

Apéndices

Apéndice A. Marco Teórico

Antecedentes

Con el fin de establecer un marco teórico sólido para la evaluación de la resistencia al impacto de materiales compuestos reforzados con diferentes fibras continuas, se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente. Esta revisión incluye proyectos similares en tres ámbitos: internacional, nacional y regional, que aportan diversas perspectivas y metodologías relevantes para la investigación.

Antecedentes Internacionales

Existen investigaciones recientes, tal como el realizado por Kaware & Kotambkar (2022) donde examinan la forma en que los materiales compuestos de polímeros y reforzado con fibra responden a impactos de baja velocidad, así como los factores que pueden aumentar su resistencia al daño. Comienza con una revisión de estos materiales resaltando su comportamiento frágil en comparación con los metales, además de investigar alternativas para mejorar la resistencia al impacto, como la forma de apilamiento de capas y el uso de materiales compuestos híbridos. También se discuten metodologías analíticas, numéricas y experimentales para el análisis del impacto, así como los mecanismos de daño, incluyendo la delaminación y las fracturas.

Otras investigaciones recientes como la de Caminero et al. (2018) estudiaron la resistencia al daño por impacto de compuestos termoplásticos reforzados con fibras continuas fabricados mediante la técnica de modelado por deposición fundida (FDM). Estos estudios han demostrado que la incorporación de fibras continuas puede mejorar significativamente la resistencia al impacto en comparación con los polímeros puros, pero también han revelado que factores como la

orientación de las fibras y las condiciones de impresión pueden influir en el comportamiento al impacto de estos materiales compuestos impresos en 3D. Por lo tanto, es crucial comprender a fondo cómo estos factores afectan la resistencia al daño por impacto para mejorar el diseño y la fabricación de componentes impresos en 3D con compuestos reforzados con fibras continuas.

Antecedentes Nacionales

Desde la perspectiva Tinoco (2013) en su investigación titulada "*Algoritmo para calcular esfuerzos y criterios de falla de tsai-hill, tsai-wu, hashim y hashim-rotam en agujeros circulares en laminados de fibra de vidrio*" en Colombia el uso de materiales compuestos había incrementado notablemente especialmente en la industria aeronáutica y naval, sin embargo, muchos de los diseños en ese momento eran empíricos y carecían de un entendimiento profundo de la mecánica de materiales compuestos y sus modos de falla en consecuencia la investigación tuvo como objetivo principal el desarrollo de una herramienta computacional para calcular los criterios de falla y los esfuerzos en compuestos laminados con agujeros circulares, utilizando el software MATLAB®. En este contexto, la investigación abordó la problemática de fallas en este tipo de materiales, resaltando la necesidad de herramientas efectivas que permitieran predecir y evitar estas fallas en aplicaciones industriales, planteando un enfoque metodológico que incluía la revisión de teorías de falla, desarrollo de un algoritmo en MATLAB® y la validación de los resultados obtenidos. El propósito final era que esta herramienta simplificara y optimizara el análisis de placas laminadas, contribuyendo así a mejorar la seguridad y eficiencia en sus aplicaciones.

En Colombia, la fabricación aditiva ha emergido como una tecnología clave para la producción de materiales compuestos avanzados, especialmente aquellos reforzados con fibras continuas. Sin embargo, uno de los principales retos radica en comprender a profundidad el

comportamiento mecánico de estos materiales, particularmente bajo condiciones de carga cíclica. Pertuz-Comas et al (2022), en su investigación titulada "Flexural Fatigue in a Polymer Matrix Composite Material Reinforced with Continuous Kevlar Fibers Fabricated by Additive Manufacturing", abordaron esta problemática mediante el estudio de materiales compuestos fabricados con la técnica Fused Filament Fabrication (FFF). Este trabajo buscó caracterizar las propiedades a fatiga por flexión alternante de una matriz polimérica reforzada con fibras de Kevlar, identificando los mecanismos de falla asociados.

La investigación combinó pruebas experimentales de flexión estática y a fatiga con modelos numéricos desarrollados en ANSYS®, además de un análisis microscópico de las superficies fracturadas para observar fenómenos como la porosidad de la matriz.

Antecedentes Locales

En el ámbito local, encontramos la investigación realizada por Montesino Loza & Rubio Nieto (2022) en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia, titulado "*Absorción de energía generada por cargas de impacto en estructuras celulares funcionalmente graduadas*" la cual tuvo como propósito principal evaluar mediante el método de elementos finitos (FEM) la influencia de los parámetros geométricos y de graduación funcional en la absorción de energía de impacto en estructuras celulares elaboradas mediante la manufactura aditiva, comparando distintos tipos de geometrías y densidades relativas para determinar su desempeño energético y sus posibles aplicaciones industriales.

Para poder llevar a cabo la investigación, se realizaron diversas topologías de estructuras celulares: hexagonales uniformes, hexagonales funcionalmente graduadas, con porcentajes de densidad relativa, además de simulaciones en el software ANSYS Workbench el cual permitió evaluar las respuestas mecánicas ante cargas de impacto a bajas velocidades, evidenciando que las

estructuras con mejor capacidad de absorción de energía fueron las funcionalmente graduadas. Asimismo, se llega a mostrar que la reducción de la densidad relativa permite mejorar la absorción de energía hasta un punto, después del cual dicha mejora se estabiliza.

Este estudio pone destaca la importancia que puede llegar a tener el diseño geométrico y la graduación funcional frente a la optimización de estrategias en el ámbito de estructuras celulares relacionadas con aplicaciones de seguridad industrial, absorción de impactos y resistencia estructural, y establece una línea de trabajo posible para investigaciones futuras en torno a la fabricación de materiales avanzados.

