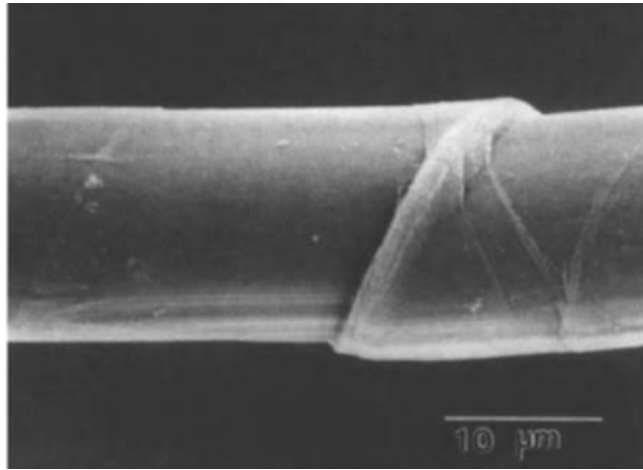
En la actualidad los materiales compuestos más importantes son los reforzados por fibras, debido a las altas prestaciones alcanzadas en cuanto a su relación de propiedades mecánicas y peso.

### 2.2.6 Onix

Material compuesto desarrollado por Markforged®, su estructura se compone de una matriz de nylon reforzada con fibras de carbono continua, otorgándole a este termoplástico propiedades de alta resistencia como la del aluminio 6061 con una reducción de peso del 50%, además de un excelente acabado superficial, alta resistencia química y deflexión térmica. Esto le permite a este filamento usarse para impresión de herramientas, accesorios y hasta piezas finales de uso ingenieril (Markforged, 2020).

### 2.2.7 Kevlar

El kevlar es una aramida proveniente de una poliamida aromática conocida como poliparafenileno tereftalamida cuya estructura química es de anillos aromáticos dando resultado las cadenas moleculares de un polímero altamente rígido, resistentes térmica y mecánica, siendo fabricadas por extrusión e hilado. En la figura 9 se aprecia la microscopia de una fibra de aramida (Miravete, 2012).



*Figura 9. Fibra de aramida*  
fuente: Materiales compuestos I (Miravete, 2012).

Fue sintetizada por primera vez en 1965 gracias a la Química Stephanie Kwolek bajo la compañía de Dupont, a continuación, se muestra en la tabla 2 una comparativa de las propiedades mecánicas de distintas fibras (fibra de carbono, kevlar y vidrio) utilizadas como refuerzo y matrices poliméricas.

*Tabla 2. Comparación de propiedades mecánicas entre fibras*  
fuente: Markforged en línea (Markforged, 2020).

Material	$E$ [GPa]	$\sigma$ [MPa]	Densidad relativa	% alargamiento
Nylon	1.7	33.5	1.1	4.5
Onyx	1.4	36	1.2	33
Norma	ASTM D638	ASTM D638	NA	ASTM D638
Carbon	60	800	1.4	1.5
Fibra de vidrio	21	590	1.5	3.8
Kevlar	27	610	1.2	2.7
Norma	ASTM D3039	ASTM D3039	NA	ASTM D3039

En cuanto a sus aplicaciones es esencial en tareas donde se busca reducir el peso sin comprometer la resistencia y gracias a sus excelentes prestaciones mecánicas a la tracción y al impacto, fabricación de cables y chalecos antibalas entre otros.

### 3 Materiales y Métodos

#### 3.1 Selección del tipo de probeta

Para realizar los ensayos se eligió la probeta tipo SENT por las siguientes razones según (ASTM E 399):

- La probeta DC(T) (Compact Disc Tensión) requiere de un dispositivo especializado para realizar el ensayo debido a que la carga debe ir perpendicular al entalle en dirección de los agujeros de agarre. Este dispositivo no está disponible en el laborío.
- La probeta tipo SENT tiene mayor espacio de propagación y facilita el análisis del crecimiento de la grieta.
- La alineación de la carga es más simple de hacer en el SENT que en el DC(T). Si existe desviación del eje de aplicación de la fuerza, se pueden generar modos de carga II y III.

## 3.2 Materiales y Equipos

### 3.2.1 Onix y Kevlar

La impresión de las probetas se hizo con un 100 % de densidad de matriz para tener las propiedades completas del material. La figura 10 representa dichos materiales.



*Figura 10 Onyx y Kevlar*

Fuente: Autores

### 3.2.2 Máquina de Ensayos

Para dar cumplimiento a los tres últimos objetivos planteados fue necesario realizar ensayos de flexión a tres puntos utilizando la máquina de ensayos mecánicos de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

El equipo mostrado en la figura 11 fue la MTS Bionix Servohydraulic 370.02 que cuenta con una celda de carga de 25 kN. Adicional a eso cuenta con un sistema de apoyos para ensayos a tres puntos que combinado con un montaje especial (descrito a detalle más adelante) fue el que se utilizó para obtener los resultados experimentales.

Este equipo es capaz de aplicar la fuerza necesaria para mantener una velocidad constante determinada por la necesidad del ensayo y mostrar en un monitor el valor de la fuerza instantánea a medida que se está ejecutando la prueba, en tiempo real.

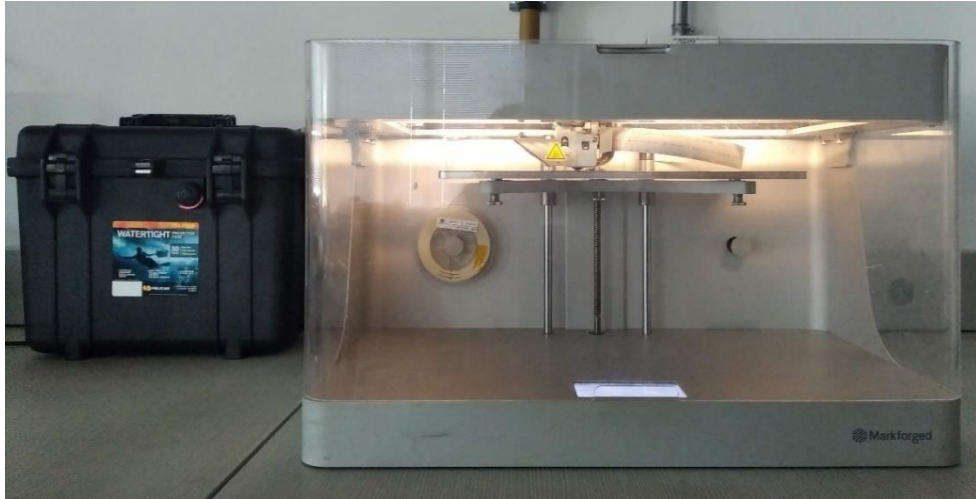


*Figura 11. equipo MTS Bionix Servohydraulic 370.02*

fuelle: Autores

### 3.2.3 Impresora 3D

La fabricación de los cuerpos de prueba que en adelante se llamarán probetas se realizó por el método de manufactura aditiva (AM) mediante modelado por deposición fundida (FDM) tal y como lo exige el objetivo principal de la investigación. Para esto se empleó la impresora 3D Mark Two de MarkForged® como se aprecia en la figura 12.

