



Estructura interna y anisotropía en compresión de elementos 3D impresos con FDM mediante FEM

Internal structure and compression anisotropy of FDM-printed 3D elements using FEM

Jorge Steban Ramírez-Jiménez

jorge.ramirez9918@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0002-5665-8058>

Luis Miguel Navarrete-López

luis.navarrete7284@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-7784-9374>

Jefferson Alberto Porras-Reyes

jefferson.porras0449@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0005-9333-0934>

José Ezequiel Naranjo-Robalino

jose.naranjo0463@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-2884-1667>

RESUMEN

El análisis por Elementos Finitos (FE) es una herramienta clave en el diseño y verificación de componentes impresos en 3D. La correcta caracterización de sus propiedades anisotrópicas y ángulos de ráster permite desarrollar modelos eficientes. Este estudio emplea pruebas de compresión para caracterizar el PLA fabricado mediante FDM, modelando su comportamiento con FE. Se utilizan especímenes postprocesados para minimizar defectos externos del proceso. El modelo elastoplástico incluye una matriz de rigidez elástica, el criterio de fluencia anisotrópico de Hill y la ley de endurecimiento isotrópico de Voce, considerando la secuencia de apilamiento de los ángulos de ráster. El análisis FE, realizado en LS-DYNA, reproduce el comportamiento compresivo del material, capturando la evolución de la tensión y las formas deformadas hasta el inicio del daño. Los mecanismos de deformación y daño dependen de la orientación y ángulo de ráster.

Descriptores: plásticos; diseño industrial; propiedad física. (Fuente: Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

Finite Element (FE) analysis is a key tool in the design and verification of 3D printed components. The correct characterisation of their anisotropic properties and raster angles allows for the development of efficient models. This study uses compression tests to characterise FDM-manufactured PLA, modelling its behaviour with FE. Post-processed specimens are used to minimise external process defects. The elastoplastic model includes an elastic stiffness matrix, Hill's anisotropic yield criterion and Voce's isotropic hardening law, considering the stacking sequence of the raster angles. The FE analysis, performed in LS-DYNA, reproduces the compressive behaviour of the material, capturing the evolution of the stress and the deformed shapes until the onset of damage. The deformation and damage mechanisms depend on the orientation and raster angle.

Descriptors: plastics; industrial design; physical properties. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 14/01/2025. Revisado: 13/02/2025. Aprobado: 26/02/2025. Publicado: 06/03/2025.

Sección artículos de Tecnología

INTRODUCCIÓN

Los materiales que integran fibras cortas dentro de una matriz polimérica destacan por su versatilidad, al unir la ligereza y flexibilidad características de los polímeros con la resistencia mecánica superior que aportan las fibras. (Khan et al., 2022). Una de las técnicas de fabricación aditiva más utilizadas es la Fused Deposition Modeling (FDM) (Wickramasinghe et al., 2020), esta se basa en la deposición capa por capa de material termoplástico a través de una boquilla a alta temperatura, persisten importantes vacíos en el entendimiento de las propiedades mecánicas de las piezas producidas, lo que convierte la caracterización de estos materiales impresos en un área de investigación activa. (Bandinelli et al., 2023).

La figura 1 muestra la configuración del modelo 3D que utilizo (Bandinelli et al., 2024) en su investigación misma que sirvió como base para este estudio.

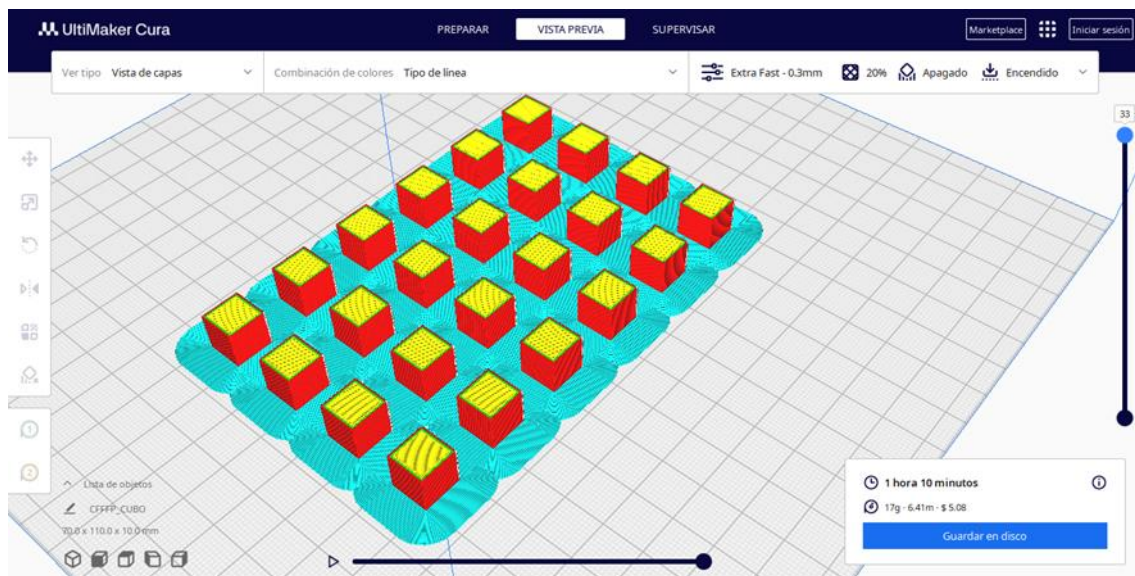


Figura 1. Representación del proceso de impresión en el sistema de referencia de la impresora. **Fuente:** (Bandinelli et al., 2024).

Debido a su principio de operación basado en deposición secuencial, la tecnología FDM genera inevitablemente anisotropía mecánica en las piezas. Las uniones entre capas adyacentes representan puntos críticos que afectan el desempeño mecánico, siendo la dirección de construcción (Z) la más susceptible a fallos por tracción debido a la limitada adhesión entre estratos (Biroosz et al., 2022).

La integridad estructural de las interfaces en FDM está condicionada por parámetros cinemáticos como la velocidad de impresión y los patrones de deposición. En sistemas compuestos, este desafío se intensifica debido al comportamiento no-newtoniano del material cargado con fibras y a la formación de zonas de discontinuidad en la matriz polimérica (Fallon et al., 2019). El parámetro de orientación de ráster constituye una variable crítica en el desarrollo de anisotropía estructural en componentes fabricados mediante manufactura aditiva por extrusión de material. (Zouaoui et al., 2021).

Los protocolos de caracterización convencionales, fundamentados principalmente en ensayos de tracción, presentan limitaciones significativas que obligan a la implementación paralela de pruebas de compresión para una evaluación fiable (Athale et al., 2022). Estudios sobre poliamidas impresas (Athale et al., 2022; Zeybek et al., 2023) revelan que existe diferencias entre pruebas de tensión con las pruebas de compresión en PA12-CF y el efecto tasa-deformación en PA6. Sin embargo, la implementación de modelos MEF que consideren adecuadamente el régimen compresivo sigue siendo limitada. (Athale et al., 2022).

Este trabajo caracteriza y modela el comportamiento compresivo de un material FDM, evaluando sus propiedades elásticas y plásticas mediante pruebas en especímenes cúbicos con distintas orientaciones y ángulos de raster. La metodología guía para este estudio se basó en los mecanismos de deformación plástica mismos que son clave para entender el comportamiento de los polímeros al momento de utilizar impresión 3D, estos parámetros son fundamentales en diseño estructural y prevención de fallas (Bandinelli et al., 2024). Además, se utilizan modelos computacionales basados en EF para predecir el comportamiento en compresión, empleando LS-DYNA para simulaciones y LS-OPT para optimización (Stander et al., 2019).

El objetivo es validar estos métodos en el diseño y optimización de componentes FDM, mejorando la evaluación y desempeño de materiales impresos con tecnología aditiva.