Un segundo trabajo elaborado en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia, de Acuña Jaimes & Hernández Suarez (2021), “Diseño, simulación y fabricación en manufactura aditiva de un mosquetón de seguridad tipo HMS reforzado con fibra de carbono empleando análisis por elementos finitos.”. El cual se trata de un proyecto que tuvo como objetivo principal analizar el comportamiento mecánico del material compuesto de matriz de nylon con refuerzo de fibra de carbono para compararlo con un mosquetón convencional de aluminio disponible en el mercado y la reducción en el peso. Donde se siguió una metodología la cual se diseñó, fabrico y evaluó un mosquetón de seguridad más liviano y resistente validando.

Para ello se utilizó los softwares SolidWorks para el modelado geométrico basándose en la geometría convencional de un mosquetón de aluminio además del software de ANSYS Workbench para llevar a cabo simulaciones estructurales bajo diferentes condiciones de carga basadas en la norma EN 12275:2013, donde se analizaron desplazamientos, esfuerzos equivalentes de Von Mises y relaciones de cargas para posteriormente fabricar el mosquetón mediante modelado por deposición fundida (FDM), aplicando un laminado de refuerzo con fibra de carbono optimizado a partir de las simulaciones previas para realizar un ensayo de tracción y validar los resultados

obtenidos en las simulaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluyó que el modelado por deposición fundida con fibra de carbono como refuerzo permitió optimizar la relación resistencia/peso de los mosquetones, ya que los mosquetones fabricados presentaron una reducción significativa de peso sin comprometer su resistencia mecánica, logrando desempeños estructurales adecuados para su uso, aportando así conocimientos valiosos sobre el diseño y fabricación con materiales compuestos y su potencial uso en diversas industrias.

Referentes Teóricos

Materiales Compuestos

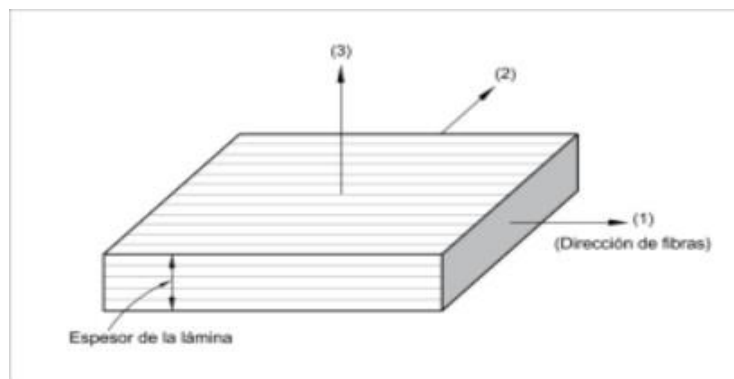
Los materiales compuestos son combinaciones sólidas de dos o más materiales diferentes, con propiedades complementarias, que dan lugar a un nuevo material con características mejoradas que no pueden ser alcanzadas por ningún componente actuando de forma individual. Están formados por una matriz que rodea y mantiene unidas las fases de refuerzo, usualmente fibras o partículas. Las matrices más comunes son poliméricas, metálicas y cerámicas. Los compuestos reforzados con fibras exhiben un comportamiento mecánico anisotrópico y sus propiedades dependen en gran medida de la eficiencia de la transferencia de carga de la matriz a las fibras a través de la interfaz.(Callister & Rethwisch, 2013).

Lamina unidireccional. Se considera una lámina a un material compuesta reforzado, caracterizado por la orientación de alineadas de manera precisa dentro de una matriz polimérica, en el caso específico de una lámina unidireccional sus fibra de refuerzo se encuentran orientadas paralelamente y en una única dirección otorgando así propiedades mecánicas altas en la dirección de las fibras en comparación de los refuerzos en dirección normal sin embargo, estas características confieren al material un comportamiento ortotrópico con 3 ejes principales, en dirección de las

fibras en el cual se consiguen resistencia y rigidez máxima, el eje normal a las fibras en el plano de la lámina y normal al plano de la lámina(ver figura A.1) .(Mena, 2007) Esta configuración estructural permite optimizar las características de rendimiento, maximizando la resistencia a tracción y el módulo elástico en la dirección de alineación, mientras mantiene propiedades significativamente reducidas en direcciones transversales, lo que la convierte en una solución de ingeniería de materiales fundamental para aplicaciones que requieren alto desempeño y diseño estructural especializado. (Jones, 2018).

Figura A.1

Direcciones principales de un compuesto de fibras unidireccionales.



Nota. Tres direcciones principales de un compuesto en dirección de las fibras, el eje normal a las fibras en el plano de la lámina y normal al plano de la lámina designados como 1, 2, y 3 respectivamente. Tomado de *Análisis de componentes de materiales compuestos híbridos con concentradores de esfuerzos* (p. 36), Velasco Reyes, F., 2013, Repositorio CIDESI, <https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/172/1/M-FVR-2013.pdf>

Materiales compuestos laminados. De acuerdo con Jones (2018) el estudio de los materiales compuestos se puede examinar y estudiar desde diversas perspectivas y magnitudes, la

micro y macro.