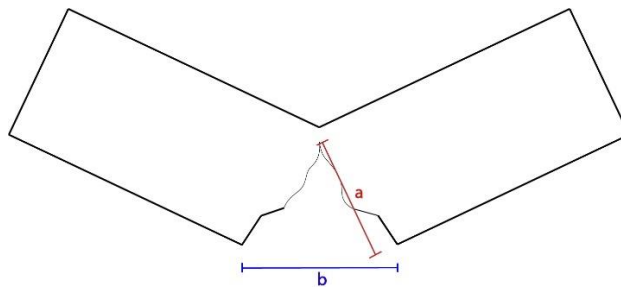


*Figura 12. impresora 3D Mark Two de MarkForged®*  
fuente: Autores

La Mark Two es un equipo que permite imprimir con filamentos para matriz cuyo punto de fusión puede llegar hasta los 280°C (Onix, Nylon White), tiene una resolución que va desde los 100 a 200 micrómetros y con su cabezal permite reforzar con una fibra continua como vidrio, kevlar y carbono.

### 3.2.4 Montaje de experimento

En el presente trabajo se hace necesario medir la abertura de los bordes del entalle y la longitud de la grieta, ver figura 13, en tiempo real para cotejarlo con la fuerza que está actuando en el instante aplicada por la maquina universal.



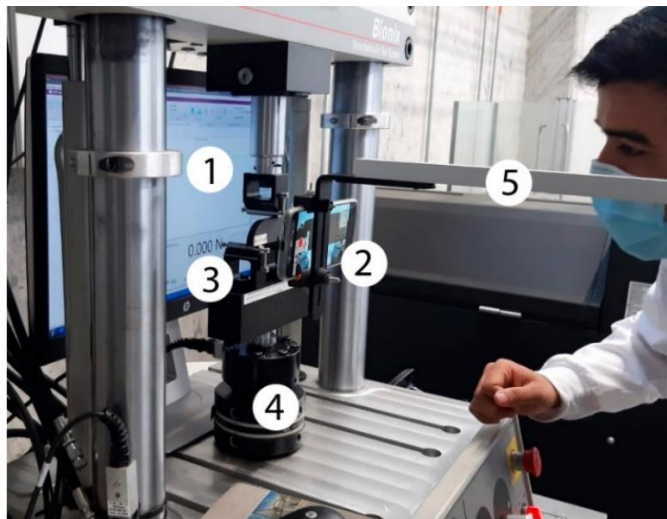
*Figura 13. Abertura y longitud de grieta.*  
Fuente: Autores.

- a: Abertura de los bordes del entalle
- b: Longitud de grieta.

Existen unas galgas de apertura de boca de grieta que funcionan como accesorios externos para la MTS con las cuales se puede medir la amplitud de la grieta. Sin embargo, no se cuenta en el laboratorio de la UIS con ellas. Más, aun faltaría un instrumento con el cual medir la longitud de la grieta en tiempo real (Markforged, 2019).

Debido a lo expuesto anteriormente se hace una adaptación del laboratorio como se aprecia en la figura 14. Los datos se obtienen capturando imágenes instantáneas para luego medirlas haciendo una comparación digital de imágenes.

Teniendo en cuenta que los ensayos se realizaron en épocas de cierre total debido a la pandemia causada por el COVID 19, los dispositivos a los que se tuvo acceso fueron limitados y se debió acondicionar algunos de ellos para cumplir funciones secundarias.



1. Monitor.
2. Cámara.
3. Montaje de probeta.
4. Celda de carga.
5. Soporte.

*Figura 14. Ensayo*  
Fuente: Autores.

Los resultados de fuerza de la máquina universal pueden verse en tiempo real en el monitor del computador con que cuenta el laboratorio, por lo que se optó por poner una cámara a aproximadamente 5 centímetros de la probeta y el monitor detrás del sitio donde ocurren los ensayos. La cámara es de un teléfono Xiaomi mi 10t Pro con una resolución de 108 MP y un lente óptico 5P con apertura  $f/2.4$  y campo de visión de  $123^\circ$ . Esto permite que a la vez que se vaya captando la longitud de grieta también se aprecie la fuerza que se está aplicando en ese momento.

### 3.2.5 Microscopio

Para dar cumplimiento al objetivo específico número 4 (análisis fractográfico) se utiliza el microscopio electrónico de barrido (FEG, Field Emission Gun) [22] mostrado en la figura 15 que puede ser operado en tres modos: en modo de alto vacío, bajo vacío y ambiente completo (ESEM). Por lo tanto, puede obtener imágenes de la mayoría de los materiales y realizar análisis elementales, a menudo con una preparación mínima de la muestra. Los detectores de imágenes disponibles incluyen electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE), catodoluminiscencia (CL) y difracción retrodispersada de electrones (EBSD) (Buckman, 2012).

El sistema está equipado con el software "MAPS" de FEI que permite la adquisición automatizada de imágenes de alta resolución de áreas extensas, y la suite "Aztec" de Oxford Instruments brinda la posibilidad de adquirir mapas de composición elemental en áreas extensas, escaneos lineales elementales y la capacidad de proporcionar análisis de partículas específicas.



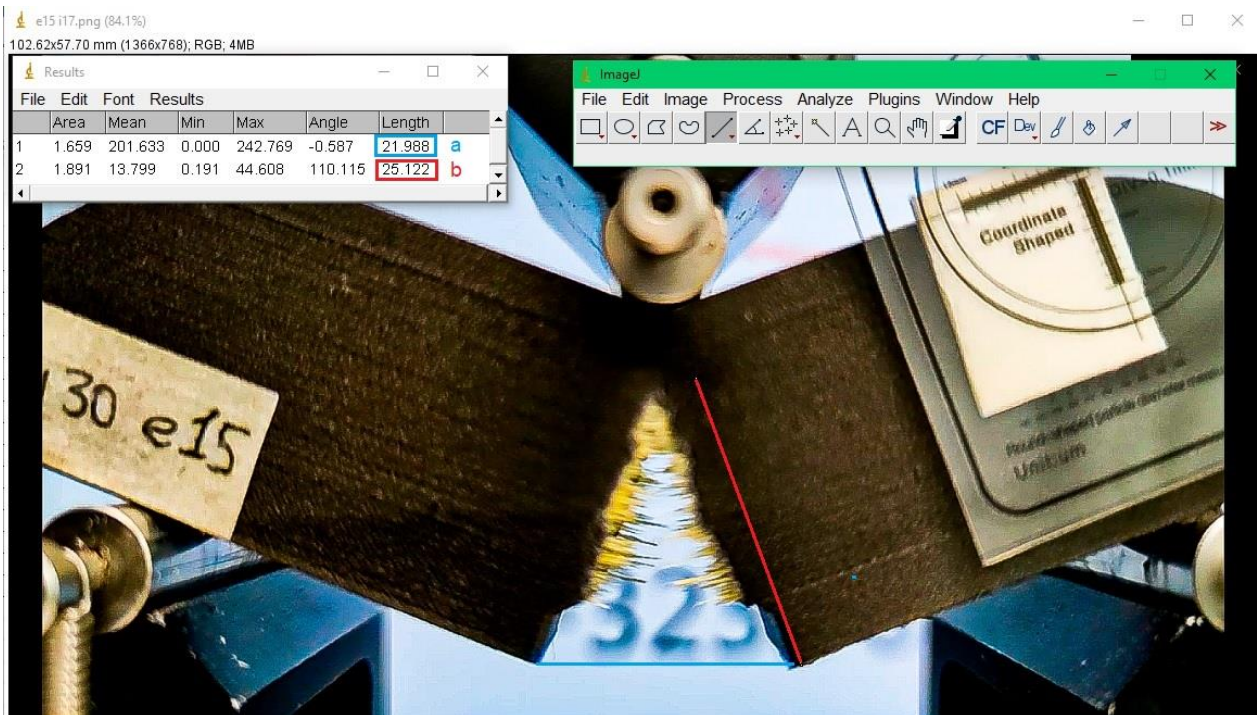
*Figura 15. Equipo microscopia UIS*

Fuente: Autores.