MÉTODO

El material analizado en el presente trabajo es PLA (ácido poliláctico), producido por WANHAO (WANHAO, China). Este material se caracteriza por sus propiedades mecánicas significativas, baja densidad (1 g/cm^3) y resistencia a temperaturas medias (a largo plazo a 50°C - 90°C y a corto plazo a 130°C). En base a investigaciones previas especímenes impresos con un ángulo de raster de 645° y una orientación de 0° respecto a la cama de impresión exhibieron una carga de tracción última de 35 MPa, mientras que los especímenes con una orientación de 90° respecto a la cama de impresión mostraron una carga mucho menor de 16 MPa, además estas impresiones muestran una fuerte naturaleza anisotrópica en condiciones de tracción. (Bandinelli et al., 2023).

Para el presente trabajo, los especímenes se imprimieron en forma cúbica, con una dimensión final de lado de 10 mm. El software de corte utilizado para la preparación de los especímenes es Cura Slicer (versión 5.2.1). La impresora utilizada es la Wanhao D12/230 con una boquilla de cobre y de 0.4 mm (WANHOA, China). El filamento utilizado es producido por WANHOA con un diámetro de 1.75 mm. Los parámetros de impresión se ajustaron para obtener resultados óptimos en términos de precisión geométrica, unión de ráster y adhesión de capas. En este sentido, la temperatura de impresión se estableció en 200°C , la cama caliente de impresión se mantuvo caliente y calentada mediante una resistencia eléctrica y un ventilador para mantener una temperatura de 50°C , la tasa de flujo de material se trabajó al 100% de su valor predeterminado y la velocidad de impresión se estableció en 40 mm/s mientras que la altura de capa se fijó en 0.2 mm. Estos cambios mejoran la unión del ráster y la adhesión de capas, ya que el material tiene un tiempo de enfriamiento más prolongado, promoviendo una mejor adherencia química y física entre el material depositado en diferentes momentos de la impresión. Un tiempo de enfriamiento más prolongado promueve la cristalización de la matriz polimérica, aumentando el rendimiento mecánico (Yu et al., 2023). Además, las temperaturas más altas de la cama caliente promueven bajas tasas de enfriamiento y bajos gradientes de temperatura, limitando la deformación de las piezas finales y la formación de vacíos.

Como ya se mencionó en trabajos anteriores (Sola et al., 2023), la caracterización de materiales FDM es particularmente difícil en términos de repetibilidad de resultados, debido a las numerosas influencias de diferentes parámetros de impresión en el componente final. Además, la ausencia de un procedimiento de prueba estandarizado resulta en la obtención de diferentes propiedades mecánicas entre varios estudios sobre el mismo material, lo que destaca la necesidad de estandarización, especialmente desde el punto de vista de la fabricación de especímenes. Hasta la fecha, las normas ASTM D695 y ASTM D1621 pueden

utilizarse para pruebas de compresión en plásticos, aunque no están destinadas a materiales impresos en 3D, proporcionan algunas indicaciones para tratar con materiales anisotrópicos. Es de fundamental importancia describir el procedimiento seguido para la realización de los especímenes de prueba, ya que cada parámetro juega un papel en el resultado, y el proceso FDM implica muchos parámetros a controlar (Samy et al.).

En el presente trabajo, la campaña experimental realizada para estudiar el comportamiento mecánico del material y encontrar sus propiedades se divide en dos fases: la primera fase está destinada a evaluar la repetibilidad de los resultados y observar la influencia del ángulo de raster en las propiedades de compresión del material; la segunda fase, en cambio, tiene como objetivo ampliar el análisis del comportamiento mecánico a la dependencia de las propiedades de compresión del material respecto a su orientación con respecto a la carga. En esta última fase, el trabajo se centra en dos secuencias de apilamiento de ángulos de raster: la configuración más anisotrópica (0° de ángulo de raster) y la configuración más isotrópica (135° de ángulo de raster), basándose en las trayectorias de deposición del raster. Esto tiene la intención de resaltar las diferencias en el comportamiento del mismo material. Los especímenes utilizados en el presente trabajo no siguen los estándares para pruebas de compresión de plásticos, pero están diseñados para analizar múltiples casos de fabricación y carga (Bandinelli et al., 2024).

Especímenes probados en las direcciones principales del material

En la primera fase experimental, los especímenes se imprimen y prueban alineando las direcciones de carga con los ejes X, Y y Z. Se analizan cuatro configuraciones de ángulos de raster: 0° (Y), 645° , $0^\circ/90^\circ$ y $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$. Se imprimieron 96 cubos, con 8 repeticiones por combinación, permitiendo un análisis estadístico de las propiedades mecánicas y la repetibilidad del proceso. Se observó una leve curvatura en la base, coincidiendo con estudios previos (Samy et al., 2022).

Especímenes impresos con diversas orientaciones entre la carga y las direcciones del material

Para la segunda fase de la campaña experimental, se imprimieron especímenes inclinados para analizar la orientación del material y la anisotropía. Se emplearon rotaciones progresivas de 15° , 30° , 45° , 60° y 75° a lo largo de los ejes X, Y y Z, con soportes del mismo material. Esta metodología permite evaluar la transición entre direcciones principales.

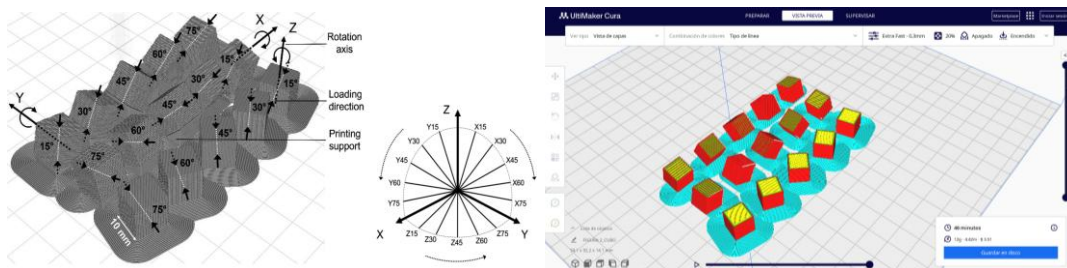


Figura 2. Especímenes utilizados para evaluar la dependencia de las propiedades de compresión con respecto a la orientación del material en relación con la carga aplicada; la imagen de la derecha muestra un esquema de las rotaciones aplicadas para investigar la anisotropía del material. **Fuente:** (Bandinelli et al., 2024).

La Figura 3 muestra la orientación de especímenes impresos con inclinación progresiva en Y, resaltando la relación entre capas y carga (Z). Líneas continuas representan las capas, y flechas indican la carga compresiva. Los soportes de impresión, esenciales en FDM, generan

superficies defectuosas. En especímenes inclinados a 15° o 75° , el espaciado de capas resalta el efecto escalón (Reddy et al., 2018). Además, Z15 y Z75 presentaron superficies irregulares debido a la interacción del ángulo de deposición con las caras externas (Figura 4).

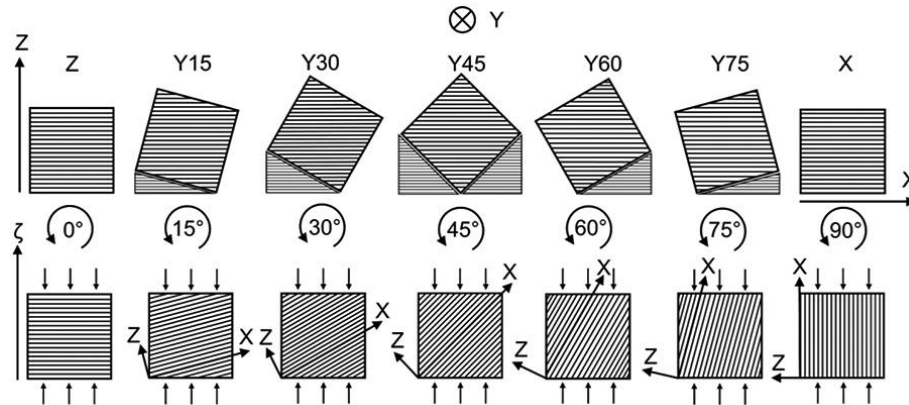


Figura 3. Esquema de los especímenes rotados alrededor del eje y, desde la configuración de impresión con soportes (imagen superior) hasta la configuración rotada utilizada para las pruebas de compresión (imagen inferior). **Fuente:** (Bandinelli et al., 2024).