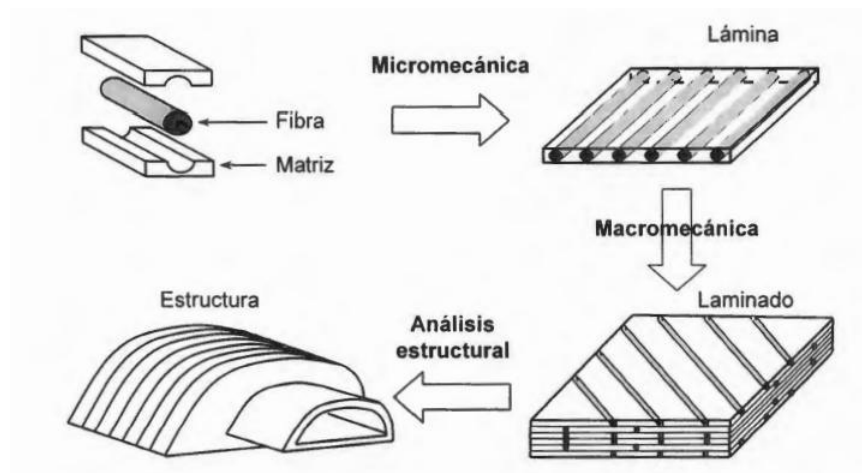
El análisis a nivel micromecánico es fundamental para comprender el comportamiento, los mecanismos de fallas y deformación a escala microscópica debido a que se enfoca en el comportamiento como la interacción de los componentes individuales a nivel microscópico del material compuesto, matriz y refuerzo donde la a interacción de los materiales constituyentes es examinada en detalle como parte de un material heterogéneo (Torres Enk, 2006), La micromecánica aborda el estado de tensión-deformación y los fallos localizados, como el fallo de la matriz (ya sea por tensión, compresión o cizalladura), el fallo de la fibra (por tensión, fragmentación o torsión) y el fallo de la interfase (adhesiva). La escala de observación en este caso es del orden del diámetro de las fibras, el tamaño de las partículas o los espacios entre la matriz y el refuerzo. La micromecánica resulta especialmente relevante para comprender propiedades como la fatiga, o los mecanismos de fallo y tipos de fractura, los cuales están significativamente influenciados por características locales que no se pueden integrar o promediar. Además, permite anticipar el comportamiento promedio de una lámina basándose en las propiedades de sus componentes y las condiciones locales. (Mena, 2007).

Lo materiales compuestos reforzados son considerados con una estructura heterogénea y anisótropa, esto quiere decir sus propiedades varían de acuerdo a la dirección en la que se refiera o en función de un punto, sin embargo en la micromecánica o a nivel de lámina y en casos de apilamiento de láminas unidireccionales es apropiado considerarse como un material homogéneo y anisotrópico, de acuerdo a Caballero Encinas (2020) se puede presentar situaciones particulares de ortotropía donde se tienen tres planos principales de simetría o también de cuasi-isotropía si por ejemplo las láminas se sitúan con diferentes orientaciones relativas para llevar a cabo estas

equivalencias es adecuado hacer uso de algunas hipótesis, se consideran en un comportamiento elástico del material como homogénea además de tener adhesión perfecta entre matriz y refuerzo y de las capas o laminas, las cuales permitan obtener valores promedio de sus propiedades de sus componente para el análisis, tanto el estudio micromecánico como el macro mecánico son complementos importantes para predecir el comportamiento y las propiedades mecánicas del material final como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura A.2

Figura A.2

Tipos de análisis de estudio para un material compuesto



Nota. Distintas perspectivas y tipos de estudio para un material compuesto. Tomado de *estudio del efecto del escalamiento dimensional en materiales compuestos termoplásticos: laminados no-simétricos y balanceados* (p. 17), Tun, J. L. L., & Chi, P. I. G, 2013, Centro de Investigación Científica de Yucatán, <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-cicy-1003-1040/Description>.

Material ortotrópico. Ivey et al. (2017) explican que cuando un material tiene dos planos ortogonales de simetría material, también habrá simetría para un tercer plano mutuamente perpendicular. En este caso, cuando un material tiene tres planos de simetría mutuamente perpendiculares, se dice que el material es "ortotrópico". Para un material ortotrópico, el número

de constantes elásticas independientes se reduce a nueve, y las matrices de rigidez y la inversa de la matriz de rigidez resultantes son específicas para este tipo de material. Para un material de este tipo, las tensiones y deformaciones normales y cortantes están desacopladas, lo que significa que las tensiones normales no causan deformaciones cortantes, y las tensiones cortantes no causan deformaciones normales (este no es el caso de los materiales anisotrópicos). Se puede considerar que numerosas estructuras compuestas se comportan como materiales macroscópicamente ortotrópicos, como una lámina compuesta, donde las fibras están dispuestas en una matriz rectangular, así como estructuras planas, tejidas y trenzadas.

Poliamida 6 (PA6)

Mexpolimeros (s. f.) menciona que:

la poliamida 6 o PA6, también conocido como poli(caprolactama), es uno de los tipos de poliamidas más empleados. Esto se debe a la abundante disponibilidad de su materia prima, la caprolactama, su amplio rango de aplicaciones y la facilidad y viabilidad económica para su producción, procesamiento y reciclaje. Se distingue por sus excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de fricción, elevado punto de fusión, buena tenacidad al impacto y alta resistencia a la fatiga. El PA6 puede moldearse fácilmente para fabricar polímeros de diversos colores con buena apariencia superficial cuando se refuerza con fibras. Cuando se refuerza con fibras de vidrio, estos polímeros se caracterizan por su elevada rigidez, buena estabilidad dimensional, excelente resistencia al calor, alta resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción.

Refuerzo de fibra continua. De acuerdo con Markforged (s. f.):

El CFR (refuerzo de fibra continua) es un proceso de FFF (Fabricación con filamento fundido) aumentado que funciona como complemento de una impresora de FFF aplicando

fibra continua en una pieza. En este proceso, la impresora utiliza una segunda boquilla para aplicar hebras continuas de fibras de composite dentro de una pieza de termoplástico FFF convencional. Las piezas construidas con CFR son fuertes y rígidas gracias a las fibras de refuerzo.

