DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 326-338

Integración multimaterial y biomimética obtenida por FFF en MA. Multimaterial integration and biomimetics achieved through FFF in AM.

G. Estrada-Cerón [a], C. G. Flores-Hernández [a], A. Gómez-Ortega [b], J. López-Barroso [a]

[a] *Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Col. Centro Histórico, 76000, Santiago de Querétaro, Querétaro, México* [1]

[b] *CIDESI - Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702. Desarrollo San Pablo, 76125, Santiago de Querétaro, Querétaro, México* [2]

Resumen

La Manufactura Aditiva (MA), mediante la técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) ha evolucionado como una alternativa para la fabricación de Estructuras Multimaterial (EMM) funcionales con propiedades mecánicas avanzadas. Se analiza el papel de los parámetros de impresión que actúan como factores determinantes de la eficiencia en la transferencia de esfuerzos, proporcionando una base técnica para el diseño, caracterización y aplicación de estructuras multimaterial fabricadas mediante FFF. En este contexto, el presente trabajo analiza la integración de múltiples materiales poliméricos y su aplicación en el diseño de estructuras bioinspiradas, donde la distribución del material permite optimizar la transmisión de cargas y la absorción de energía. Se abordan los mecanismos de sinergia multimaterial, incluyendo la interacción entre materiales con propiedades contrastantes y la influencia de la orientación de depósito y la anisotropía estructural. Asimismo, se examinan los principales desafíos asociados al proceso de fabricación, como la adhesión interfacial y la compatibilidad térmica.

Palabras Clave: Manufactura Aditiva, Fabricación por Filamento Fundido, Estructuras Multimaterial

Abstract

Additive Manufacturing (AM) using the Fused Filament Fabrication (FFF) technique has evolved as an alternative for the production of functional Multimaterial Structures (MMS) with advanced mechanical properties. The role of printing parameters as determining factors in stress-transfer efficiency is analyzed, providing a technical basis for the design, characterization, and application of multimaterial structures manufactured through FFF. In this context, the present work examines the integration of multiple polymeric materials and their application in the design of bioinspired structures, where material distribution enables optimization of load transfer and energy absorption. Multimaterial synergy mechanisms are addressed, including the interaction between materials with contrasting properties and the influence of deposition orientation and structural anisotropy. Additionally, the main challenges associated with the manufacturing process are examined, such as interfacial adhesion and thermal compatibility.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, Multimaterial Structures

1. Introducción

La biomimética analiza formas, patrones y funciones de la naturaleza para optimizar el desempeño de estructuras creadas por el hombre (Banken & Oeffner, 2023). Esta disciplina puede contribuir al desarrollo de los metamateriales, los cuales conforman estructuras artificiales diseñadas con geometrías internas específicas que pueden ser inspiradas en la naturaleza (bioinspiradas) y que otorgan propiedades físicas inusuales (Nazir et al., 2023). Por ejemplo, la implementación de dichos modelos bioinspirados permite desarrollar soluciones enfocadas a mejorar el desempeño estructural ante diferentes condiciones críticas de carga e impacto (Banken & Oeffner, 2023; Nazir et al., 2023).

Al combinar los principios de la biomimética con las capacidades de la Manufactura Aditiva (MA), es posible desarrollar estructuras con geometrías y distribuciones de material complejas, aprovechando mayores grados de libertad

*Autor para la correspondencia: jbarrozo69@gmail.com
Correo electrónico: m25140020@queretaro.tecnm.mx (Gilberto Estrada-Cerón), cynthia.fh@queretaro.tecnm.mx (Cynthia G. Flores-Hernández), arturo.gomez@cidesi.edu.mx (Arturo Gómez-Ortega), jbarrozo69@gmail.com (Juventino López-Barroso).

Historial del manuscrito: recibido el 29/04/2026, última versión-revisada recibida el 08/09/2026, aceptado el 18/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.17684

geométrica y un control preciso sobre la orientación y la secuencia de depósito del material capa por capa.

En la actualidad, la MA ha evolucionado significativamente, pasando de ser un método de prototipado rápido a consolidarse como una herramienta clave en la ingeniería moderna capaz de fabricar estructuras funcionales y complejas (Zhou et al., 2024). Dentro de estas tecnologías se encuentra la extrusión de material (MEX), categoría definida por la norma ISO/ASTM 52900 para los procesos en los que el material se deposita selectivamente a través de una boquilla u orificio (International Organization for Standardization, 2021). En este trabajo se utiliza el término Fabricación por Filamento Fundido (FFF) para referirse específicamente al proceso de extrusión de material mediante filamento, mientras que FDM corresponde a una denominación comercial asociada a Stratasys (*Stratasys*, n.d.).

La FFF ofrece amplias posibilidades de fabricación; sin embargo, su naturaleza de construcción capa por capa genera una respuesta mecánica condicionada por la cohesión interlaminar y la anisotropía estructural (Acierno & Patti, 2023; Hsueh et al., 2021).

Aunque originalmente este proceso se enfocaba en polímeros termoplásticos tradicionales, como el ácido poliláctico (PLA) para proyectos o prototipado rápido, la evolución en materiales y equipos ha permitido ampliar sus capacidades hacia aplicaciones industriales en sectores como el automotriz, aeroespacial y biomédico (Acierno & Patti, 2023; Maqsood et al., 2024).

Una estrategia para abordar las limitaciones mecánicas de las estructuras monolíticas, conformadas por un solo material en una misma pieza, es la integración organizada de diversos materiales. De esta manera, la respuesta estructural puede definirse mediante la distribución espacial de los materiales. Dicha distribución se refiere al ordenamiento de cada material dentro del volumen de la misma estructura; incluso es posible asignar materiales con propiedades contrastantes, como rigidez y ductilidad, en regiones específicas según los requerimientos de carga (García-Collado et al., 2022).

Este ordenamiento de materiales posibilita el diseño de gradientes funcionales en determinadas zonas de la estructura mediante transiciones progresivas en la composición o en sus propiedades. Un gradiente alude a una transición progresiva, por ejemplo, de un material o una propiedad como la tenacidad. Gradar las propiedades mecánicas puede reducir las concentraciones de esfuerzos y favorecer una transferencia de carga progresiva y eficiente (Ahn et al., 2024; Saldívar et al., 2023). En contraste, las estructuras monolíticas no permiten regular gradualmente las propiedades mediante la combinación de materiales con diferente respuesta mecánica.