Para mejorar la consistencia de resultados, los soportes se fijaron con una densidad de 60 % y forma de zigzag. Aumentando las dimensiones de las probetas, el material sobrante se retira posteriormente utilizando métodos manualmente o de ser el caso con métodos de desbaste como se muestra en la (Figura 5). La forma final mantiene un lado de 10 mm, garantizando resultados más fiables.

Procedimiento y equipo de prueba

Los ensayos de compresión aplicaron una deformación constante de 0.01 s^{-1} hasta 50%, usando una máquina Metrotec con célula de carga de 100 kN. Los resultados de los ensayos se analizaron con el software Metrotest este tiene funciones integradas como información de la muestra de ensayo, elección de la muestra, pantalla de datos, procesamiento de datos, análisis de datos operaciones de ensayo.

Resultados experimentales

Los resultados de compresión se analizan evaluando el esfuerzo y la deformación en distintas configuraciones de impresión, considerando el efecto del ángulo de los trazos y la orientación de construcción. Se determinan las propiedades mecánicas del material, utilizando la fase elástica para calcular el módulo elástico en la dirección z (Figura 3). El límite elástico se establece en la desviación del 0.2%, mostrando variaciones según la orientación del material y el ángulo de los trazos.

Resultados experimentales de los especímenes tal como se imprimieron

Las pruebas de compresión realizadas en los especímenes tal como se imprimieron, descritas en la Sección 2.1, muestran un efecto claro del ángulo de los trazos en las propiedades mecánicas del material. En la Tabla 1 se reportan los módulos elásticos (con desviaciones estándar entre paréntesis):

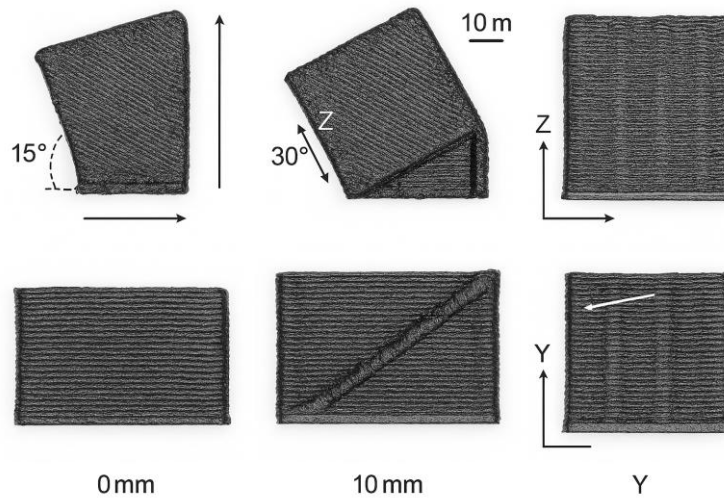


Figura 4. Detalles de los especímenes X15 (izquierda), X30 (centro) y Z75 (derecha), mostrando los efectos de los soportes de impresión en las primeras capas depositadas para los dos primeros y los efectos del recorrido del trazo para el último. **Fuente:** (Bandinelli et al., 2024).

Los resultados de compresión muestran que los soportes de impresión afectan las propiedades mecánicas (Turner et al., 2014). Comparando especímenes inclinados con los de direcciones principales, se observa un impacto negativo en los módulos elásticos, especialmente en Z y X (Y15 a Y75). Los soportes generan superficies defectuosas (Figuras 4 y 6), provocando irregularidades que aumentan la deformación inicial y reducen el módulo elástico. Especímenes inclinados a 15° y 75° muestran desviaciones significativas respecto a la tendencia general.

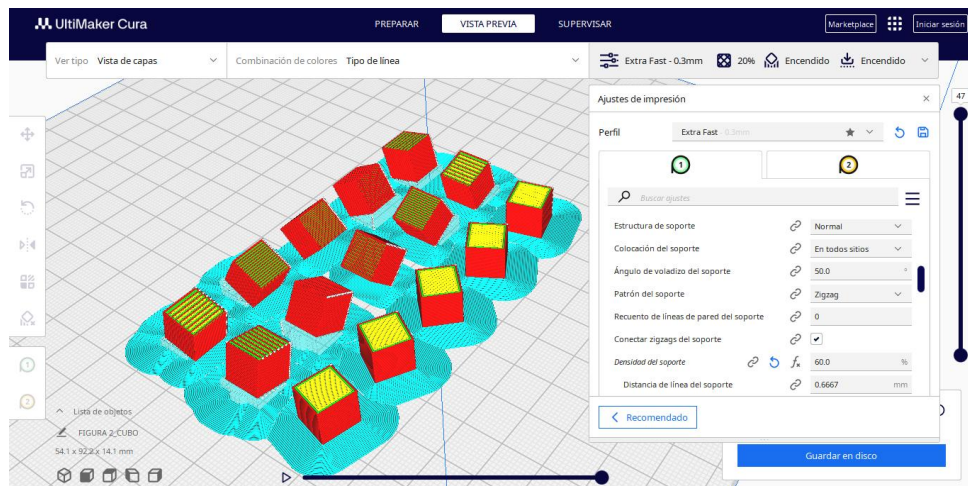


Figura 5. Especímenes utilizados para la segunda fase de la campaña experimental. **Fuente:** Propia.

La configuración de ángulo de trazo de 0° muestra la mayor anisotropía, siendo la dirección Y (que coincide con la dirección de deposición de los trazos) la más rígida. Este resultado es esperado ya que las fibras están principalmente alineadas con la dirección de deposición, por lo que el material exhibe su máxima resistencia mecánica (Tessarín et al., 2022). Las direcciones X y Z de la configuración de ángulo de trazo de 0° muestran un comportamiento notablemente similar, con un módulo elástico casi idéntico. Las otras configuraciones de ángulo

de trazo muestran resultados sustancialmente análogos, con direcciones de material que tienen módulos elásticos perfectamente comparables a pesar de tener diferentes ángulos de trazo. Esto se debe a que estas tres configuraciones introducen una simetría teórica entre las direcciones X y Y. La carga de compresión en estas últimas configuraciones encuentra las mismas orientaciones de los trazos (y fibras) (es decir, 0° , 45° , 90° y 135°) y deberían dar resultados comparables en términos de propiedades mecánicas. Sin embargo, la evidencia experimental muestra una diferencia sistemática entre las direcciones X y Y, siendo la X más rígida. Esto podría deberse a la deformación de la porción del cubo que está en contacto con la placa de construcción, ya que los especímenes muestran caras inferiores curvadas. La curvatura se observa alrededor del eje x, por lo que cuando se aplica la carga en la dirección Y, la rigidez experimentada es menor debido a una configuración pre-deformada. Las secuencias de apilamiento como $145^\circ/-45^\circ$ y $0^\circ/90^\circ$ están más sujetas a deformaciones debido a tensiones residuales más altas inducidas por la estrategia de impresión, que se ha demostrado que afectan la fase de enfriamiento (Samy et al., 2022; Trofimov et al., 2022). Los resultados de estas pruebas demuestran que los especímenes (tal como se imprimieron) no son completamente adecuados y deben ser postprocesados para evitar los efectos de la deformación.

Tabla 1. Módulos elásticos de los especímenes probados tal como se imprimieron.