Fibra de carbono. La fibra de carbono continua es un tipo de material de refuerzo que se utiliza para mejorar la resistencia y la rigidez de una estructura o componente. La fibra de carbono continua se utiliza habitualmente en forma de material compuesto, donde las fibras se incrustan en una matriz de resina u otro aglutinante. Esto crea un material fuerte y rígido, a la vez que flexible y resistente a los impactos. Se fabrica estirando hebras largas y delgadas de fibra de carbono hasta formar un hilo continuo y luego tejiéndolas o trenzándolas para formar una tela o un compuesto. La fibra de carbono continua se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones de alta resistencia, como la industria aeroespacial, la automoción y la industria deportiva (Addcomposites, 2021).

Fibra de vidrio. Las fibras de vidrio continuas (el primer tipo de fibra utilizado en compuestos avanzados) se fabrican estirando vidrio fundido (a una temperatura de aproximadamente 1300 °C) a través de matrices de 0,8 a 3,0 mm de diámetro y estirándolo posteriormente a alta velocidad hasta un diámetro de 3 a 19 μm . Normalmente, las fibras de vidrio tienen secciones transversales circulares sólidas. Sin embargo, existen fibras con secciones transversales rectangulares (cuadradas o planas), triangulares y hexagonales, así como fibras circulares huecas. Las propiedades importantes de las fibras de vidrio como componentes de compuestos avanzados para aplicaciones de ingeniería son su alta resistencia, que se mantiene en ambientes húmedos, pero se degrada a temperaturas elevadas, su rigidez relativamente baja (alrededor del 40 % de la rigidez del acero), su alta resistencia química y biológica, y su bajo coste. (Vasiliev & Morozov, 2018).

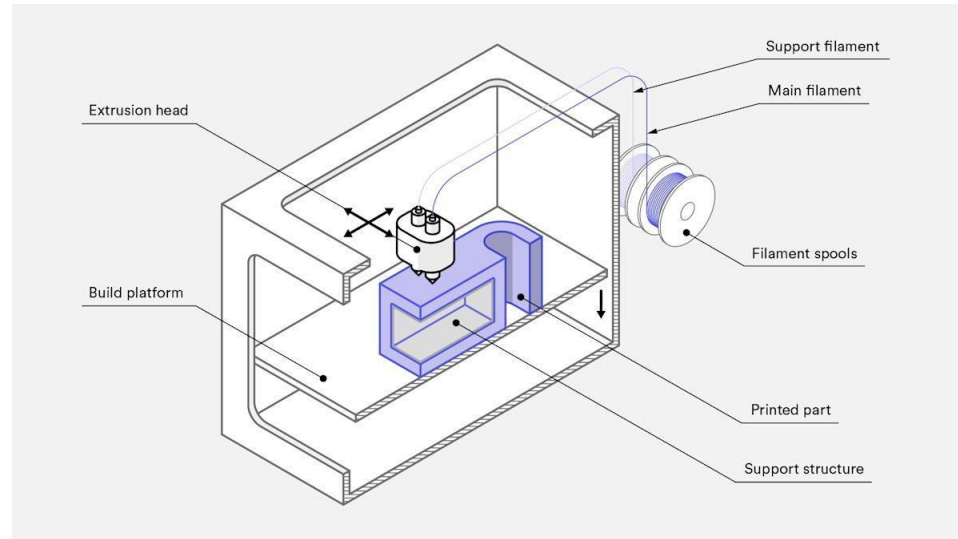
Fibra de kevlar. Según Pérez (2023), la fibra de aramida, más conocida como Kevlar, es un material sintético que se caracteriza por su resistencia excepcional, siendo cinco veces más fuerte que el acero. Esta propiedad permite que sea capaz de detener balas y cuchillos, lo que ha llevado a su uso en prendas de protección laboral. Además, Pérez (2023) destaca que este material es ligero, resistente al fuego y puede soportar temperaturas extremas, con un punto de fusión de hasta 371 grados centígrados, lo que lo convierte en una opción ideal para equipos de protección.

Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, es un conjunto de tecnologías que permiten crear objetos capa por capa a partir de un modelo digital 3D. Algunas de las técnicas más utilizadas son la deposición fundida de material (FDM), la estereolitografía (SLA) y el sinterizado selectivo por láser (SLS). Los materiales empleados incluyen termoplásticos, fotopolímeros, metales en polvo y cerámicas. Aunque ofrece flexibilidad de diseño y fabricación de geometrías complejas, la impresión 3D presenta desafíos como la anisotropía, porosidad y acabados superficiales. La impresión 3D de compuestos reforzados con fibras continuas o cortas es un área de intensa investigación. (International Organization for Standardization & ASTM International., 2021)

Figura A.3

Representación esquemática de una impresora 3D de FDM.