El microscopio a su vez cuenta con una cámara de Faraday que inhibe el ingreso de señales externas al microscopio para evitar interferencia a la hora de disparar los electrones y tomar las imágenes.

### 3.2.6 Image J

Es un software de procesamiento de imágenes en el que se pueden añadir imágenes de 8, 16 y 32 bits, es de dominio público y fue programado en Java por el US National Institute of Health. Este software permite desde hacer contrastes, invertir colores, hacer transformaciones, hasta comparar píxeles para hallar dimensiones de objetos en fotografías o material visual. A continuación, en la figura 16 se aprecia la interface ImageJ (Collins, 2018).



*Figura 16. Software IMAGE J*

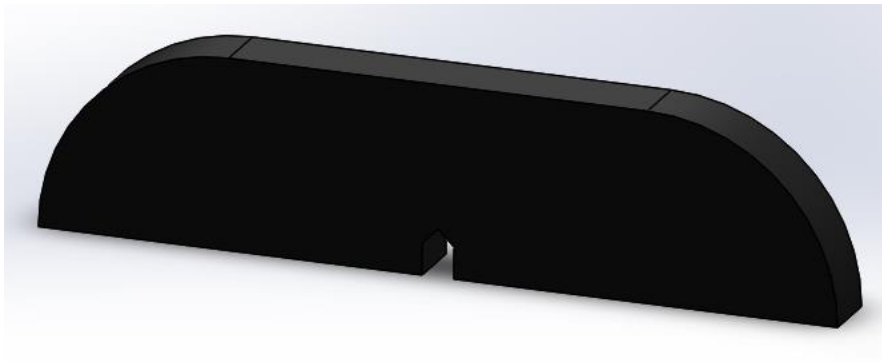
Fuente: Autores

El software puede ser ejecutado en un applet en línea, con una aplicación ejecutable o también existen versiones de fácil descarga para equipos de cómputo que cuenten con Java 5 o posterior. Este software es ampliamente utilizado en la industria biomédica para medir imágenes tomadas en microscopios o comparar escalas a nivel molecular.

### 3.3 Cuerpos de prueba

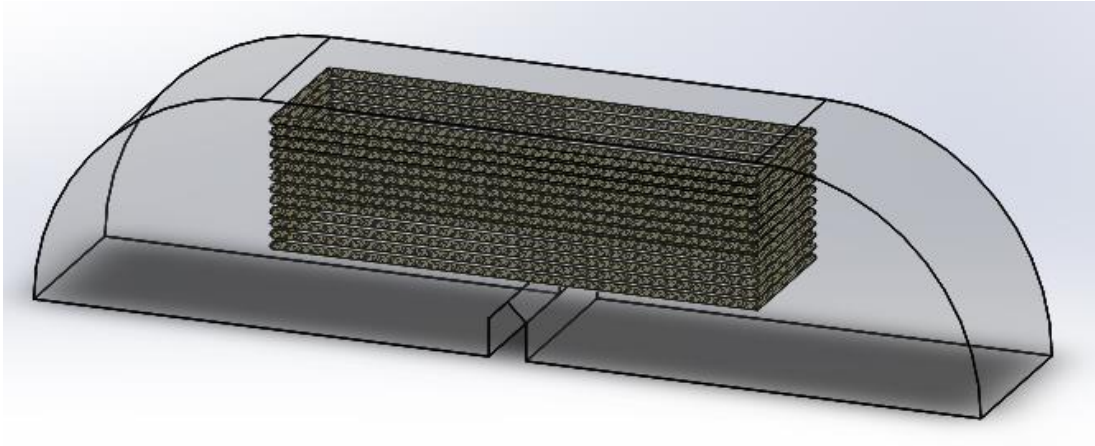
Las probetas según el ensayo que se eligió tienen forma rectangular con un entalle que guía el inicio de la grieta para analizar la trayectoria desde ese punto. Se eligió realizar el ensayo de flexión a 3 puntos debido a que permite una mejor observación de la trayectoria de la probeta como también da un mayor campo de desplazamiento de la grieta. Adicionalmente, el alineamiento de la probeta no depende de las garras como sería el caso de las probetas DC(T) o CT descritas en ASTM E-399 (ASTM E 399).

*Diseño:* En un principio se pretendió fabricar la probeta de la forma convencional (rectangular) como lo indica la norma, pero con el fin de ahorrar del material se pasó a una probeta con las esquinas superiores curvadas como se observa en la figura 17 teniendo en cuenta que esa zona no está cargada.



*Figura 17. Probeta experimental redondeada*  
fuente: autores

La intención del trabajo es analizar la propagación de grietas en materiales compuestos reforzados con fibra de Kevlar, por lo que se realizó la disposición para la impresión mostrada en la figura 18 para la impresión.



*Figura 18. CAD de la probeta de 25 mm de espesor con refuerzo de fibras de Kevlar*  
fuente: autores

*Fabricación:* La probeta se realizó empleando la manufactura por deposición fundida con la impresora 3D MarkTwo de Tecnoparque-SENA.

### **3.4 Ensayo de propagación de grieta (Flexión a 3 puntos)**

El ensayo se llevó a cabo tomando como guía la norma ASTM E-399, aunque esta sea para metales y no para materiales compuestos impresos en 3D como es el caso presente. Para realizar la parte experimental se tiene una probeta como la figura 18. La probeta se apoya sobre dos rodillos de 10 mm de diámetro con una distancia entre ellos de 120 mm (support span) como se aprecia en la figura 19; sobre la probeta se aplica una carga una velocidad de 1 mm/min. Durante este proceso se va filmando con un dispositivo en modo cámara lenta (30 cuadros por segundo), de estas fotografías se obtiene la fuerza que actúa en el instante como también se mide la longitud y apertura de grieta en ImageJ (Collins, 2018).

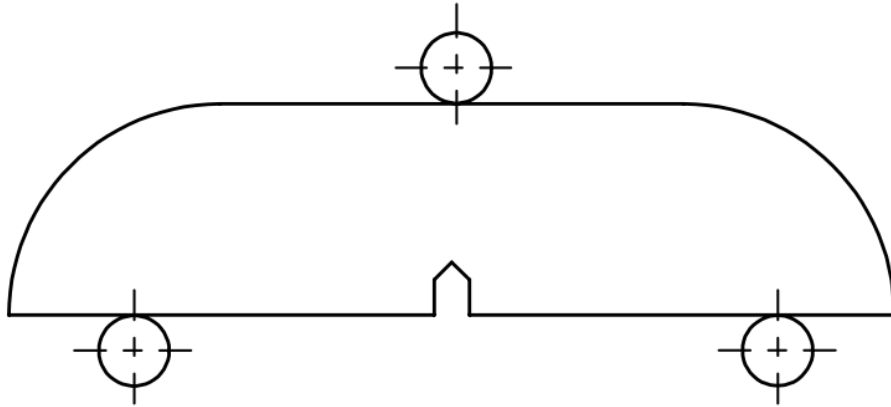


Figura 19. Vista Esquemática frontal de la probeta a flexión tres puntos  
Fuente: Autores.

Se ensayaron un total de 5 probetas de 10, 15, 20, 25, 30 mm de espesor.

Para obtener los resultados se tomaron 15 instantáneas aproximadamente en cada video y a cada una de las imágenes se le midió la longitud y la apertura, con la respectiva fuerza que registraba el monitor al momento de la captura. En la figura 20 se muestra la forma como se obtuvo las medidas de longitud y apertura de grieta.