9

Secuencia de apilamiento Orientación del material	0°	$145^\circ/45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$	$0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$
X	3,5	3,2	2,8	3
Y	3,7	3	2,9	3,1
Z	2,5	2,8	2,6	2,7

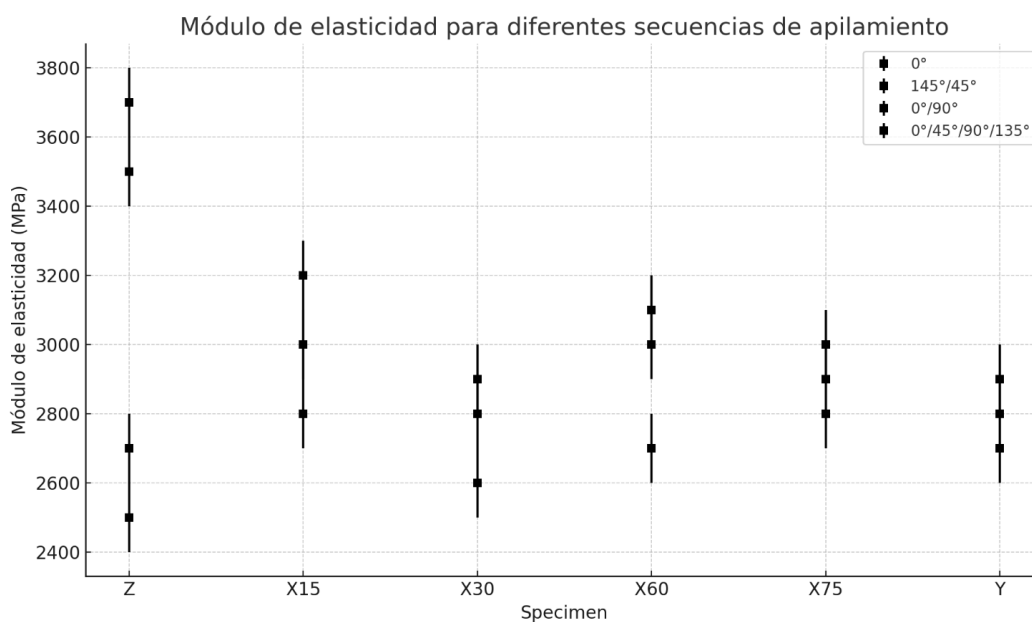


Figura 6. Tendencias de los módulos elásticos con respecto a la orientación del material en el caso de especímenes inclinados probados tal como se imprimieron. **Fuente:** Propia.

Resultados experimentales de los especímenes postprocesados

En los especímenes postprocesados, se analizaron las configuraciones 0° y $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, representando los casos más anisotrópicos e isotrópicos, respectivamente. En 0° , la dirección Y, alineada con los trazos, presenta el módulo elástico más alto, seguida de X y Z, casi comparables por la orientación de las fibras.

El límite elástico sigue la misma tendencia, con Y mostrando el mayor valor, mientras que X y Z son más bajos y similares. La Tabla 2 muestra los valores experimentales de módulo elástico (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}), límite elástico (Y_{xx} , Y_{yy} , Y_{zz}) y coeficientes de Poisson (ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz}), obtenidos mediante compresión y análisis de deformación en video.

En $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, cada capa rota 45° , logrando un comportamiento casi isotrópico en XY, ya que los trazos se distribuyen en cuatro direcciones alternadas (Retolaza et al., 2021). X y Y son más rígidas que Z, con menor anisotropía respecto a 0° .

El límite elástico en $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$ muestra valores similares en X, Y y Z (Tabla 3). Comparando ambas secuencias, el ángulo de trazo influye en la rigidez y anisotropía, clave en el diseño estructural, como en los compuestos laminados, donde la orientación de las fibras define el comportamiento mecánico.

Tabla 1. Valores experimentales de las propiedades del material de los especímenes con configuración de 0°

E_{xx} (MPa)	E_{yy} (MPa)	E_{zz} (MPa)
3600	3200	2900
ν_{xy} (-)	ν_{xz} (-)	ν_{yz} (-)
0.35	0.38	0.40
Y_{xx} (MPa)	Y (MPa)	Y_{zz} (MPa)
45.0	55.0	45.0

Metodología de modelado

El proceso de impresión se representa en un sistema de ejes X, Y y Z (Figura 1) (Paul, 2021). La modelación considera la direccionalidad del comportamiento del material.

Las pruebas en especímenes con distintas orientaciones espaciales muestran la dependencia de las propiedades elásticas y plásticas respecto a la orientación entre material y carga (Figura 7), evidenciando la anisotropía en materiales impresos (Zeybek et al., 2023).

Las pruebas en direcciones principales no bastan para evaluar la anisotropía en FDM, por lo que se requieren ensayos en orientaciones intermedias. También permiten evaluar el esfuerzo cortante, difícil de caracterizar directamente, pero determinable mediante pruebas uniaxiales en especímenes inclinados (Bandinelli et al., 2023).

Tabla 2. Valores experimentales de las propiedades del material de los especímenes con configuración de 0°/45°/90°/135°

E_{xx} (MPa)	E_{yy} (MPa)	E_{zz} (MPa)
3500	3200	2800
V_{xy} (-)	V_{xz} (-)	V_{yz} (-)
0.35	0.38	0.40
Y_{xx} (MPa)	Y (MPa)	Y_{zz} (MPa)
45.0	40.0	40.0

Modelado numérico

Los materiales para impresión 3D exhiben un comportamiento elástico casi lineal en pequeñas deformaciones, seguido de plasticidad en deformaciones mayores. Se adopta un modelo con matriz de rigidez elástica y criterio de fluencia con endurecimiento (Zouaoui et al., 2021; Bandinelli et al., 2023).

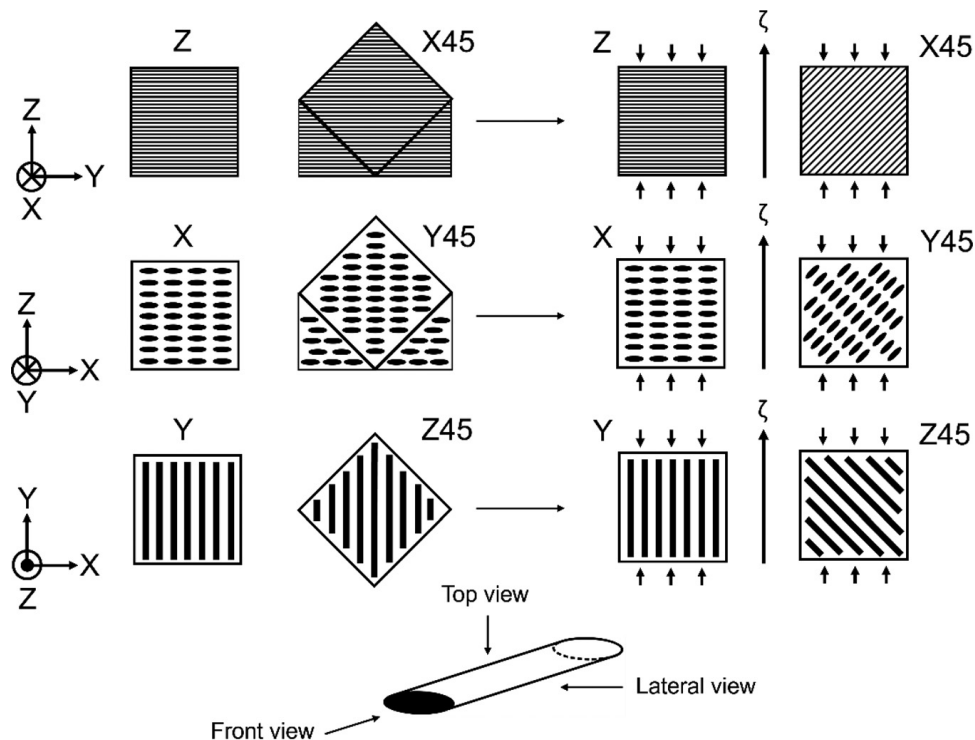


Figura 7. Esquema que representa la orientación de los especímenes durante la fabricación (a la izquierda) y la prueba (a la derecha) en la configuración de impresión de 0° Fuente: (Bandinelli et al., 2024).