Además, la FFF permite integrar polímeros reforzados con fibras, como fibras de carbono (CF) y fibras de vidrio (GF), con la finalidad de modificar y mejorar determinadas propiedades mecánicas del material base. La integración de estos refuerzos puede incrementar la rigidez y la resistencia de los componentes impresos, aunque su desempeño final depende de factores como el tipo, el contenido y la orientación de las fibras, así como de los parámetros de fabricación (Maqsood et al., 2024; Wong et al., 2023).

A pesar de los avances en la fabricación multimaterial mediante FFF, aún existen aspectos que requieren una mayor comprensión, especialmente en la relación entre los parámetros de fabricación, la distribución de los materiales, la adhesión interfacial, el diseño biomimético y el desempeño mecánico. Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo analizar la relación entre dichos factores y la integración de materiales con propiedades contrastantes, con la finalidad de comprender cómo influyen en el comportamiento mecánico de las estructuras multimaterial, así como los principales desafíos tecnológicos del proceso.

A partir de este análisis, se plantea un marco causal donde se integran los parámetros de fabricación, la configuración multimaterial y los mecanismos interfaciales con la respuesta mecánica de las estructuras fabricadas mediante FFF. La principal contribución de esta revisión radica en integrar dentro de un mismo marco de análisis factores que se estudian por separado, relacionando los parámetros de fabricación, la configuración multimaterial, los mecanismos interfaciales y las estrategias biomiméticas con el desempeño mecánico y los principales desafíos tecnológicos de la FFF multimaterial.

2. Metodología de revisión

El presente trabajo se desarrolló mediante una revisión narrativa y un análisis crítico de la literatura. La búsqueda se orientó a identificar estudios relacionados con la Fabricación por Filamento Fundido (FFF), la manufactura aditiva, la fabricación multimaterial, los polímeros termoplásticos, las propiedades mecánicas, las interfaces entre materiales, los parámetros de fabricación y la incorporación de principios biomiméticos. La literatura recopilada se analizó con la finalidad de reconocer relaciones entre los elementos, así como tendencias, limitaciones y desafíos asociados con el desempeño de estructuras multimaterial fabricadas mediante FFF.

La búsqueda documental se realizó mediante Google Scholar y plataformas de consulta científica como ScienceDirect, SpringerLink y MDPI. Como palabras clave se utilizaron “multimaterial fused filament fabrication”, “FFF”, “bioinspired additive manufacturing” e “interfacial adhesion FFF”, además de combinaciones relacionadas con propiedades mecánicas, interfaces multimaterial y parámetros de impresión.

Se priorizaron las publicaciones más recientes, principalmente de 2021 a 2026, incluyendo trabajos previos que aportaran fundamentos importantes para la comprensión de la revisión. Como criterios de elegibilidad se consideraron trabajos relacionados con FFF o extrusión de material, estructuras multimaterial, polímeros termoplásticos, propiedades mecánicas, adhesión interfacial, parámetros de fabricación y estrategias de diseño biomimético. Los estudios correspondientes a otras tecnologías de manufactura aditiva se consideraron únicamente cuando aportaban principios mecánicos o de diseño transferibles al análisis de estructuras multimateriales, indicando dicha condición durante la discusión.

Durante la búsqueda se revisaron aproximadamente 35 documentos a partir del título, resumen y relación con el objetivo del trabajo. Posteriormente, se realizó un análisis de los estudios considerados relevantes y se descartaron aquellos cuya tecnología, material o variable analizada no permitía establecer una relación suficientemente clara con el enfoque de la revisión. Finalmente, 26 fuentes documentales fueron integradas en la versión final, de las cuales 21 corresponden a artículos científicos y revisiones arbitradas, 2 corresponden a libros académicos, 1 norma técnica y 2 fuentes complementarias.

Para organizar la información recopilada, los estudios se agruparon conforme a los principales factores identificados durante la revisión: parámetros de fabricación, anisotropía estructural, adhesión interfacial, distribución y transición de materiales, estrategias biomiméticas y respuesta mecánica. A partir de estas categorías se realizó una síntesis cualitativa, comparando las tendencias, coincidencias, diferencias, resultados y limitaciones reportadas en los estudios seleccionados.

A partir de esta comparación se construyó el marco causal presentado en la Figura 4, el cual organiza las relaciones identificadas entre el proceso de Fabricación por Filamento Fundido (FFF), los parámetros de impresión multimaterial, las estrategias biomiméticas y geometrías bioinspiradas, los mecanismos de sinergia multimaterial y los principales desafíos tecnológicos del proceso. Para la elaboración del marco causal se consideraron únicamente aquellas relaciones que se presentaron de manera recurrente en la literatura revisada y que contaban con evidencia experimental o conceptual suficiente para relacionar una variable de fabricación o de diseño con una respuesta mecánica. Posteriormente, estas relaciones se integraron mediante una interpretación conjunta dentro del contexto de la FFF multimaterial.

La revisión presenta algunas limitaciones derivadas de su carácter narrativo, ya que no se aplicó un protocolo sistemático de búsqueda ni un análisis cuantitativo. Además, la diversidad de materiales, configuraciones de impresión, geometrías y métodos de ensayo reportados en la literatura dificulta la comparación directa entre algunos estudios. Por esta razón, los resultados se interpretaron principalmente a partir de tendencias y relaciones comunes, evitando establecer comparaciones cuantitativas cuando las condiciones experimentales no eran equivalentes.

Tabla 1. Síntesis comparativa de estudios relevantes para el análisis de estructuras multimaterial y bioinspiradas mediante manufactura aditiva.