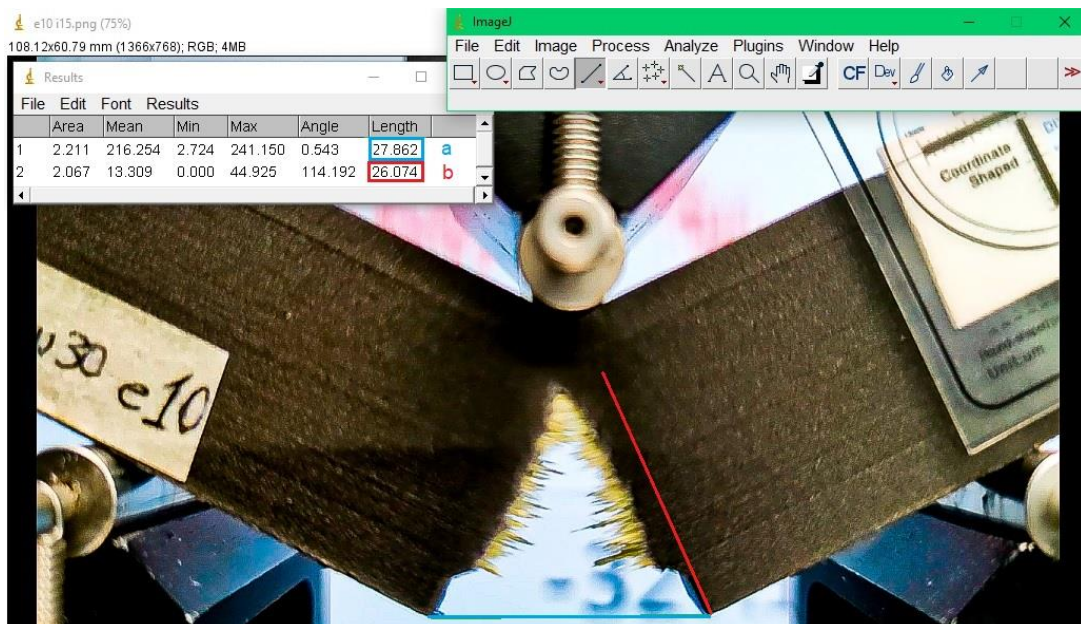


Figura 20. Imagen de cálculo tipo  
Fuente: Autores.

Cada probeta se ensayó con una longitud de referencia adherida (escala en la esquina superior derecha, figura 20) con la intención de que fuera captada por la imagen y así poder hacer la comparación de la cantidad de píxeles y tener una medida aproximada de lo que se requiere.

Se realizaron mínimo 15 medidas por probeta. En la figura 20, aparece un cálculo tipo donde se tiene un dato de abertura de grieta de 27.8 mm y una longitud de 26 mm.

Cada ensayo se hizo con su respectivo video en cámara lenta de donde se tomaron un número mayor a 15 instantáneas, en cada imagen se tomó una medida como referencia para hallar los dos datos posibles para las cinco probetas de distintos espesores ensayadas como lo muestra la figura 21. Estos datos se llevaron a la hoja de cálculo donde se realizaron las gráficas y las regresiones necesarias para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto.



*Figura 21. Probetas ensayadas*

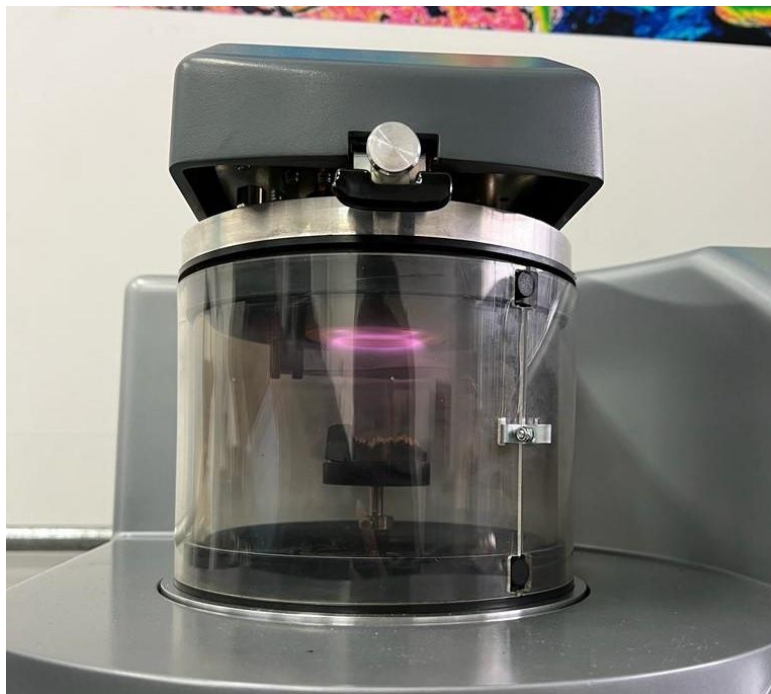
Fuente: Autores.

### 3.5 Microscopía

Los análisis microscópicos se llevaron a cabo en el laboratorio de microscopía de la UIS sede Guatiguará.

Como primera medida hubo que desecar las muestras debido a que el Nylon (matriz del Onix) absorbe la humedad y para hacer la pruebas en el microscopio debe estar totalmente seco. Ya en el laboratorio se procede a hacer un recubrimiento en alto vacío. Las muestras fueron recubiertas con una fina capa de oro que mejorara la conductividad de la muestra para mejorar la calidad de la imagen captada por el equipo como se aprecia en la figura 22.

Generalmente las muestras tardan entre 60 y 90 segundos, sin embargo, en este caso el tiempo fue de 310 segundos debido al alto contenido húmedo que presentaron las muestras (Buckman, 2012).



*Figura 22. Recubrimiento de oro microscopia UIS*

fuelle: autores

Para la toma de las imágenes se colocan las muestras adheridas a unos stubs metálicos y luego se llevan al microscopio que trabaja en alto vacío y con un voltaje de aceleración de 25 kV. Para captar las imágenes se utilizan electrones secundarios (ES) a través del Everhart Thornley detector (ETD) y electrones retrodispersados (BSE) con el Back scattered electron detector (BSED) tipo SSD.

También se realizó un análisis químico para conocer la naturaleza del material en un punto escogido aleatoriamente con el fin de identificar los componentes de la matriz de Onix, esto

se realiza con el detector EDAX APOLO X con una resolución de 126.1 eV (EDS, Energy-Dispersive Spectroscopy), el software con el que trabaja esta detección semi-cuantitativa de elementos químicos es el EDX Genesis.

## 4 Resultados

### 4.1 Resultados Flexión 3 puntos

A partir del ensayo a tres puntos y utilizando el software Image J se obtuvieron los datos de longitud de grieta, abertura de grieta y fuerza instantánea aplicada. A continuación, se presentan los dos resultados longitud y abertura.

#### 4.1.1 Longitud de grieta

La figura 27 muestra la fuerza normalizada (ecuación 9) contra la longitud de grieta normalizada, (ecuación 10).

*Fuerza normalizada:*

$$Fn = \frac{N}{e} \quad (9)$$

donde:

Fn: Fuerza normalizada.

e: Espesor.

N: fuerza instantánea aplicada por la maquina universal.

*Longitud normalizada:*

$$Ln = \frac{a}{w - a} \quad (10)$$

Donde:

Ln: Longitud normalizada.

a: Longitud de grieta (incluyendo la longitud del entalle).

w: Altura de la probeta.