Para la fase elástica, se emplea una matriz ortotrópica con nueve constantes independientes: módulos elásticos en X, Y, Z, módulos de corte y coeficientes de Poisson, determinados experimentalmente.

$$E_{\zeta th} = \left(\frac{1}{E_{ii}} \cos^2 \theta + \left(\frac{1}{G_{ji}} - \frac{2\nu_{ij}}{E_{ii}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_{jj}} \sin^4 \theta \right)^{-1} \text{ Ec. 1}$$

donde z indica la dirección de aplicación de la carga, como se muestra en la Figura 7. La letra z indica el ángulo entre la dirección específica del material y la dirección de carga z , por lo que un ángulo de 0° corresponde a E_{ii} , mientras que un ángulo de 90° corresponde a E_{jj} .

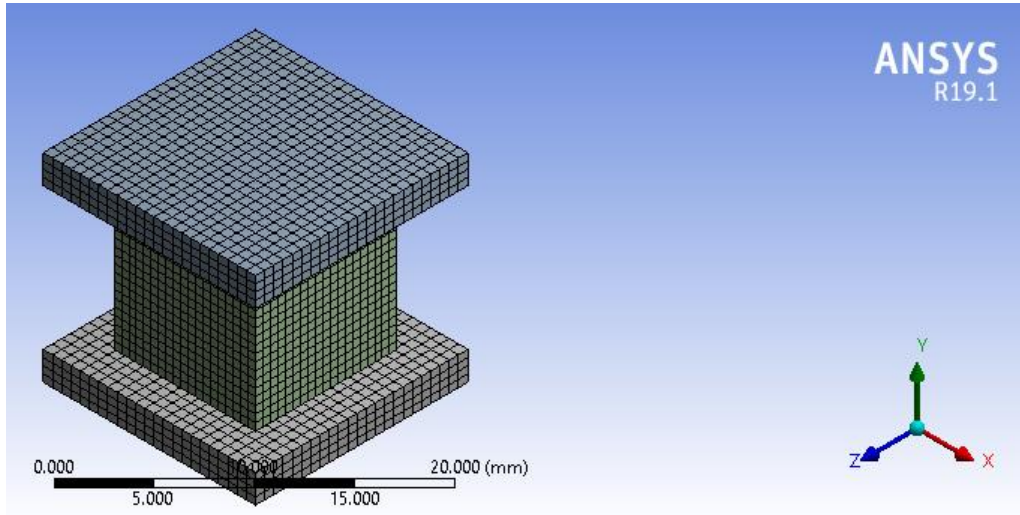


Figura 8. Modelo de elementos finitos de la prueba de compresión en el entorno de ANSYS LS-DYNA

Los módulos elásticos de corte se evalúan numéricamente minimizando diferencias entre valores experimentales y teóricos en distintos ángulos de construcción. Los coeficientes de Poisson restantes se determinan por la simetría de la matriz elástica mediante la ecuación (2).

$$\nu_{ij}/E_{ii} = \nu_{ij}/E_{jj} \text{ Ec. 2}$$

En cuanto a la transición entre las fases elástica y plástica, el comportamiento del material se modela mediante el criterio de fluencia anisotrópico de Hill (Hill, 1948):

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \text{ Ec. 3}$$

donde los subíndices de las tensiones en la ecuación (3) se refieren al sistema de referencia del material descrito en la Figura 1. Como ya se mencionó en Bandinelli et al. (2023), los parámetros F , G , H , L , M y N de Hill no solo definen la transición entre las fases elástica y plástica, sino que también dirigen la fase subsecuente, donde el comportamiento plástico se describe mediante la evolución de la superficie de fluencia. En un enfoque puramente experimental, los límites elásticos evaluados mediante pruebas de compresión representan el valor de fluencia que se utilizará en el criterio de fluencia anisotrópico de Hill, pero no podrían ser representativos de todo el comportamiento plástico. El uso de software de optimización ayuda a considerar toda la fase posterior a la fluencia del comportamiento, lo que lleva a parámetros más representativos. La fase de endurecimiento se modela entonces con la ley de endurecimiento isotrópico de Voce (ecuación (4)) (Voce, 1948) para que las tensiones en las diferentes direcciones del material estén guiadas por una única curva que vincula la tensión equivalente con la deformación plástica equivalente:

$$\sigma(\epsilon_{eq}) = \epsilon_0 + Q_1 (1 - \exp(-C_1 \epsilon_{eq})) + Q_2 (1 - \exp(-C_2 \epsilon_{eq})) \text{ Ec. 4}$$

donde Q_1 , Q_2 , C_1 y C_2 son parámetros de Voce. La determinación de la ley de endurecimiento requiere el conocimiento de la formulación de la deformación plástica

equivalente, que es un cálculo bastante costoso para un material anisotrópico como el analizado en el presente trabajo (Zhang et al., 2018).

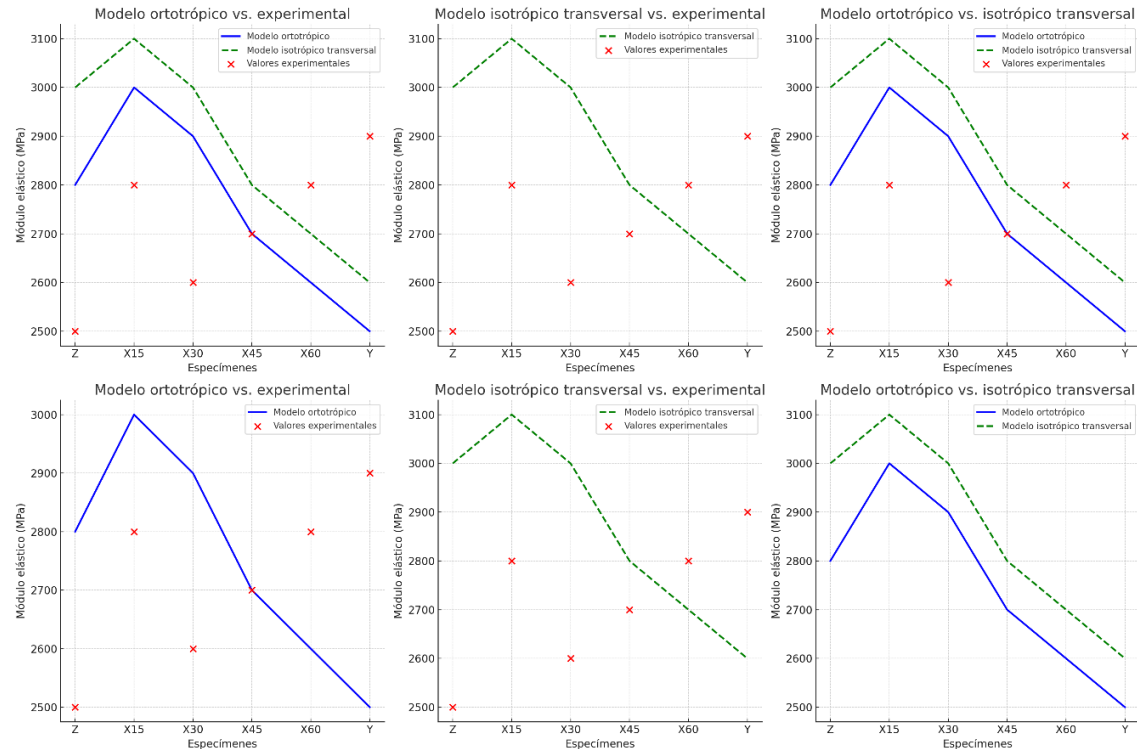


Figura 9. Comparaciones entre las distribuciones experimentales (marcadores cuadrados) y numéricas (líneas continuas para el modelo ortotrópico genérico y líneas discontinuas para los modelos transversalmente isotrópicos) de los módulos elásticos en la configuración de 0° (a la izquierda) y en la configuración de 0°/45°/90°/135° (a la derecha).