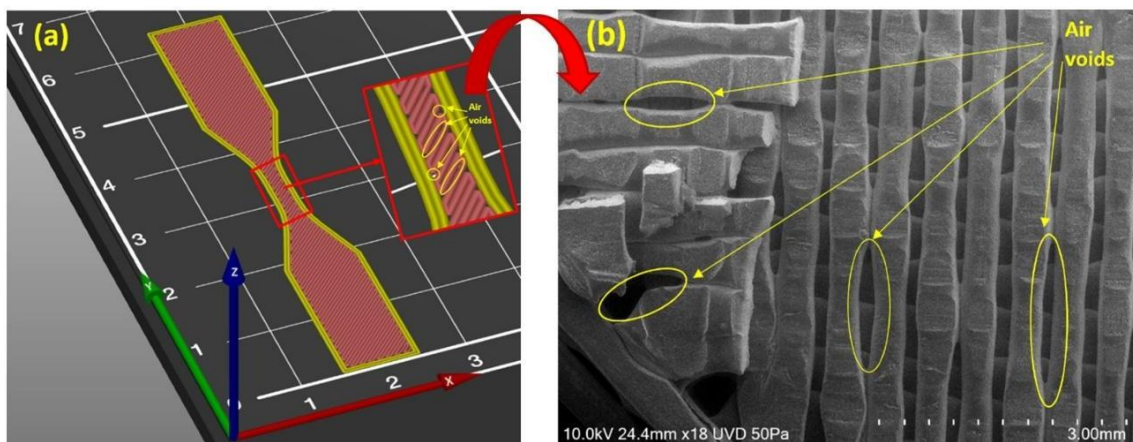
Nota. Representa esquemáticamente las partes de una impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM). Tomado de *Protolabs Network*, (s.f.), Representación esquemática de una impresora 3D de FDM [Fotografía], Hubs, <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/#author>.

Anisotropía debido a la FDM. Según Gasca (2022) la anisotropía de los materiales específicamente en los fabricados por (FDM) presentan una limitación significativa de las propiedades mecánicas queriendo decir que estas no serán constantes o uniformes a lo largo de sus estructura interna, este comportamiento conocido como anisotropía mecánica es causado principalmente por la deficiente adhesión en las uniones entre capas, lo cual ocurre durante el proceso de impresión debido al enfriamiento del material extruido, lo que provoca en el desarrollo de tensiones internas que ocasionan la débil adhesión entre las capas de deposición, otro factor determinante que causa la anisotropía está relacionado con forma de rectángulos ovalados como se muestra en la figura A.4, provocando que existan pequeños huecos de aire entre cada capa ya

que se deposita una sobre otra creando una adherencia entre ellas y una concentración de esfuerzos en las uniones donde se puede generar una grieta al momento de someterse a una carga contribuyendo a la debilidad de las piezas, sin embargo, aunque estos huecos se pueden disminuir modificando los parámetros de impresión como el espesor de capa y la temperatura de impresión la presencia de estos no es posible eliminarla por completo.

Figura A.4

Formación de las uniones entre capas adyacentes en materiales impresos por FDM.



Nota. Formación de huecos y superficies de contacto en muestras impresas por FDM: donde en (a) se observan los huecos de aire en un modelo 3D; y (b) imagen SEM que muestra los huecos de aire. Tomado de *Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review* (p. 8), por Zohdi, N., & Yang, R. 2021, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/19/3368>.

Otros factores relacionados como la orientación o el ángulo de trama, puesto que el crecimiento de una grieta depende de tanto de la delaminación como de la superficie libre, dependiendo del ángulo de trama se puede disminuir los poros debido a que estos cambiarían de acuerdo a la desalineación de los filamentos evitando así que las grietas se propaguen a través de

estas desalineaciones, existen estudios donde se demuestra que la anisotropía mecánica en materiales impresos en 3D también depende significativamente de la orientación de construcción, longitudinal y transversal, además de la influencia de añadir fibras de carbono para reducir la anisotropía donde se demostró que las piezas impresas longitudinalmente lograron una diferencia en comparación de las otras orientaciones de construcción. (Zohdi & Yang, 2021) en resumen la orientación controlada de las fibras durante la impresión 3D puede afectar el comportamiento del material, en el caso que la dirección de las fibras del compuesto sea unidireccionales se puede considerar un eje de simetría, cuando el eje de simetría es la dirección de las fibras el comportamiento del material se puede describir de acuerdo a la ley de Hooke, sin embargo cualquiera de las direcciones 2 y 3 se pueden tomar como ejes en direcciones perpendiculares por lo que el plano 2-3 se puede considerar como un plano isótropo y que estas direcciones son indiferenciables por lo que se pueden describir con las siguientes ecuaciones.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 0 & 0 & 2(S_{22}-S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación A.1}$$

$$E_2 = E_3 \nu \quad \text{Ecuación A.2}$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} \nu \quad \text{Ecuación A.3}$$

$$G_{12} = G_{13} \nu \quad \text{Ecuación A.4}$$

$$G_{12} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \nu \quad \text{Ecuación A.5}$$

Donde S corresponde a la matriz de inversa de rigidez, E al módulo elástico, G al módulo de corte, y ν al coeficiente de Poisson

Método de Elementos Finitos

Se entiende como método de elementos finitos a:

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico ampliamente utilizado para la solución de problemas de Ingeniería y física, dado que permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales se dificultan analíticamente o con modelos matemáticos simples. Este método se fundamenta en la discretización de un medio continuo, es decir dividir la estructura de estudio en una serie de subdominios “Elementos finitos” con determinadas condiciones de vínculo entre los mismos, con el fin de generar sistemas lineales, que permitan la evaluación del medio, con la ayuda de herramientas computacionales, debido a que el número de incógnitas es directamente proporcional al número de nodos generados en la discretización. (Arias & Ruíz, 2019).