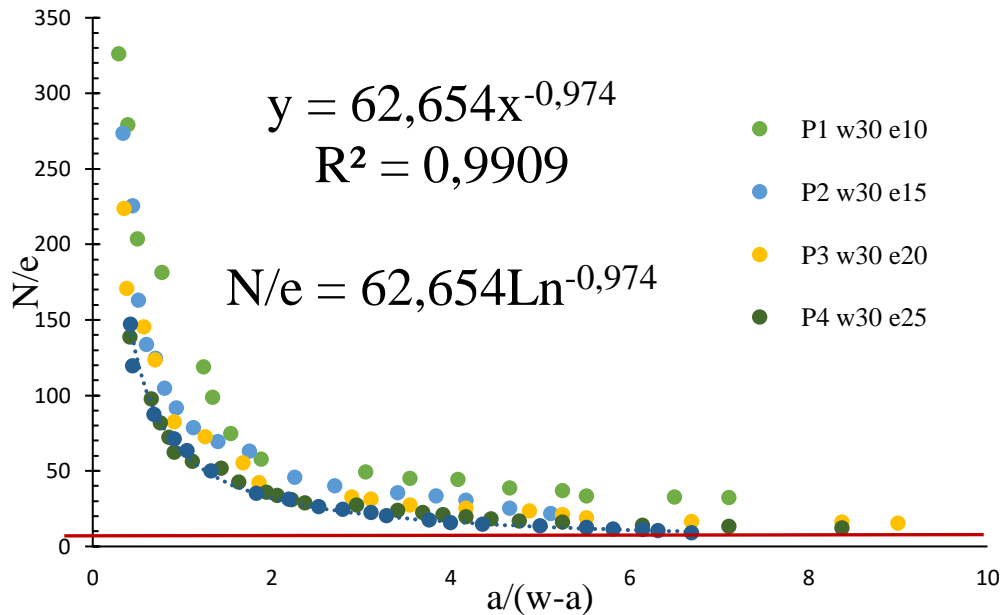


Figura 23. Fuerza vs Longitud de grieta normalizadas  
fuente: autores

En la figura 23 se muestran los resultados de la carga aplicada en el momento de la toma de la instantánea respecto a la longitud de grieta en el mismo tiempo. Ese proceso se realiza para los 5 diferentes espesores de muestra.

De la figura 24 se puede establecer el límite de crecimiento de grieta. En adelante los datos obtenidos se hacen asintóticos en valores que oscilan entre 8 y 9 N/mm en el eje vertical, adaptándose 8. De la misma forma se observa que el modelo de crecimiento de grieta respecto de la carga aplicada tiene un 99% ( $R^2$ ) de ajuste a los datos obtenidos experimentalmente.

Según el modelo expresado en la figura 23, cada espesor analizado se tendría un límite de crecimiento de grieta especificado en la tabla (4) y calculado como se muestra en la ecuación (11):

$$N = Y * e \quad (11)$$

donde:

N: Fuerza para el límite de crecimiento de grieta

Y: Valor asintótico en el eje "y" (8.5)

e: Espesor de la probeta

La tabla 4 a continuación recopila los datos obtenidos para la fuerza límite de crecimiento de grieta (N) y (Y) el valor asintótico del eje y.

*Tabla 3: Limite de crecimiento de grieta para cada espesor*  
fuente: autores

Y	8,5
<b>Espesor [mm]</b>	<b>Fuerza [N]</b>
10	85
15	127,5
20	170
25	212,5
30	255

Se propone entonces un modelo de crecimiento de grieta según la longitud normalizada mostrada en la ecuación (12)

$$N/e = 62,654 \left( \frac{a}{w-a} \right)^{-0,974} \quad (12)$$

#### 4.1.2 Abertura de grieta

De la misma manera que en el análisis de longitud de grieta, se analizó la abertura de grieta enfrentando la carga aplicada (ecuación 9) contra la abertura (ecuación 12) normalizadas para determinar la regla del crecimiento de grieta. La figura 22 muestra esta comparación para los 5 espesores de muestra ensayados.

*Abertura normalizada ecuación (13)*

$$Bn = b - h \quad (13)$$

donde:

Bn: Abertura normalizada.

b: Abertura de grieta medida experimentalmente.

h: Ancho del entalle.

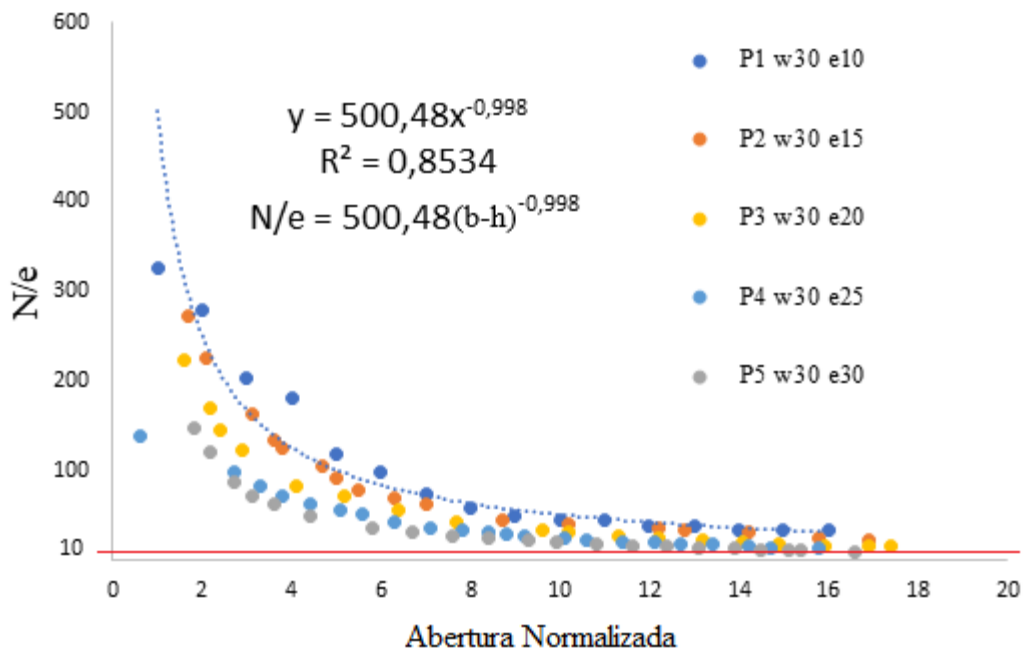


Figura 24. Fuerza vs Abertura de grieta normalizadas

Fuente: Autores

De la figura 24 se determina que la regla de crecimiento de grieta después de hacer el ajuste matemático de la gráfica es la siguiente:

$$N = e * 500.48X^{-0.998} \quad (14)$$

donde:

N: Fuerza instantánea

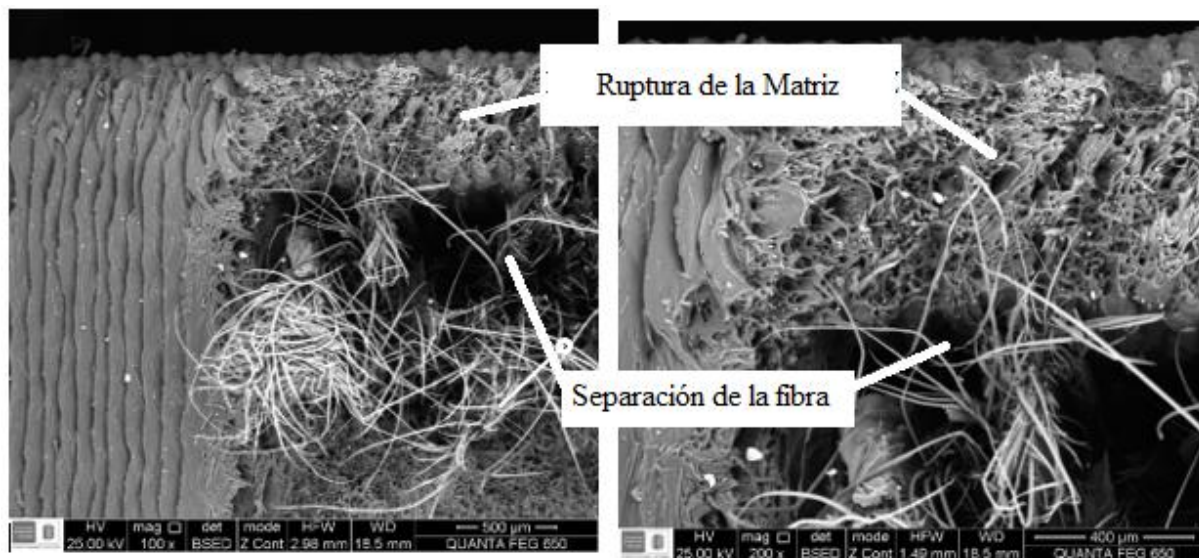
La ecuación (14) determina qué tanto se abre la grieta respecto a la fuerza aplicada para diferentes espesores. Adicionalmente se observa que el modelo propuesto representa un 85% los datos experimentales.

## 4.2 Resultados Microscopía

La aplicación de carga se detuvo antes de llevar a fractura final, como se muestra en la figura 22 Para poder observar las muestras al microscopio electrónico, se hizo una ruptura final con nitrógeno líquido. Esto garantiza que la superficie se preserve y que el ligamento residual presente una falla frágil.

En la prueba de microscopía se observó el momento en que la grieta empieza a crecer, una transición en la mitad de la longitud de la grieta, el final de la grieta y la adherencia de la fibra de kevlar con la matriz de onyx.

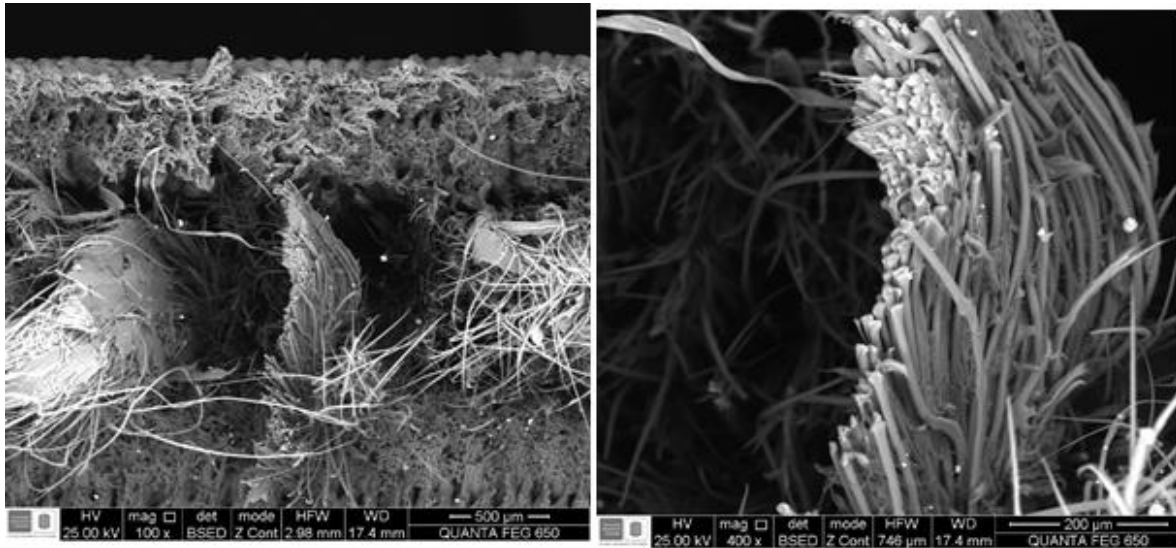
En la figura 25 tomada en el inicio del entalle se aprecia cómo hay un desprendimiento de la fibra de kevlar de la matriz de onyx.



*Figura 25. Zona de inicio de grieta*

fuelle: microscopia uis

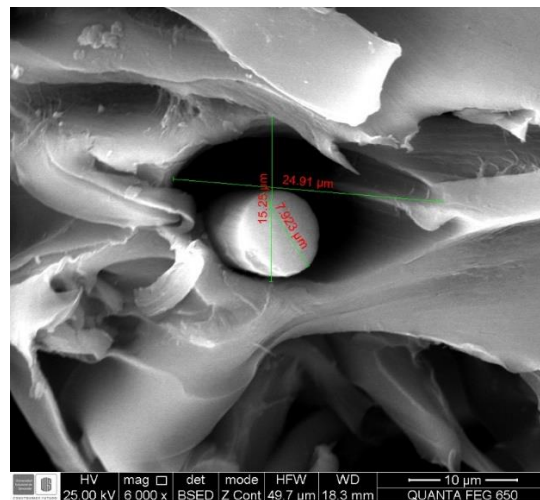
En la figura 26 se observa la ruptura de las fibras de refuerzo (kevlar) en la zona media en dirección de la longitud de la grieta, se puede asegurar que la forma uniforme que tiene la falla es debido a que tuvo una buena adhesión la fibra con la matriz al momento de la impresión de la probeta.



*Figura 26. Falla de fibras de Kevlar*

fuelle: microscopia uis

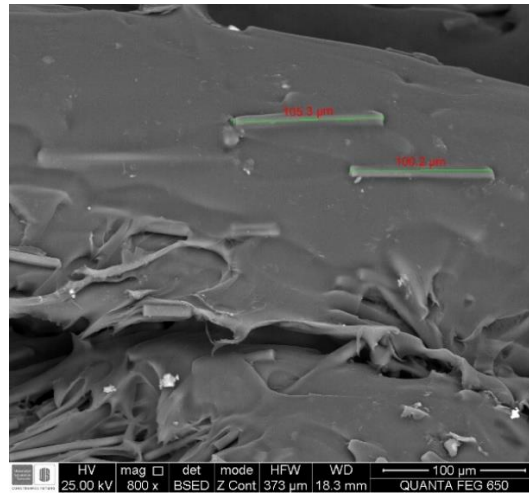
También se puede observar en la figura 27 la distribución aleatoria de la fibra corta de carbono en la matriz de nylon para formar el ónix, se percibe que algunas de estas fibras se rompen con la falla por lo que se puede ver un corte transversal de la misma que permite medirla, aproximadamente  $8\mu\text{m}$ .