El cálculo se asigna al software de elementos finitos (FE) y la curva de endurecimiento se encuentra mediante un procedimiento de optimización en el software LS-OPT, que ajusta los parámetros de Hill y Voce para obtener el mejor ajuste numérico entre las curvas de carga-desplazamiento experimentales y de FE.

Modelo de elementos finitos

A partir de observaciones experimentales, se establecen hipótesis para el modelo de material en FEA. La configuración 0° se modela como ortotrópica y transversalmente isotrópica (X y Z equivalentes), mientras que 0°/45°/90°/135° solo como transversalmente isotrópica (X e Y equivalentes). El análisis FEA en LS-DYNA simula la compresión con 343 elementos sólidos (7×7×7) y 162 elementos de tensión constante (2×9×9) para las placas rígidas. Una placa permanece fija y la otra se desplaza 6 mm (Figura 8). Se usa el modelo elastoplástico anisotrópico (MAT 157) para el material impreso y MAT 020 para las placas de acero (Bandinelli et al., 2024). La orientación del material se define en MAT 157 con un sistema de coordenadas global por espécimen. Se incorpora contacto nodo-superficie con un coeficiente de fricción de 0.08 (Bandinelli et al., 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El siguiente análisis compara las propiedades del material obtenidas experimentalmente y por métodos numéricos, así como las curvas de esfuerzo-deformación y las formas deformadas al final de las pruebas de compresión.

Comportamiento elástico

Los módulos elásticos experimentales y numéricos para 0° y $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$ (Figura 9) muestran buen ajuste con los modelos utilizados. Las curvas continuas y discontinuas representan los valores numéricos del módulo elástico de compresión y su dependencia de la orientación del material, derivada de la ecuación (1), reflejando los valores de las simulaciones FE (Zhao et al., 2019).

En 0° , el modelo ortotrópico genérico ajusta mejor la tendencia de los módulos elásticos (error máximo 5.09% en Y75), aunque asumir un modelo transversalmente isotrópico es aceptable, con una desviación máxima del 8.9% en X45.

En $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, el modelo transversalmente isotrópico es más adecuado, ya que los especímenes que rotan en Z presentan módulos casi idénticos, y las otras tendencias se superponen. En 0° , el plano isotrópico es XZ, mientras que en $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, es XY.

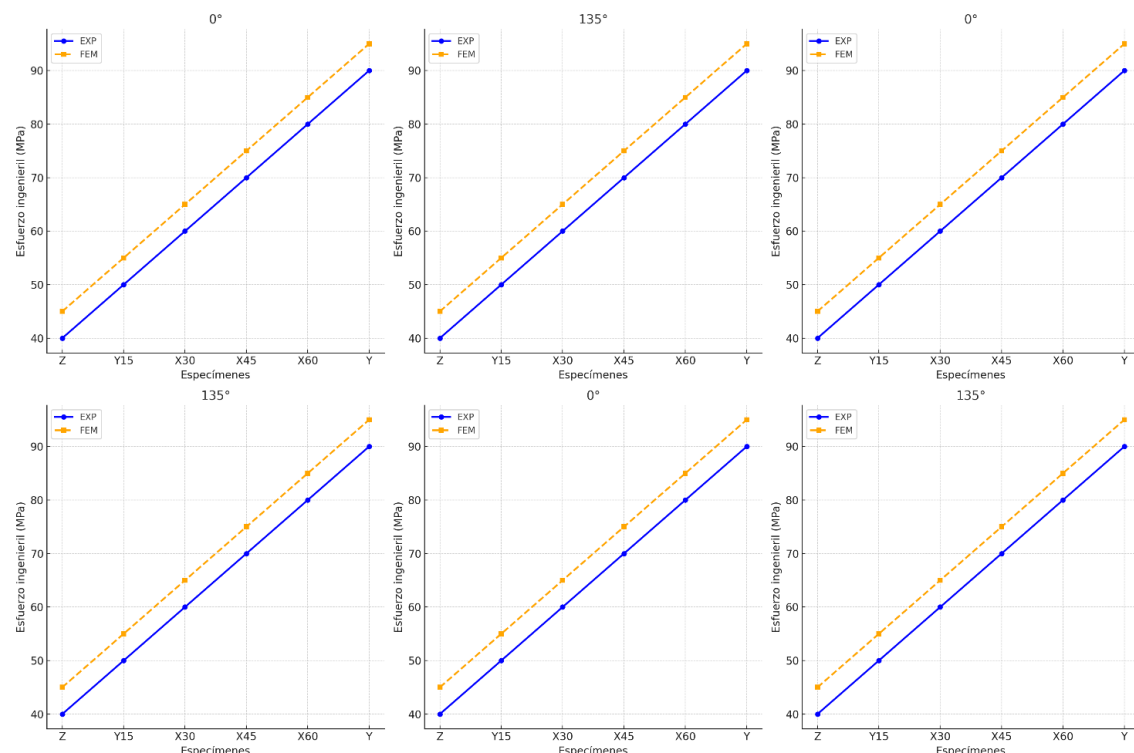


Figura 10. Comparaciones entre las tendencias experimentales y de elementos finitos (FE) del esfuerzo ingenieril con respecto a la orientación de los especímenes.

Comportamiento plástico

Como se discutió anteriormente, el modelo de elementos finitos (FE) se generó para describir el comportamiento plástico del material, utilizando el criterio de fluencia de Hill y la ley de endurecimiento isotrópico de Voce. En este trabajo, no se analizan el daño ni la falla mediante FE, pero se proporciona una discusión fenomenológica a continuación. Dicho esto, los autores optaron por identificar el inicio de los mecanismos de daño con la disminución del esfuerzo compresivo uniaxial verdadero y limitar la validez de la comparación entre los modelos FE y los datos experimentales en consecuencia. Las Figuras 10 y 11 muestran una comparación entre las curvas de los análisis experimentales y FE en los casos de las configuraciones de 0° (comparación solo con el modelo ortotrópico) y $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, respectivamente, demostrando una buena precisión en la representación del comportamiento plástico del material en el rango de validez. Esto se refuerza por el hecho de que un único modelo de material (uno para cada



configuración de impresión) puede describir el comportamiento del material en 18 casos diferentes, que representan varias orientaciones relativas entre la carga y las direcciones del material. Las curvas experimentales mostradas se seleccionan por ser las más cercanas a las curvas medias correspondientes. Las curvas experimentales muestran una vez más la diferencia significativa entre las dos configuraciones de impresión, mostrando cómo la secuencia de apilamiento de $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$ es más propensa al daño y la falla. En la configuración de 0° , solo 5 especímenes de 18 (X60, X75, Y, Z60, Z75) son propensos a fallar, mientras que los otros no muestran casi ningún signo de disminución del esfuerzo compresivo uniaxial verdadero.

La Figura 12 muestra comparaciones entre los resultados experimentales y FE con el esfuerzo ingenieril evaluado a diferentes niveles de deformación ingenieril, donde los primeros son valores medios de las pruebas correspondientes. Esta comparación muestra una buena concordancia entre los valores experimentales y numéricos considerando el rango de validez del modelo (el fondo gris representa los niveles de deformación en los que ocurrió el inicio del daño, por lo tanto, la región en la que el modelo presentado no tiene validez).