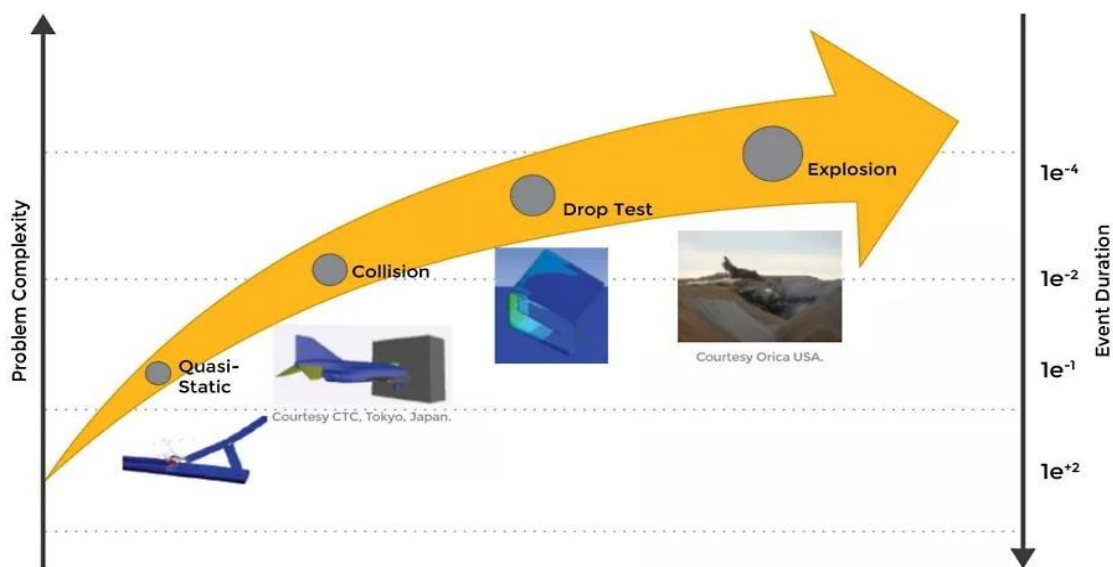
ANSYS Workbench. ANSYS es un software ampliamente utilizado en diversas industrias para simular y analizar problemas de ingeniería. Su plataforma ofrece herramientas avanzadas que abarcan áreas como mecánica estructural, dinámica de fluidos, electromagnetismo, acústica y optimización de diseños. Gracias a su versatilidad, se aplica en sectores como el aeroespacial, automotriz, energético y manufacturero, permitiendo a los ingenieros evaluar diseños, simular condiciones operativas y optimizar el rendimiento de productos. Además, su diseño intuitivo y su capacidad de integración con otros sistemas facilitan un entorno de simulación eficiente y unificado (SemcoCAD, s. f.).

Explicit Dynamics. La dinámica explícita es un método de integración temporal utilizado

para simular fenómenos dinámicos donde la velocidad y los cambios rápidos son relevantes. Este enfoque es adecuado para condiciones que involucran eventos discontinuos, como impactos a alta velocidad, caídas libres o cargas aplicadas. Debido a su capacidad para integrar dinámicas no lineales, es ideal para analizar fenómenos físicos altamente transitorios (Pett, 2022).

Figura A.5

Capacidades de Explicit Dynamics.



Nota. Las herramientas de dinámica explícita de ANSYS ayudan a los usuarios a satisfacer los requisitos de soluciones de diversas complejidades en función de los detalles del problema y la experiencia del usuario. Tomado de ¿What is explicit dynamics?, por Pett, 2022,

<https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>

Ensayo de impacto Charpy. De acuerdo con lo mencionado en el estudio realizado por Saba et al. (2019):

La prueba de impacto Charpy fue inventada en 1900 por Georges Augustin Albert Charpy

(1865–1945), y se considera como una de las pruebas más comúnmente utilizadas para evaluar la tenacidad relativa de un material de una manera rápida y económica. La prueba de impacto Charpy mide la energía absorbida por una muestra con entalla estándar mientras se rompe bajo una carga de impacto. Esta prueba continúa siendo utilizada como un método económico de control de calidad para determinar la sensibilidad a la entalla y la tenacidad al impacto de materiales de ingeniería tales como metales, compuestos, cerámicas y polímeros. La muestra de prueba de impacto Charpy estándar es de dimensión 55 mm×10mm×10mm, teniendo una entalla mecanizada a través de una de las dimensiones más grandes. La prueba de impacto Charpy mide la energía absorbida por una muestra con entalla estándar mientras se rompe bajo una carga de impacto. Esta prueba consiste en golpear una muestra adecuada con un martillo en un brazo de péndulo mientras la muestra se sostiene firmemente en cada extremo. El martillo golpea opuesto a la entalla. La energía absorbida por la muestra se determina con precisión midiendo la disminución del movimiento del brazo del péndulo.

Tenacidad al impacto. La tenacidad, también conocida como resistencia al impacto, se refiere a la capacidad de un material para absorber energía antes de alcanzar su punto de ruptura. En términos más simples, es una medida de cuánta energía puede soportar un material antes de fracturarse o fallar bajo condiciones de impacto. Este atributo es esencial en muchas aplicaciones de ingeniería, ya que determina la durabilidad y la fiabilidad de los materiales frente a situaciones de estrés o carga repentina.