Autor/año	Tecnología	Materiales	Diseño biomimético	Parámetros	Propiedad evaluada	Resultado principal	Limitación
Acierno & Patti (2023)	FDM	Termoplásticos	No	Reología, temperatura y unión entre capas	Adhesión interlaminar y resistencia	La unión entre capas influye directamente en la resistencia de la pieza.	No aborda estructuras multimaterial.
Ahn et al. (2024)	FDM multimaterial	PLA/PETG	Indirecto	Gradiente y composición	Resistencia interfacial	El gradiente elevó el esfuerzo de fractura de **9.92 a 30.16 MPa**.	Requiere filamento multimaterial programado.
García-Collado et al. (2022)	MA multimaterial	Polímeros	No	Material, interfaz y proceso	Mecánicas y funcionales	Integra propiedades y aplicaciones de la MA multimaterial polimérica.	Incluye diferentes tecnologías de MA.
Hasanov et al. (2022)	MA multimaterial	Diversos	No	Material y proceso	Mecánicas y funcionales	Identifica avances y desafíos en la fabricación multimaterial.	No se limita a FFF polimérica.
Hsueh et al. (2021)	FDM	PLA	No	Orientación de impresión y patrón de deposición (*raster*)	Tracción	La orientación modifica significativamente la respuesta mecánica del PLA.	Estudio monomaterial.
Maqsood et al. (2024)	Extrusión de material	Polímero + fibra de carbono (CF) continua	No	Orientación de fibra y proceso	Mecánicas y fractura	La orientación del refuerzo y la interfaz condicionan el desempeño mecánico.	Se centra en fibra continua.
Nazir et al. (2023)	MA multimaterial	Diversos	Indirecto	Diseño, material y proceso	Mecánicas y funcionales	Integra diseño, propiedades, aplicaciones y desafíos de la MA multimaterial.	Alcance más amplio que FFF.
Saldívar et al. (2023)	PolyJet multimaterial	Material rígido/flexible	Sí	Gradiente y geometría interfacial	Resistencia y tenacidad	Los diseños bioinspirados aumentaron la tenacidad hasta **≈50 %** respecto al control.	No utiliza FFF.

Autor/año	Tecnología	Materiales	Diseño biomimético	Parámetros	Propiedad evaluada	Resultado principal	Limitación
Wang et al. (2025)	FDM multimaterial	Diversos filamentos	No	Alimentación y alternancia de material	Adhesión y resistencia	La adhesión interlaminar es determinante para la resistencia de la impresión.	Se enfoca en mecanismos de alimentación.
Wong et al. (2023)	MA de compósitos	Polímeros + fibras	No	Orientación y distribución de fibras	Desempeño mecánico	Relaciona la distribución del refuerzo con el desempeño del componente.	No se limita a FFF multimaterial.
Tuninetti et al. (2025)	MA de estructuras lattice	Diversos	Sí	Geometría y topología	Esfuerzo, deformación y absorción de energía	Relaciona configuraciones lattice biomiméticas con el desempeño mecánico.	Integra diferentes procesos y materiales.
Yang et al. (2024)	SLA	Resina DSM8000	Indirecto	Gradiente de espesor y geometría celular	Compresión	Los gradientes de espesor mejoraron el desempeño frente a estructuras uniformes.	No utiliza FFF ni multimateriales.
K. Yu et al. (2025)	Diversas técnicas de MA	Compuestos poliméricos	Indirecto	Distribución y orientación del refuerzo	Desempeño mecánico/funcional	La optimización permite controlar distribución de material y orientación de fibras.	Revisión amplia de composites.
X. Yu et al. (2025)	MA multimaterial	Diversos	No	Distribución y diseño computacional	Predicción del desempeño	Integra optimización multimaterial con restricciones de fabricación.	Enfoque principalmente computacional.

En conjunto, los estudios revisados coinciden en que el desempeño mecánico de las estructuras fabricadas mediante FFF no depende únicamente de las propiedades de los materiales, sino también de las condiciones de fabricación y de la forma en que estos se distribuyen dentro de la pieza. Estudios centrados en FFF muestran la influencia de la unión entre capas y la orientación de impresión sobre la respuesta mecánica (Acierno & Patti, 2023; Hsueh et al., 2021), mientras que trabajos enfocados en fabricación multimaterial destacan la importancia de la adhesión interfacial, la distribución espacial de los materiales y el control de las transiciones entre regiones con propiedades diferentes (Ahn et al., 2024; García-Collado et al., 2022; Wang et al., 2025). De manera complementaria, la incorporación de refuerzos y el control de su orientación permiten modificar localmente la rigidez y la resistencia de las estructuras fabricadas (Maqsood et al., 2024; Wong et al., 2023).

Más que contradicciones directas entre los estudios, se observan diferencias en las tecnologías, materiales y estrategias utilizadas para controlar la respuesta mecánica. Algunos trabajos analizan directamente la FFF, mientras que otros emplean tecnologías como PolyJet o SLA para estudiar principios de gradación, interfaces bioinspiradas o distribución geométrica de propiedades (Saldívar et al., 2023; Yang et al., 2024). Estos últimos aportan principios de diseño útiles, aunque su aplicación a FFF debe considerarse de manera conceptual debido a las diferencias entre procesos. En este sentido, la literatura presenta evidencia relevante sobre parámetros de fabricación, interfaces, gradientes, biomimética y predicción del desempeño, pero estos elementos suelen estudiarse de manera separada. Esta fragmentación muestra la necesidad de analizar su interacción conjunta dentro de las estructuras multimaterial fabricadas mediante FFF, relación que se integra posteriormente en el marco causal propuesto en este trabajo.

3. Resultados

A partir de los factores identificados dentro de la brecha de conocimiento y de la relación encontrada entre los parámetros analizados, los resultados de la revisión se organizan en las siguientes secciones. En ellas se integran los principales hallazgos relacionados con la FFF, los parámetros de fabricación, las estrategias biomiméticas, la sinergia multimaterial y los desafíos tecnológicos asociados al desempeño mecánico.

3.1. Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

La FFF se ha consolidado como una de las técnicas ampliamente utilizadas para el procesamiento de polímeros termoplásticos y materiales compuestos dentro de la manufactura aditiva (Acierno & Patti, 2023; Zhou et al., 2024). Su aplicación permite controlar diferentes aspectos de la geometría interna y de la respuesta mecánica de las estructuras mediante la modificación de los parámetros de fabricación (Acierno & Patti, 2023; Hsueh et al., 2021). Estas capacidades han favorecido el desarrollo de estructuras complejas y estrategias de diseño bioinspirado, donde la geometría y la distribución de los materiales pueden utilizarse para reproducir principios estructurales presentes en sistemas naturales (Nazir et al., 2023; Tuninetti et al., 2025).