*Figura 27. Corte transversal de una fibra de carbono*

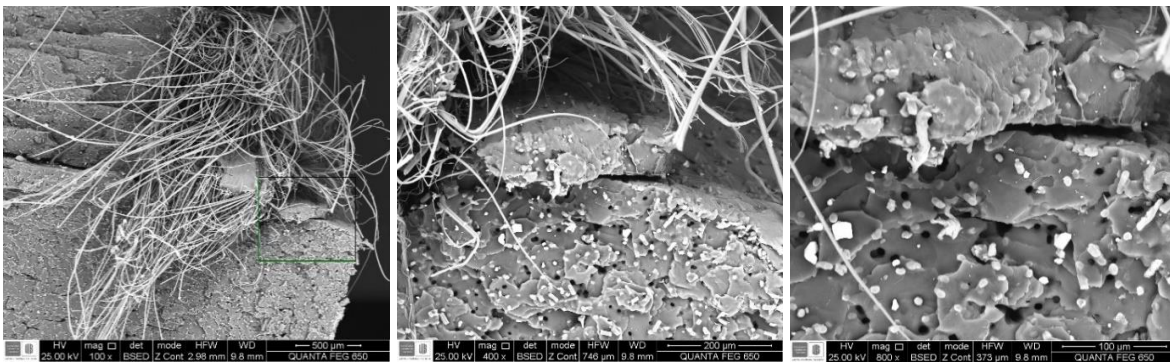
fuelle: microscopia uis

En la figura 28 se permite evidenciar la longitud de una fibra corta de carbono que refuerza el ónix, con una medida de aproximadamente  $100\mu\text{m}$ .

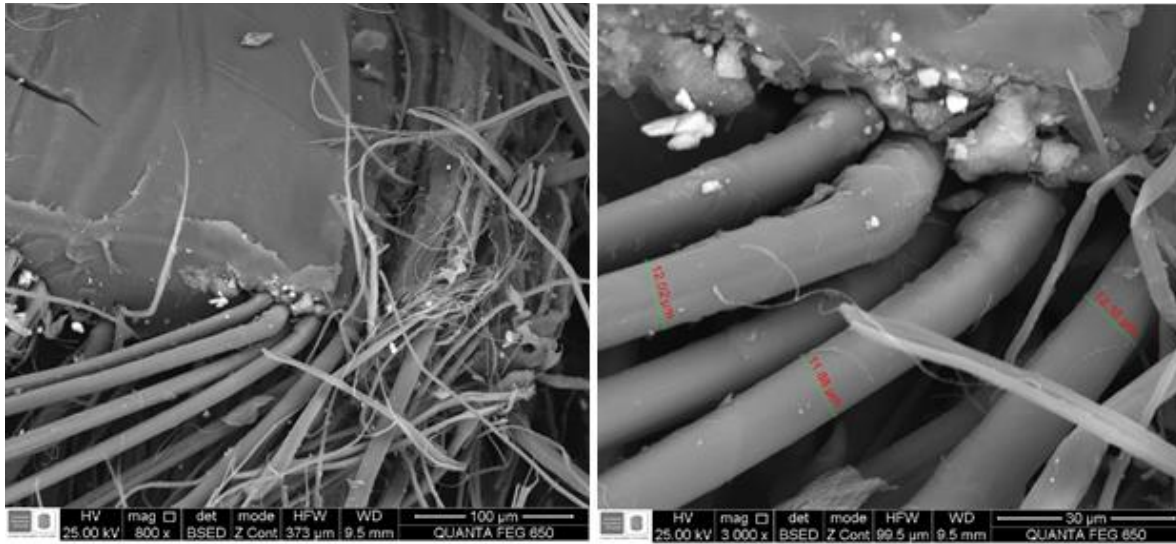


*Figura 28. Fibra de carbono longitudinal*  
fuente: microscopia uis

A continuación, en la figura 29 y 30 se puede apreciar una excelente adhesión entre la fibra de refuerzo (kevlar) y la matriz de ónix, adicional a eso se obtiene la medida del diámetro de las fibras de kevlar que ronda cerca de los 12  $\mu\text{m}$ .



*Figura 29. Zona final de la grieta, ruptura manual*  
fuente: microscopia uis



*Figura 30. Fibras de Kevlar*  
fuente: microscopia uis

## 5 Conclusiones

Se analizó la propagación de grieta en un material compuesto (onyx) reforzado por fibras continuas de kevlar obtenido por manufactura aditiva por deposición fundida. La metodología se basó en la norma ASTM E-399.

Para diferentes espesores del material compuesto se obtuvieron las curvas de carga contra longitud de grieta normalizadas y de carga contra abertura de grieta normalizadas.

De las curvas obtenidas para el compuesto onyx+kevlar, analizando la longitud de grieta, se logró obtener el modelo de crecimiento de grieta:  $N/e = 62,654\left(\frac{a}{w-a}\right)^{-0,974}$  donde, “N/e” representa la carga normalizada y “Ln” la longitud de grieta, medidas experimentalmente. Finalmente se obtuvo un límite de crecimiento de grieta estimado en  $N/e = 8.5$  [N/mm].

Analizando la abertura de grieta se obtiene el modelo de apertura de grieta  $N/e = 500,48(b-h)^{-0,998}$  y un límite de crecimiento de grieta dado en  $N/e = 10$  [N/mm].

Se obtuvo un análisis de microscopía que permitió conocer el comportamiento del material a medida que la grieta va creciendo. Se observaron mecanismos de falla de rompimiento de matriz, separación de fibra matriz y en algunos casos se evidenció que hubo adhesión matriz-fibra.

## 6 Recomendaciones

Como recomendaciones se plantean:

1. Realizar ensayos similares en muestras hechas de matriz polimérica, como onyx o nylon con el fin de separar el efecto de la fibra sobre la apertura y propagación.
2. Ensayar una mayor cantidad de cuerpos de prueba con el objetivo de mejorar la repitibilidad e incertidumbre de los datos y así otorgarle más confiabilidad al estudio.
3. Mejorar el método de fabricación con el fin de garantizar una mejor homogenización, evitando las posibles discontinuidades en el material.
4. Mediante fractografía analizar el modo de falla del onyx y kevlar.

## 7 Referencias

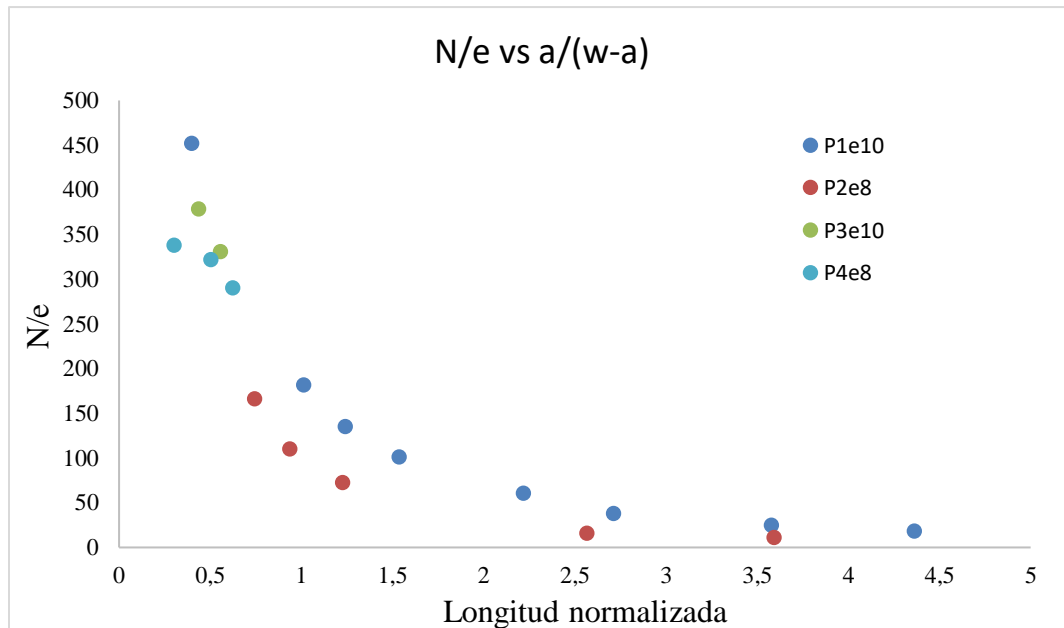
- (s.f.). Obtenido de <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/244627-Innegral-el-nuevo-refuerzo-en-la-industria-de-los-materiales-compuestos.html>
- ASTM E 399. (s.f.). Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- Belloni, V., Ravanelli, R., Ravanelli, R., Nascetti, A., & Crespi, M. (2020). py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics. *Sensors*, *19*(18), 3832. doi:10.3390/s19183832
- Blaber, J., Adair, A., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, *55*(6), 1105–1122.
- Buckman, J. (2012). *CESEM: Quanta 650 FEG scanning electron microscope (SEM)*. Obtenido de [researchportal.hw.ac.uk](http://researchportal.hw.ac.uk):  
<https://researchportal.hw.ac.uk/en/equipments/cesem-quanta-650-feg-scanning-electron-microscope-sem>
- Calvo Lladó, P. (2012). *Caracterización mecánica, microestructural y a fractura de un material compuesto nanoestructurado de matriz PLA y refuerzo monmorillonita*. Barcelona: ETSEIB.
- Collins, T. (2018). Imagej for microscopy BioTechniques. *BioTechniques*, *43*(1). doi:10.2144/000112517
- Díaz-Rodríguez, J., Pertúz-Comas, A., & González-Estrada, O. (2021). Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites. *Composites Part B: Engineering*, *211*. doi:10.1016/j.compositesb.2021.108657
- Donoso, J. R., Leiva, R., & Labbé, F. (2009). Análisis experimental y numérico del método del intercepto para evaluar la extensión estable de grieta en una probeta C(T) de acero. *Revista de metalurgia*, *45*, 9.