Para evaluar este comportamiento, se realizan pruebas de impacto, las cuales son fundamentales tanto para el control de calidad como para comparar la tenacidad relativa entre diferentes materiales de ingeniería. Estas pruebas consisten en someter a las muestras a cargas

rápidas y observar cómo responden a estas condiciones extremas. Los materiales que poseen una alta tenacidad, por lo general, requieren una cantidad significativa de energía para llegar al punto de fallo, lo que los hace ideales para aplicaciones donde la resistencia a impactos es crucial (Hughes, 2009) Para calcular la tenacidad de un material, se utiliza la siguiente ecuación.

$$K = \frac{E}{A} \quad \text{Ecuación A.6}$$

Donde:

- K: Es la tenacidad al impacto, medida en J/m^2
- E: Es la energía absorbida durante el impacto, medida en Joules (J).
- A: Es el área de la sección transversal de la probeta, medida en m^2

Energía absorbida durante el impacto. La energía absorbida por la probeta, medida en Joules (J), se calcula como la diferencia entre la energía inicial del péndulo y la energía restante después del impacto, utilizando la altura alcanzada por el péndulo tras la fractura de la probeta (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017).

$$E = E_{p1} - E_{p2} \quad \text{Ecuación A.7}$$

Donde:

- E: Es la energía absorbida durante el impacto, medida en Joules (J).
- E_{p1} : Es la energía potencial inicial, correspondiente a la altura desde la cual se deja caer el martillo, medida en Joules (J)
- E_{p2} : Es la energía potencial final, correspondiente a la altura máxima que alcanza el martillo después de romper la probeta, medida en Joules(J)

Las energías iniciales y finales del péndulo en el ensayo de impacto pueden calcularse utilizando el concepto de energía potencial gravitacional, ya que la altura del martillo en cada posición es conocida. La energía potencial de un objeto está dada por la ecuación A.8.

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Ecuación A.8

Donde:

- E_p : Es la energía potencial, medida en (J).
- m : Es la masa del martillo, medida en Kg.
- g : Es la aceleración gravitacional ($9,8 \text{ m/s}^2$).
- h : Es la altura que se encuentra el martillo, medida en m.

Método de Rigidez Volumétrica Promedio

El método de rigidez volumétrica promedio es una herramienta analítica diseñada para predecir las constantes elásticas efectivas de componentes impresos en 3D reforzados con fibra. Este enfoque integra las contribuciones de las diferentes regiones estructurales de una muestra, teniendo en cuenta su fracción de volumen y propiedades mecánicas específicas. Su base radica en el cálculo de una matriz de rigidez global, que posteriormente se invierte para determinar las propiedades mecánicas efectivas del material (Melenka et al., 2016). A continuación, se detallan los pasos principales:

Matriz inversa de rigidez. Una vez que se determinan las propiedades micromecánicas de las regiones sólidas, de relleno y de carcasa, se puede poblar la matriz inversa de rigidez [S]. Para un material transversalmente isotrópico (Melenka et al., 2016), la matriz inversa de rigidez se define en la siguiente ecuación.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación A.9}$$

Esta matriz capta las relaciones entre las deformaciones y las tensiones en las diferentes direcciones del material.

Matriz de rigidez global. La matriz de rigidez global, denotada como $[CG]$, es una representación matemática que describe el comportamiento mecánico global de un material o componente compuesto por diferentes regiones con propiedades mecánicas distintas. En el caso de piezas impresas en 3D reforzadas con fibra, esta matriz combina las contribuciones de todas las regiones estructurales (carcasa, relleno, capas sólidas y fibras) para predecir cómo el material resiste las deformaciones bajo cargas aplicadas (Melenka et al., 2016).

$$[C_G] = V_{f,shell}[C_{shell}] + V_{f,inf ill}[C_{inf ill}] + V_{f,solid}[C_{solid}] + V_{f,fiber}[C_{fiber}] \quad \text{Ecuación A.10}$$

Donde:

- $[C_{shell}]$: Matriz de rigidez de la carcasa (capas externas).
- $[C_{infill}]$: Matriz de rigidez del relleno (estructura interna).
- $[C_{solid}]$: Matriz de rigidez de las capas sólidas.
- $[C_{fiber}]$: Matriz de rigidez de las fibras de refuerzo.
- $V_{f,shell}, V_{f,inf ill}, V_{f,solid}, V_{f,fiber}$: Fracciones de volumen de las respectivas regiones.

Cálculo de propiedades mecánicas efectivas. Para determinar las propiedades mecánicas efectivas de las piezas impresas en 3D reforzadas con fibra, se invierte la matriz de

rigidez global [CG], obteniendo así la matriz inversa de rigidez global [SG] (Melenka et al., 2016). Esto se expresa como:

$$S_G = [C_G]^{-1} \quad \text{Ecuación A.11}$$

A partir de la matriz inversa de rigidez global, se pueden calcular las constantes elásticas efectivas de la pieza, como los módulos de elasticidad, los módulos de corte y los coeficientes de Poisson, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}^G} \quad \text{Ecuación A.12}$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}^G} \quad \text{Ecuación A.13}$$

$$E_z = \frac{1}{S_{33}^G} \quad \text{Ecuación A.14}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}^G} \quad \text{Ecuación A.15}$$

$$G_{yz} = \frac{1}{S_{44}^G} \quad \text{Ecuación A.16}$$

$$G_{xz} = \frac{1}{S_{55}^G} \quad \text{Ecuación A.17}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{S_{12}^G}{S_{11}^G} \quad \text{Ecuación A.18}$$

$$v_{zx} = -\frac{S_{13}^G}{S_{33}^G} \quad \text{Ecuación A.19}$$

$$v_{yz} = -\frac{S_{23}^G}{S_{22}^G} \quad \text{Ecuación A.20}$$

Regla de Mezclas

La regla de mezclas, comúnmente conocido como ROM (Rule of Mixtures), se considera el enfoque más básico y fundamental para predecir las propiedades elásticas de materiales compuestos que han sido reforzados con rellenos continuos unidireccionales. Este modelo permite estimar cómo se comportan los materiales compuestos bajo diferentes condiciones, basándose en las características de sus componentes individuales Zhao et al. (2020).