El proceso de FFF consiste en fundir y extruir un filamento termoplástico previamente fabricado para depositarlo de manera secuencial capa por capa, siguiendo trayectorias predefinidas digitalmente (Gibson et al., 2021).

En la Figura 1 se muestra cómo durante este ciclo el material es dispensado mediante un sistema de alimentación hacia un termofusor donde el material incrementa su temperatura hasta alcanzar su temperatura de extrusión. Posteriormente, el material se extruye a través de una boquilla y se deposita capa sobre capa, permitiendo la construcción progresiva de geometrías complejas (Zhou et al., 2024). Sin embargo, este mecanismo de unión térmica produce un

comportamiento particular, ya que las propiedades mecánicas de la estructura fabricada varían según la dirección de las capas impresas, generando una anisotropía estructural. La orientación de impresión y la dirección de extrusión condicionan la respuesta mecánica final de las estructuras ante cargas aplicadas (Hsueh et al., 2021).

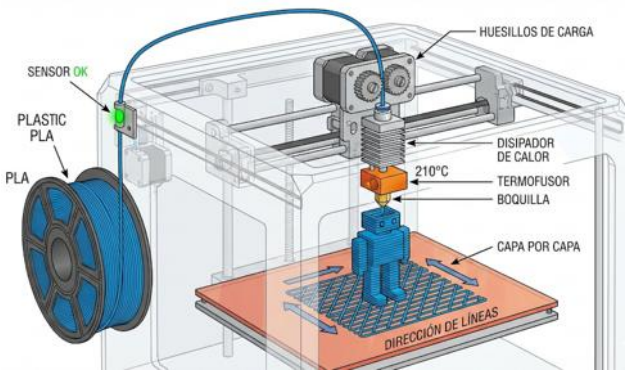


Figura 1. Esquema general del funcionamiento del proceso de Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Nota: elaboración propia con apoyo de la herramienta de IA generativa Google Gemini.

Por lo tanto, la modificación de parámetros como la temperatura de extrusión, la orientación de impresión y la velocidad de depósito influyen directamente en la cohesión entre capas, la anisotropía estructural y, en consecuencia, en el desempeño mecánico final (Acierno & Patti, 2023; Hsueh et al., 2021). El control de estas variables permite dirigir la respuesta mecánica de la estructura y reducir algunas de las limitaciones asociadas con la naturaleza anisotrópica del proceso.

Actualmente, la evolución de la FFF permite integrar múltiples materiales, ya sea mediante filamentos de distinta composición o mediante materiales reforzados. Para ello, pueden utilizarse diferentes configuraciones de alimentación, como sistemas de una sola boquilla con múltiples entradas de material o sistemas de múltiples boquillas, además de mecanismos de alternancia automática entre filamentos (Wang et al., 2025). Estas configuraciones amplían las posibilidades de diseño al permitir la distribución de distintos materiales dentro de una misma pieza desde la etapa digital de laminado, favoreciendo el desarrollo de estructuras donde la geometría y la composición del material pueden combinarse estratégicamente (García-Collado et al., 2022; Nazir et al., 2023).

3.2. *Parámetros de impresión para la fabricación multimaterial*

La fabricación multimaterial mediante FFF requiere un control adecuado de las variables de proceso. Estos parámetros determinan la calidad de la adhesión interfacial y la orientación en la que se deposita el material. Además, pueden condicionar directamente la resistencia mecánica y la eficiencia de la sinergia entre materiales (Nazir et al., 2023). A continuación, se mencionan los parámetros de mayor relevancia.

3.2.1. *Temperatura de extrusión*

Es la temperatura a la que el filamento se funde dentro del termofusor antes de ser depositado a través de la boquilla.

La gestión térmica del filamento influye en la difusión molecular y en la coalescencia entre las capas de material depositado. Un equilibrio térmico adecuado favorece la unión en la interfaz sin comprometer la integridad del polímero por degradación (Acierno & Patti, 2023).

3.2.2. *Velocidad de impresión*

Es la velocidad lineal con la que el extrusor deposita el material fundido y condiciona el tiempo disponible para la transferencia de calor entre las capas depositadas. Velocidades elevadas pueden reducir la interacción térmica y limitar la coalescencia entre capas, mientras que velocidades moderadas pueden favorecer una mayor interacción entre el material depositado y la capa anterior, contribuyendo a una mejor unión interlaminar (Lorkowski et al., 2025).

3.2.3. *Altura de capa*

Es el espesor de cada capa de material depositado durante el proceso de fabricación. Este parámetro influye en la unión entre capas y en la respuesta mecánica de las estructuras impresas. En general, alturas de capa menores pueden favorecer una mayor cohesión interlaminar y mejorar la resistencia mecánica, aunque su efecto también depende del material y de las demás condiciones de fabricación (Hsueh et al., 2021). En estructuras multimaterial, también se ha observado que una menor altura de capa puede favorecer la adhesión entre materiales al modificar el contacto entre los filamentos en la interfaz (Tarrés et al., 2025).

Desde una perspectiva biomimética, la altura de capa también condiciona la resolución con la que pueden aproximarse transiciones o gradientes inspirados en sistemas naturales. Mientras que muchas transiciones biológicas presentan una variación continua de sus propiedades, la FFF las reproduce mediante capas discretas. Por ello, una menor altura de capa puede permitir una aproximación más gradual entre regiones, aunque sin reproducir completamente la continuidad presente en los sistemas biológicos.

3.2.4. *Patrón de relleno*

Es la geometría interna generada por las trayectorias del material depositado dentro de la estructura. La configuración del patrón permite modificar la distribución interna del material y la trayectoria mediante la cual se transmiten las cargas, influyendo en la respuesta mecánica de la pieza.