Los modelos FE también son capaces de capturar una representación precisa de las formas deformadas de algunos especímenes. La Figura 11 muestra la comparación entre las formas deformadas numéricas y experimentales para algunos de los especímenes. El modelo numérico no es capaz de capturar formas deformadas cuando ocurren mecanismos de daño y falla, pero tiene en cuenta la naturaleza anisotrópica del material; de hecho, el modelo no representa los mecanismos de daño y falla y, por lo tanto, no puede capturar este tipo de comportamiento. Como ejemplo, los especímenes X60 muestran falla prematura para ambas secuencias de apilamiento de ángulos de trazo, por lo que su forma deformada no puede ser representada completamente por el modelo FE. Es interesante notar la diferencia en las formas finales entre los mismos especímenes de las dos configuraciones de impresión diferentes, tanto en los modelos FE como en las imágenes experimentales, lo que resalta el efecto de la secuencia de apilamiento de ángulos de trazo.

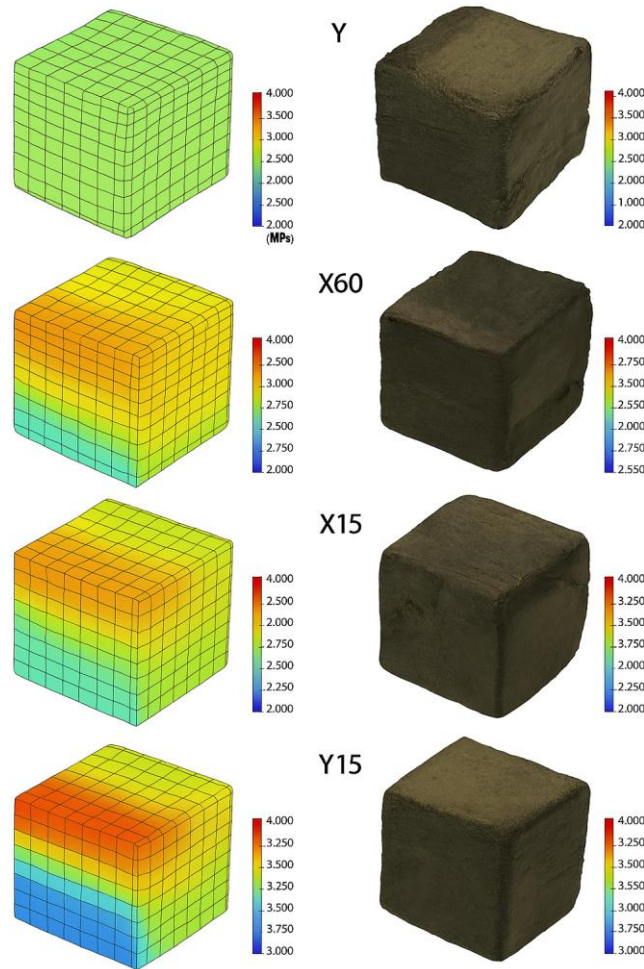


Figura 11. Comparación entre las formas deformadas numéricas y experimentales, con valores de deformación efectiva.

Daño y falla

Esta sección analiza los mecanismos de daño y falla observados en compresión. En 0°, el espécimen Y presenta mayor daño, con la dirección Z perpendicular a la carga. Según Zeybek et al. (2023), los especímenes Y desarrollan dos bandas de cizalla perpendiculares, generando una grieta central (Figura 14). Los especímenes X muestran deformación por separación entre capas en Z, sin alcanzar falla. En Z, la deformación transversal es impulsada por el estiramiento de interfaces de trazos en X, pero no genera falla.

Esta sección analiza los mecanismos de daño y falla observados en compresión. En 0°, el espécimen Y presenta mayor daño, con la dirección Z perpendicular a la carga. Según Zeybek et al. (2023), los especímenes Y desarrollan dos bandas de cizalla perpendiculares, generando una grieta central (Figura 14). Los especímenes X muestran deformación por separación entre capas en Z, sin alcanzar falla. En Z, la deformación transversal es impulsada por el estiramiento de interfaces de trazos en X, pero no genera falla.

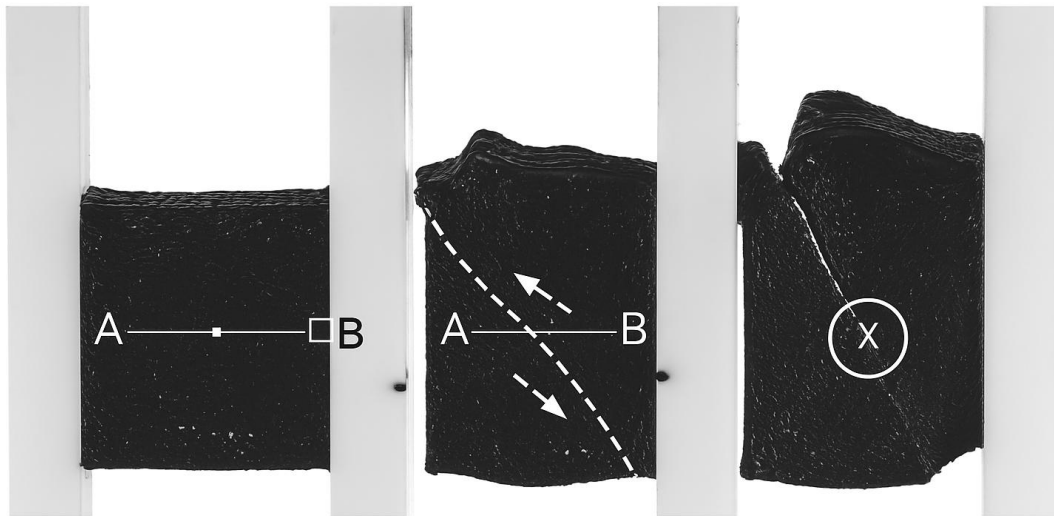


Figura 12. Bandas de cizalla (líneas blancas discontinuas) y apertura de grieta central (círculo blanco) observadas en los especímenes Y de la configuración de impresión de 0°

Los especímenes X60, X75, Z60 y Z75 presentan alta rigidez por su orientación, favoreciendo la delaminación y el deslizamiento por cizalla (Figura 15). Sin embargo, solo X60 y Z75 exhiben falla: deslizamiento por cizalla y delaminación, respectivamente. X45 y Y75 mostraron falla por cizalla en una prueba.

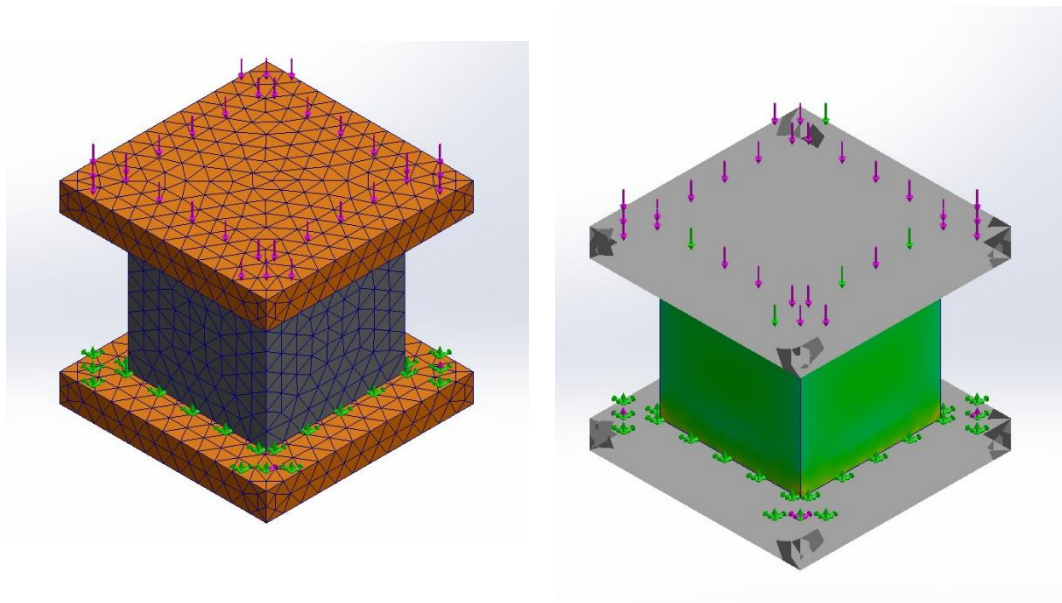


Figura 13. Mecanismo de deformación por cizalla y falla del espécimen X60 en la configuración de 0°

En $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$, la delaminación entre capas es la principal causa de falla, seguida de cizalla cuando las capas están orientadas favorablemente. Los especímenes X, Y, Z15, Z30, Z45, Z60 y Z75 fallan en todas las pruebas, ya que las capas impresas son perpendiculares a la carga. Los especímenes X45, X60, X75, Y45, Y60 y Y75 fallan por deslizamiento por cizalla, excepto un espécimen Y45.