- Gietl, H., Olbrich, S., Riesch, J., Holzner, G., Hoschen, T., Coenen, J. W., & Neu, R. (2020). Estimation of the fracture toughness of tungsten fibre-reinforced tungsten composites. *Engineering fracture mechanics*, 232.
- González, J. (2020). *Practical approach to fracture mechanics. 1 ed.* Amsterdam: Elsevier.
- González-Estrada, O. A., Pertuz Comas, A. D., & Díaz Rodríguez, J. G. (2020). Monotonic load datasets for additively manufactured thermoplastic reinforced composites. *Data in Brief*(29), 105295.
- Ingemecánica. (2018). *Ingemecanica.com*. Recuperado el 15 de Julio de 2020, de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>
- Internacional metalmecánica. (23 de Junio de 2015). *Internacional metalmecánica*. Recuperado el 7 de Julio de 2020, de <http://www.metalmecanica.com/temas/Manufactura-aditiva,-una-tecnologia-revolucionaria-para-la-fabricacion-de-herramientas+105380>
- Leon-Becerra, J., Díaz-Rodríguez, J., & González-Estrada, O. (2020). Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas. *UIS Ingenierías*, 19(2), 161-176.
- Markforged. (2019). *Mark Two (Gen 2)*. Obtenido de s3.amazonaws.com: <https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/F-PR-2027.pdf>
- Markforged. (2020). *Markforged*. Recuperado el 12 de Julio de 2020, de <https://markforged.com/about/>
- Maspoch-Rulduá, M. L. (1993). *Estudio la fractura de materiales compuestos por una matriz de plástico y partículas elastoméricas*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mecasinc . (s.f.). *Mecanizados de precisión*. Recuperado el 17 de Julio de 2020, de El Nylon es un plástico que se mecaniza: <https://www.mecanizadossinc.com/nylon-plastico-se-mecaniza/>
- Miravete. (2012). *Materiales Compuestos I*. Reverté.

- Parrado-Agudelo, J., & Narváez-Tovar, C. (2019). Mechanical characterization of polylactic acid, polycaprolactone and Lay-Fomm 40 parts manufactured by fused deposition modeling, as a function of the printing parameters. *Iteckne*, 16(2), 25-31.
- Pertuz, A. D., Diaz, S., & Gonzales, O. A. (2020). Static and Fatigue Behaviour of CRTP Manufactured by FDM Technique. *International Journal of Fatigue*, 130, 105275. doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.105275
- Ramirez Cruz, J., Terán Guillen, J., Barba Pingarrón, A., Carrera Bolaños, J., Gonzalez Parra, R., & Ordoñez Hernandez, U. (2018). Propagación de grietas por fatiga de acero al carbono con y sin soldadura mig. *Ingeniería mecánica*, 21(3), 167-172.
- Roylance, D. (2001). *Introduction to fracture mechanics*. Cambridge: MIT.
- Taborda Rios, J., Cañas Mendoza, L., & Tristancho Reyes, J. (2017). Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto en la fibra de vidrio. *Dyna*, 35-41.

**Anexo**

Con el objetivo de comprobar la fiabilidad de la metodología de medición de longitud y apertura de grieta se hicieron ensayos con 4 muestras fabricadas en impresión 3D, pero con PLA. Los espesores de las muestras fueron 8 y 10 mm. La figura muestra los resultados de carga contra longitud normalizada.



*Figura 31. Carga vs Longitud normalizadas en PLA*

Fuente: Autores.

La figura 32 muestra los resultados de carga contra abertura de grieta

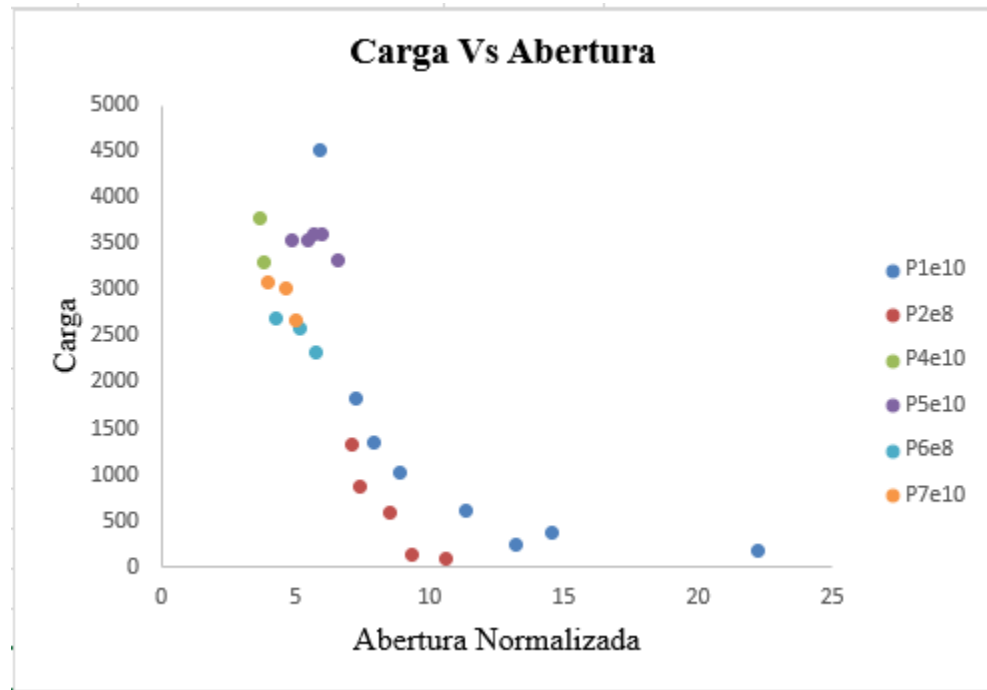


Figura 32. Carga Vs Abertura normalizadas en PLA  
Fuente: Autores.