En estructuras multimaterial, estas geometrías también pueden utilizarse para organizar espacialmente regiones con propiedades contrastantes y controlar la distribución de los materiales dentro de la estructura (Nazir et al., 2023). Desde una perspectiva biomimética, algunas configuraciones geométricas pueden inspirarse en estructuras celulares presentes en la naturaleza, como panales o redes reticulares,

buscando reproducir principios de distribución del material y eficiencia estructural (Tuninetti et al., 2025).

3.2.5. Ángulo de orientación

Es la dirección en la que las líneas de material extruido se depositan con respecto a la dirección principal en la que se aplican las cargas mecánicas. El ángulo de depósito influye en el nivel de anisotropía de la estructura fabricada. Cuando las trayectorias de material se alinean con la dirección de carga, la rigidez y la resistencia pueden incrementarse debido a una transferencia de esfuerzos más eficiente a lo largo de las líneas depositadas; en cambio, orientaciones diferentes pueden modificar la respuesta mecánica de acuerdo con la geometría, el material y las condiciones de fabricación (Hsueh et al., 2021; Maqsood et al., 2024).

Desde una perspectiva biomimética, la orientación del material puede utilizarse como una estrategia para dirigir la respuesta mecánica de acuerdo con las principales trayectorias de carga, siguiendo de manera conceptual principios presentes en estructuras naturales con elementos orientados. De esta forma, el control del ángulo de depósito permite aprovechar la anisotropía como una variable de diseño dentro de las posibilidades del proceso de FFF.

3.2.6. Condiciones térmicas

Las condiciones térmicas incluyen la temperatura de la cama (plataforma de impresión) y del entorno durante el proceso de fabricación. Un control térmico adecuado contribuye a reducir gradientes de temperatura y deformaciones como el levantamiento de las esquinas, favoreciendo la estabilidad dimensional de la pieza (Acierno & Patti, 2023). En estructuras multimaterial, estas condiciones adquieren mayor relevancia debido a las diferencias en las propiedades térmicas y reológicas de los materiales utilizados, las cuales deben considerarse para mantener condiciones de fabricación compatibles entre sí (Wang et al., 2025).

3.2.7. Humedad del material

Es el contenido de humedad absorbido por el filamento antes del proceso de impresión. Algunos polímeros utilizados en FFF presentan un comportamiento higroscópico, por lo que la humedad absorbida puede afectar la estabilidad del material durante la extrusión.

La presencia de humedad puede generar vacíos y aumentar la porosidad interna de las piezas impresas, afectando posteriormente su respuesta mecánica. Por esta razón, controlar las condiciones de almacenamiento y realizar un adecuado acondicionamiento del filamento antes de la impresión permite reducir los efectos asociados con la absorción de humedad (Lendvai et al., 2024).

3.3. Biomimética y geometrías estructurales bioinspiradas

La FFF permite desarrollar estructuras donde la geometría interna y la composición del material pueden combinarse estratégicamente para modificar el comportamiento mecánico de la pieza. Este tipo de enfoque resulta particularmente relevante dentro del diseño bioinspirado, ya que diversos sistemas biológicos presentan configuraciones jerárquicas y distribuciones de material relacionadas con un desempeño estructural eficiente, que sirven como referencia para el desarrollo de estructuras artificiales con funciones mecánicas específicas (Banken & Oeffner, 2023; Tuninetti et al., 2025).

Este principio de diseño biomimético se aprovecha como una variable de diseño controlable. Además, el diseño puede extrapolarse conceptualmente al momento de fabricar una estructura multimaterial mediante FFF. Esto permite que la distribución de materiales y la geometría se utilicen para generar regiones con respuestas mecánicas diferenciadas.

La Figura 2 muestra un ejemplo ilustrativo de integración multimaterial con alta complejidad geométrica, mediante la silla Durotaxis. Aunque esta estructura fue fabricada con un proceso de impresión multimaterial diferente a la FFF, su diseño resulta relevante por el principio de distribución espacial de los materiales en zonas específicas. La silla combina diversos gradientes de geometría, densidad y composición del material, aportando la rigidez necesaria para el soporte y la flexibilidad requerida para el confort (Yávar, 2015).

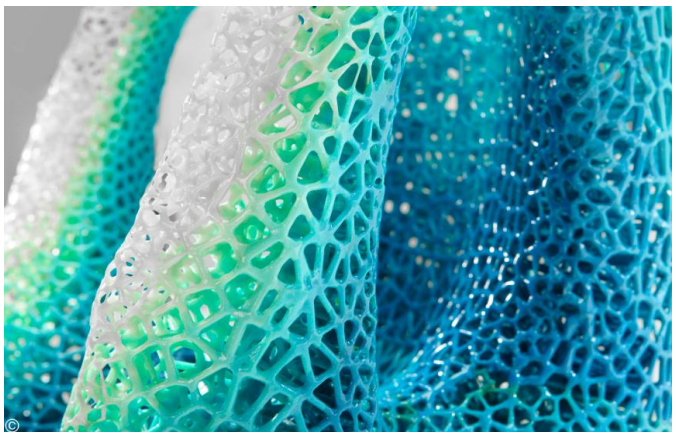


Figura 2. Integración de multimateriales en una estructura. Nota: Reproducida de Durotaxis (Yávar, 2015).

A partir de esta transferencia conceptual, la integración multimaterial puede organizarse mediante diferentes estrategias relacionadas con el diseño bioinspirado, entre las que se identifican:

- *Zonificación rígida o funcional:* Inclusión de materiales con mayor rigidez o refuerzo en regiones específicas de acuerdo con los requerimientos mecánicos de la estructura (Nazir et al., 2023).
- *Gradación funcional:* Transición progresiva entre materiales o propiedades para reducir discontinuidades mecánicas en las interfaces (Ahn et al., 2024; Saldívar et al., 2023).

- *Integración de propiedades contrastantes:* Combinación de materiales con respuestas mecánicas contrastantes, como rigidez y flexibilidad, dentro de una misma estructura (García-Collado et al., 2022).
- *Optimización geométrica:* Distribución estratégica del material mediante configuraciones geométricas que permitan concentrarlo en zonas donde su requerimiento estructural sea mayor (Tuninetti et al., 2025).