De acuerdo con el supuesto de isodeformación de Voigt, que asume que todas las fases del material se deforman de manera uniforme bajo carga, se puede calcular el módulo longitudinal del material compuesto. Este cálculo se realiza considerando las propiedades elásticas de los componentes y su proporción en la mezcla, lo que resulta en una predicción útil para ingenieros y diseñadores en el desarrollo de nuevos materiales Zhao et al. (2020).

$$E = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{Ecuación A.21}$$

Donde:

- E: Es el módulo de Young del compuesto.
- E_f : Es el módulo de Young de la fibra.
- V_f : Es la fracción de volumen de la fibra.
- E_m : Es el módulo de Young de la matriz.
- V_m : Es la fracción de volumen de la matriz.

Cuando el material se considera un sólido y en el caso de FDM con pequeños huecos prismáticos alineados o también conocidos como porosidad, se puede usar una modelo de mezclas para definir las propiedades efectivas del modelo, asumiendo que los niveles de porosidad son

uniformes en todo plano que atraviesa el sólido además de usar campos elementales de tensión y deformación en un RVE para lograr definir las propiedades elásticas efectivas de las regiones o de los materiales considerados como sólidos las cuales se describen las siguientes ecuaciones.

$$E_1 = (1 - \rho_1)E \quad \text{Ecuación A.22}$$

$$E_2 = E_2 = (1 - \rho_1^{1/2}) \quad \text{Ecuación A.23}$$

$$G_{12} = G_{13} = G \frac{(1 - \rho_1)(1 - \rho_1^{1/2})}{(1 - \rho_1) + (1 - \rho_1^{1/2})} \quad \text{Ecuación A.24}$$

$$G_{23} = (1 - \rho_1^{1/2})G \quad \text{Ecuación A.25}$$

$$v_{12} = v_{13} = (1 - \rho_1)v \quad \text{Ecuación A.26}$$

$$v_{23} = (1 - \rho_1^{1/2}) \quad \text{Ecuación A.27}$$

$$v_{21} = v_{31} = v_{32} = (1 - \rho_1^{1/2})v \quad \text{Ecuación A.28}$$

Donde se tiene que E corresponde a el módulo de elasticidad del material, G modulo de corte y v corresponde al coeficiente de Poisson obteniendo así las propiedades elásticas del material, ρ_1 corresponde al nivel de porosidad que presenta el material.

Método de Gibson y Ashby

El modelo de Gibson-Ashby es el enfoque más destacado y comúnmente aceptado en la comunidad científica para la predicción de las propiedades de las estructuras celulares, abarcando no solo las estructuras reticulares, sino también una variedad de otros tipos de configuraciones

celulares. Este modelo permite predecir un amplio rango de propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de las estructuras celulares, basándose en la densidad relativa de la misma. Estas propiedades se expresan como fracciones de las propiedades del material original que compone la estructura, lo que facilita la comparación y el análisis. Además, se proporcionan fórmulas específicas para calcular varias propiedades mecánicas, entre las que se incluyen los módulos de corte y flexión, el límite de resistencia y la dureza. Es importante destacar que todas estas propiedades son funciones de la resistencia o el módulo de la estructura en cuestión. Asimismo, estas propiedades dependen del tipo de respuesta que exhibe la estructura, que puede estar dominada por flexión o estiramiento, y se observa que existe una relación de potencia positiva con respecto a la densidad relativa de la estructura. Este modelo, por lo tanto, no solo es fundamental para entender el comportamiento de las estructuras celulares, sino que también proporciona una base teórica sólida para el desarrollo de nuevos materiales y aplicaciones en ingeniería Maconachie et al. (2019).

Para obtener las propiedades efectivas relacionan la densidad relativa de las celdas celulares (ρ^*/ρ_s) donde ρ^* es la densidad del sólido celular y ρ_s la densidad del material sólido que compone sus paredes, esta depende esencialmente de la estructura del panel bidimensional, En el caso de una celda triangular bidimensional con paredes delgadas, la densidad relativa se determina principalmente por el cociente entre el espesor de la pared celular (t) y la longitud l . La fórmula suele ser la siguiente:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C \frac{t}{l} \quad \text{Ecuación A.29}$$

Cuando una celda es cargada en los ejes X_1 y X_2 se obtiene una deformación elástica lineal

ocasionando que las paredes de la celda se flexionen, la cual se puede describir mediante cinco módulos: dos módulos de Young E_1 y E_2 , un módulo de corte G_{12} y dos coeficientes de Poisson ν_{12} y ν_{21} , (Gibson & Ashby, 1997) para las propiedades elásticas como el módulo de Young paralelo al eje X_1 teniendo que $E_1 = \sigma_1/\epsilon_1$, se obtiene el módulo a tensión o compresión aplicado en la dirección del eje X_1 .

$$\frac{E_1}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\text{Cos}\theta}{(h/l + \text{Sin}\theta)\text{Sin}^2\theta} \quad \text{Ecuación A.30}$$

En el caso del módulo de Young paralelo al eje X_2 se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\frac{E_2}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \text{Sin}\theta)}{\text{Cos}^3\theta} \quad \text{Ecuación A.31}$$

Para el coeficiente de Poisson se toma la razón negativa de las deformaciones normales y paralelas en la dirección de X_1 obteniendo así la siguiente expresión:

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{\text{Cos}^2\theta}{(h/l + \text{Sin}\theta)\text{Sin}\theta} \quad \text{Ecuación A.32}$$

En el caso de carga en la dirección:

$$\nu_{21} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{(h/l + \text{Sin}\theta)\text{Sin}\theta}{\text{Cos}^2\theta} \quad \text{Ecuación A.33}$$