La mayor propensión a falla en $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$ se debe a su patrón de deposición, donde trazos cruzados generan vacíos y tensiones residuales, reduciendo la adhesión entre capas (Khan et al., 2022).

Los mecanismos de daño y falla dependen de la orientación del material, requiriendo un criterio anisotrópico para su modelado. Este estudio emplea una ley de endurecimiento isotrópico, sin capturar la naturaleza anisotrópica de la falla.

Los mecanismos de daño y falla dependen de la orientación del material, requiriendo un criterio anisotrópico para su modelado. Este estudio emplea una ley de endurecimiento isotrópico, sin capturar la naturaleza anisotrópica de la falla.

CONCLUSION

La caracterización de materiales impresos en 3D no es una tarea fácil, y su naturaleza anisotrópica presenta muchos desafíos desde el punto de vista del modelado del comportamiento. La mayoría de los trabajos en la literatura se centran en la caracterización de tracción de los materiales impresos, dejando sin resolver su comportamiento en compresión. Las pruebas de compresión son una herramienta útil para caracterizar el comportamiento de los materiales FDM, y el uso de especímenes postprocesados (presentados en este trabajo) permite un estudio más representativo de las propiedades mecánicas. El presente trabajo proporciona un procedimiento efectivo para caracterizar el comportamiento compresivo de materiales impresos en 3D, centrándose en el postprocesamiento de especímenes y la técnica de modelado FE. Según el conocimiento de los autores, ningún trabajo hasta la fecha ha explorado una combinación más completa de ángulos de trazo y orientaciones de construcción, lo que hace que este trabajo sea valioso como referencia para estudios de anisotropía en el campo de los materiales impresos en 3D. Entre los diferentes hallazgos, el presente trabajo destacó la dependencia del comportamiento mecánico (tanto el comportamiento elastoplástico como los modos de falla) en la estrategia de construcción y la orientación en el espacio. El modelo de material basado en una matriz de rigidez elástica con una combinación del criterio de fluencia de Hill y la ley de endurecimiento isotrópico de Voce es capaz de representar el comportamiento anisotrópico del PLA, capturando también algunos aspectos de los modos de deformación. Una vez enriquecido con un criterio de falla, el modelo FE puede utilizarse de manera efectiva para propósitos de verificación y diseño. El trabajo futuro se enfocará en profundizar en la comprensión de los modos de falla y en el desarrollo de nuevas técnicas de caracterización de materiales.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Universidad Técnica Cotopaxi, Latacunga.

REFERENCIAS

- Athale, M., Park, T., Hahnen, R., & Pourboghrat, F. (2022). Experimental characterization and finite element simulation of FDM 3D printed polymer composite tooling for sheet metal stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9–10), 6973–6989. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09801-0>
- Bandinelli, F., Peroni, L., & Morena, A. (2023). Elasto-plastic mechanical modeling of fused deposition 3D printing materials. *Polymers*, 15(1), 234. <https://doi.org/10.3390/polym15010234>



- Bandinelli, F., Scapin, M., & Peroni, L. (2024). Effects of anisotropy and infill pattern on compression properties of 3D printed CFRP: Mechanical analysis and elasto-plastic finite element modelling. *Rapid Prototyping Journal*, 30(11), 142–158. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2023-0385>
- Birosz, M. T., Ando, M., & Safranyik, F. (2022). Layer adhesion test of additively manufactured pins: A shear test. *Polymers (Basel)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/polym14010055>
- Buj-Corral, I., Domínguez-Fernández, A., & Durán-Llucía, R. (2019). Influence of print orientation on surface roughness in fused deposition modeling (FDM) processes. *Materials (Basel)*, 12(23), 3834. <https://doi.org/10.3390/ma12233834>
- Fallon, J. J., McKnight, S. H., & Bortner, M. J. (2019). Highly loaded fiber filled polymers for material extrusion: A review of current understanding. *Additive Manufacturing*, 30, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100810>
- Ginoux, G., Paux, J., & Allaoui, S. (2023). New preparation method of microstructurally and mechanically standardized PETG specimens by material extrusion additive manufacturing and machining. *Additive Manufacturing*, 66, 103471. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103471>
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, 193(1033), 281–297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
- Khan, S., Joshi, K., & Deshmukh, S. (2022). A comprehensive review on the effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2119–2127. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.433>
- Paul, S. (2021). Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review. *Measurement*, 178, 109320. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109320>
- Reddy, V., Flys, O., Chaparala, A., Berrimi, C. E., Amogh, V., & Rosen, B. G. (2018). Study on surface texture of fused deposition modeling. *Procedia Manufacturing*, 25, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.108>
- Retolaza, J., Ansola, R., Gómez, J. L., & Díez, G. (2021). Identifying elastic constants for PPS technical material when designing and printing parts using FDM technology. *Materials (Basel)*, 14(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma14051123>
- Samy, A. A., et al. (2022). Influence of raster pattern on residual stress and part distortion in FDM of semi-crystalline polymers: A simulation study. *Polymers (Basel)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/polym14132746>
- Sola, A., et al. (2023). Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication. *Polymer Testing*, 117, 107859. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107859>
- Stander, N. A., Basudhar, A., Roux, W., Witowski, K., Eggleston, T., Goel, T., & Craig, K. (2019). *LS-OPT user's manual: A design optimization and probabilistic analysis ability for the engineering analyst*. Livermore Software Technology Corporation. https://www.lsoptsupport.com/documents/manuals/ls-opt/lsopt_60_manual.pdf
- Tessarín, A., Zaccariotto, M., Galvanetto, U., & Stocchi, D. (2022). A multiscale numerical homogenization-based method for the prediction of elastic properties of components produced with the fused deposition modelling process. *Results in Engineering*, 14, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100409>
- Trofimov, A., Le Pavic, J., Pautard, S., Therriault, D., & Levesque, M. (2022). Experimentally validated modeling of the temperature distribution and the distortion during the fused



filament fabrication process. *Additive Manufacturing*, 54, 102693.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102693>

Voce, E. (1948) The Relationship Between Stress and Strain for Homogeneous Deformation. *Journal of the Institute of Metals*, 74, 537-562.

Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12(7), 1529. <https://doi.org/10.3390/polym12071529>

Yu, M., et al. (2023). The effect of cooling rates on thermal, crystallization, mechanical and barrier properties of rotational molding polyamide 11 as the liner material for high-capacity high-pressure vessels. *Molecules*, 28(6), 2425. <https://doi.org/10.3390/molecules28062425>

Zeybek, M. K., Güden, M., & Taşdemirci, A. (2023). The effect of strain rate on the compression behavior of additively manufactured short carbon fiber-reinforced polyamide composites with different layer heights, infill patterns, and built angles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07918-1>

Zhang, W., et al. (2018). Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 137, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.018>

Zhao, Y., Chen, Y., & Zhou, Y. (2019). Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Materials & Design*, 181, 108089. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108089>

Zouaoui, M., Gardan, J., Lafon, P., Makke, A., Labergere, C., & Recho, N. (2021). A finite element method to predict the mechanical behavior of a pre-structured material manufactured by fused filament fabrication in 3D printing. *Applied Sciences*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11115075>

Derechos de autor: 2025 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>