El ordenamiento jerárquico puede mejorar la relación entre el peso y el desempeño estructural, permitiendo distribuir el material de acuerdo con las necesidades mecánicas de la geometría (Tuninetti et al., 2025). Asimismo, estos principios pueden trasladarse conceptualmente a la FFF mediante geometrías bioinspiradas que toman como referencia estructuras presentes en huesos, corales o escamas, tal como se observa en la Figura 3a). En este tipo de diseños, la distribución del material no es al azar, sino que responde a principios de eficiencia funcional, donde la geometría y la composición del material trabajan en conjunto para potenciar el desempeño mecánico (Nazir et al., 2023; Tuninetti et al., 2025).

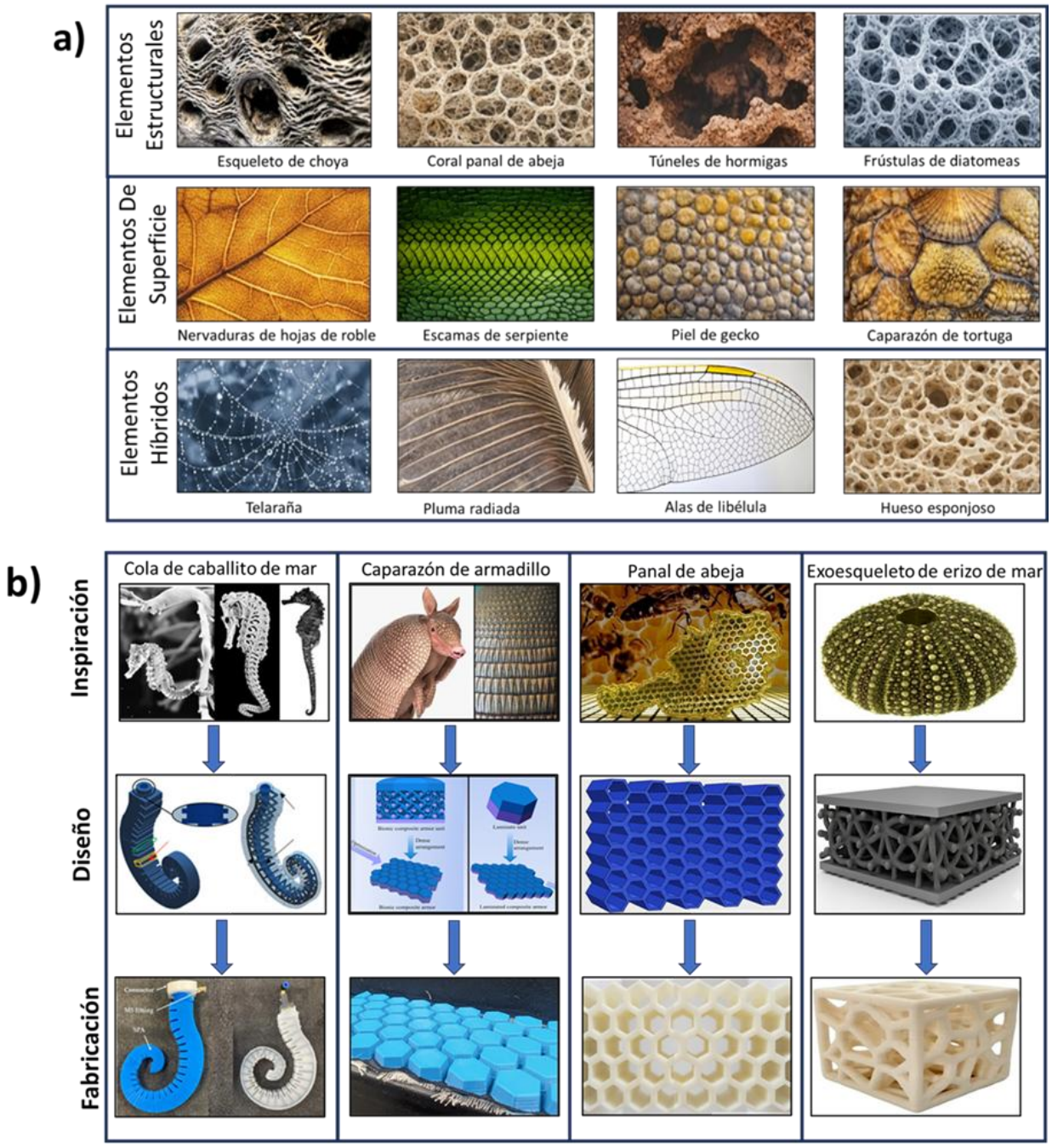


Figura 3. Ejemplos de inspiración biomimética aplicada al diseño de estructuras manufacturadas. (a) Representación ilustrativa de diversas geometrías y texturas presentes en sistemas naturales empleadas como referentes conceptuales para el diseño biomimético. (b) Proceso de inspiración, diseño y fabricación de

estructuras bioinspiradas en la cola del caballito de mar, el caparazón del armadillo, la estructura tipo panal y el exoesqueleto del erizo de mar. Nota: La representación mostrada en (a) es de elaboración propia y se utiliza con fines ilustrativos. Las imágenes de (b) fueron adaptadas de Antonelli et al. (2024), Yang et al. (2024) y Grande et al. (2025), publicadas bajo licencia CC BY 4.0. Los elementos correspondientes al diseño bioinspirado en el caparazón de armadillo fueron adaptados de Zhang et al. (2024).

Estos principios han sido ampliamente estudiados dentro del campo de la biomimética, el cual busca trasladar estrategias estructurales presentes en la naturaleza al diseño de sistemas de ingeniería (Banken & Oeffner, 2023). En este contexto, la FFF puede utilizarse para materializar algunas de estas estrategias mediante el diseño de geometrías estructurales bioinspiradas complejas, como estructuras reticulares "*lattice*" o de celosía, formadas por la repetición de celdillas unitarias (nodos y barras) que crean redes estructurales. En estas configuraciones, la geometría desempeña un papel importante en la respuesta mecánica de la estructura (Tuninetti et al., 2025). Este proceso se representa de manera esquemática en la Figura 3b), mostrando la transición desde la inspiración biológica y el diseño hasta su fabricación.

La jerarquía biológica sirve como referente para el desarrollo de estructuras artificiales capaces de distribuir las cargas de manera estratégica. Su aplicación en manufactura aditiva puede realizarse mediante diferentes recursos de diseño, como la variación geométrica, la orientación estructural o la distribución de materiales con propiedades mecánicas contrastantes. En estructuras multimaterial, esta última estrategia permite asignar diferentes materiales en regiones específicas de acuerdo con la función mecánica requerida, buscando aproximarse a principios de organización presentes en sistemas naturales (Hasanov et al., 2022; Nazir et al., 2023).

3.4. Sinergia multimaterial: fundamento y mecanismos

La sinergia multimaterial surge cuando distintos materiales interactúan para complementarse dentro de una misma estructura y potenciar así su desempeño mecánico. Cuando existe una interacción adecuada entre los materiales, este fenómeno puede trascender la suma de sus propiedades individuales, generando una respuesta mecánica integrada que no depende únicamente del comportamiento aislado de cada material (Hasanov et al., 2022).

De esta manera, un diseño bioinspirado aplicado a una estructura multimaterial puede contribuir a reducir la formación de zonas críticas mediante estrategias basadas en la integración y transición de materiales. En otras palabras, la incorporación de múltiples materiales dentro de una misma estructura permite generar regiones con diferentes niveles de rigidez, posicionando los materiales de acuerdo con las necesidades mecánicas de la geometría y favoreciendo una distribución más adecuada de las cargas (Nazir et al., 2023).

Los mecanismos fundamentales de esta integración se enlistan a continuación:

- *Compartición de cargas:* el material o región con mayor rigidez puede asumir una mayor proporción de las cargas aplicadas, contribuyendo a proteger zonas más vulnerables dentro de la estructura multimaterial. Esta distribución depende de la geometría, las propiedades de los materiales y la calidad de su interacción (Callister & Rethwisch, 2018; Nazir et al., 2023).
- *Distribución o propagación de deformación:* Los materiales con mayor capacidad de deformación pueden contribuir a absorber energía y distribuirla de manera más controlada dentro de la estructura, reduciendo la concentración de deformaciones y favoreciendo el retraso en la propagación de fracturas (Callister & Rethwisch, 2018; Tuninetti et al., 2025).
- *Propiedades gradadas:* El diseño de transiciones progresivas entre materiales o propiedades puede reducir las discontinuidades y concentraciones de esfuerzos en las interfaces, favoreciendo una transferencia de cargas más gradual entre regiones con diferente respuesta mecánica (Ahn et al., 2024; Saldívar et al., 2023).
- *Optimización geométrica:* Esta capacidad permite concentrar materiales de mayor desempeño o refuerzos en las zonas con mayores requerimientos mecánicos, reduciendo su utilización en regiones menos solicitadas y favoreciendo una distribución más eficiente del material dentro de la estructura (Nazir et al., 2023; X. Yu et al., 2025).
- *Orientación y secuencia de depósito:* La orientación estratégica de las trayectorias y de los refuerzos permite modificar la respuesta mecánica según la dirección de las cargas, aprovechando la naturaleza anisotrópica del proceso de fabricación (Hsueh et al., 2021; Maqsood et al., 2024).

Aunque la sinergia entre distintos materiales y compuestos puede generar respuestas mecánicas más complejas dentro de una misma estructura, este efecto puede potenciarse cuando se combina con estrategias de diseño bioinspirado. En estos sistemas, la distribución del material no ocurre de manera arbitraria, sino que responde a configuraciones estructurales que buscan optimizar la transmisión de cargas, la absorción de energía y la eficiencia en el uso del material (Tuninetti et al., 2025).

En el contexto de la manufactura aditiva multimaterial, estos principios pueden implementarse mediante la combinación estratégica de materiales con propiedades contrastantes, así como mediante distintas estrategias de refuerzo estructural que permiten modular el comportamiento mecánico de la pieza (Nazir et al., 2023). Entre estas estrategias, la incorporación de fibras constituye una alternativa capaz de reforzar regiones específicas de la estructura y dirigir la respuesta mecánica de manera localizada (Wong et al., 2023).

3.5. Desafíos tecnológicos de manufactura multimaterial

La fabricación de estructuras multimaterial mediante FFF presenta retos relacionados tanto con la naturaleza capa por capa del proceso como con la compatibilidad entre los materiales utilizados. En estas estructuras, el desempeño mecánico no depende únicamente de las propiedades individuales de cada material, sino también de su distribución, orientación y de la calidad de la unión generada en las interfaces. Desde un enfoque bioinspirado, estas variables pueden aprovecharse para orientar la respuesta mecánica hacia zonas o direcciones específicas según los requerimientos de carga, utilizando de manera controlada la anisotropía inherente del proceso (Maqsood et al., 2024; Nazir et al., 2023).

Este comportamiento no depende de un único factor, sino de la interacción entre la anisotropía inherente al proceso, la calidad de las interfaces multimaterial, la transición de propiedades y las estrategias de predicción del desempeño. En este sentido, la Figura 4 presenta un marco causal del desempeño mecánico en FFF multimaterial, el cual integra estos mecanismos dentro de un mismo esquema de análisis, permitiendo comprender cómo las condiciones de fabricación y diseño se traducen en la respuesta mecánica general de la pieza final.

3.5.1. Anisotropía estructural

Las estructuras fabricadas mediante FFF suelen presentar un comportamiento anisotrópico debido a la naturaleza direccional del depósito de material capa por capa y a la unión interfacial. Como se ilustra en la Figura 4a), la respuesta mecánica puede variar entre el plano de depósito XY y la dirección Z, usualmente cuando las cargas actúan de manera perpendicular a las uniones interlaminares. Desde un enfoque bioinspirado, esta característica puede aprovecharse mediante la orientación estratégica del depósito del material de acuerdo con los principales requerimientos de carga, de manera similar al ordenamiento direccional presente en algunas estructuras naturales, como es el caso del bambú.

Al identificar estas direcciones de carga, es posible orientar los refuerzos o distribuir materiales con diferentes propiedades en zonas específicas, aprovechando la anisotropía como una variable de diseño. No obstante, su control resulta complejo debido a la dirección de depósito, la unión entre capas y las variaciones térmicas durante el proceso, las cuales pueden favorecer defectos o una disminución de la adherencia interlaminar.

Por lo tanto, el desafío no consiste en eliminar completamente la anisotropía, sino en controlar sus efectos y, cuando sea posible, aprovecharla de manera estratégica para reducir la formación de zonas mecánicamente vulnerables y orientar la respuesta de la estructura multimaterial (Hsueh et al., 2021).

3.5.2. Adherencia entre materiales

Para que la interacción entre materiales sea efectiva, la interfaz debe permitir una transferencia adecuada de cargas entre las diferentes regiones de la estructura. En esta zona, las condiciones térmicas durante la deposición y el contacto entre los materiales influyen en la calidad de la unión formada. Como se muestra en la Figura 4b), las líneas de material depositado generan zonas de contacto en las que las diferencias térmicas, la contracción y una unión insuficiente pueden favorecer la aparición de defectos interfaciales.

La compatibilidad entre los materiales y los mecanismos de unión desarrollados durante la deposición son factores importantes para mantener la integridad de la interfaz y favorecer la transferencia de cargas entre regiones con propiedades diferentes (Tarrés et al., 2025; Wang et al., 2025).

En estructuras multimaterial, el control de estas interfaces resulta especialmente relevante cuando se emplean transiciones entre materiales, ya que una distribución progresiva de las propiedades puede contribuir a reducir discontinuidades mecánicas y concentraciones de esfuerzos.

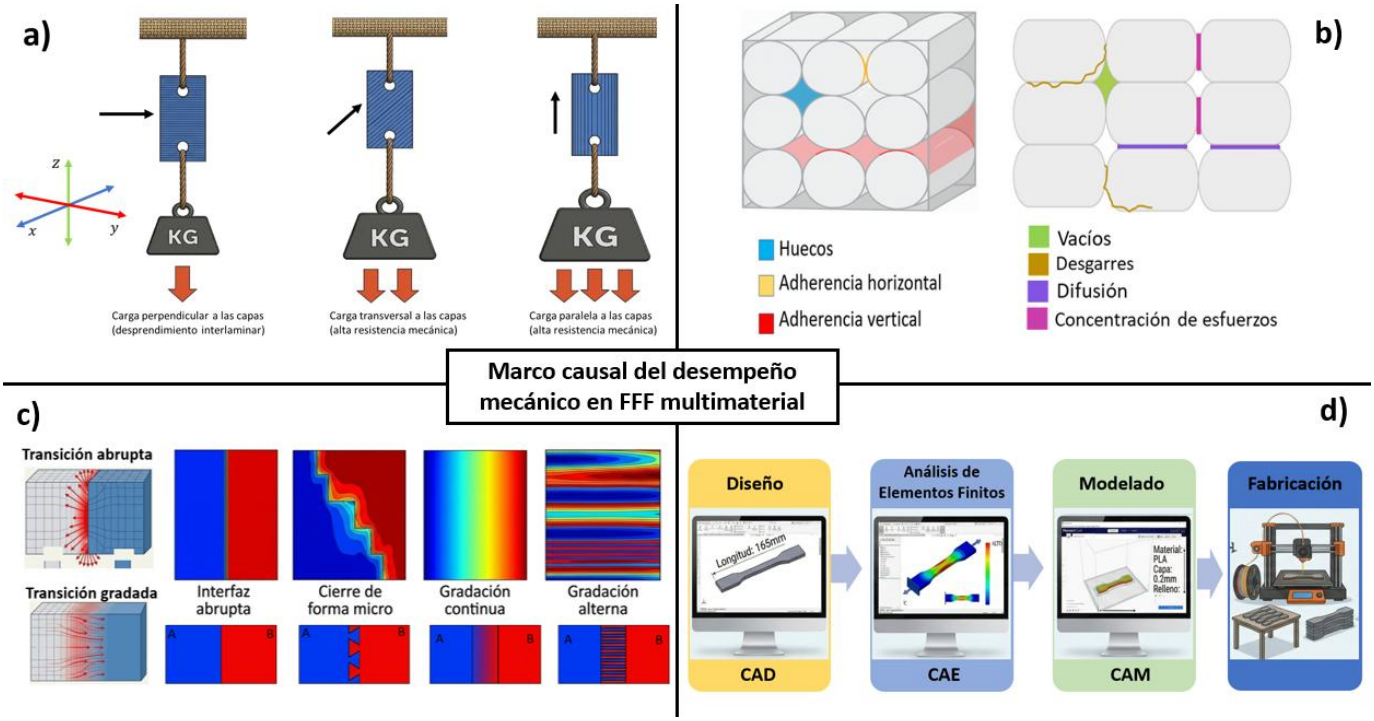


Figura 4. Marco causal de los determinantes en el desempeño mecánico de estructuras multimaterial obtenidas mediante FFF. (a) Anisotropía estructural inducida por la orientación de las capas respecto a la dirección de carga; (b) representación esquemática de mecanismos de adhesión y defectos interlaminares; (c) estrategias de configuración de la interfaz multimaterial mediante transición abrupta, cierre de forma micro, transición continua y transición alterna; y (d) flujo de diseño, análisis y fabricación mediante herramientas CAD-CAE-CAM. Nota: Los elementos de la figura fueron redibujados y reorganizados por los autores como esquemas originales a partir de los conceptos descritos en la literatura. El apartado (a) se sustenta conceptualmente en los principios de anisotropía descritos en Fabricación Aditiva; (b), en los mecanismos de unión y defectos de impresión descritos por Drugă et al. (2021) y en la literatura citada en el texto; (c), en las estrategias de transición multimaterial descritas por Seidel (2022); y (d) corresponde a un esquema de elaboración propia. No se reproducen directamente imágenes originales de terceros.

Las diferencias de contracción térmica entre materiales pueden favorecer la pérdida de adherencia interfacial, debilitando la unión entre capas o regiones de material y comprometiendo la respuesta mecánica de la estructura. Una adhesión interfacial insuficiente limita la transferencia de cargas entre zonas con propiedades mecánicas contrastantes, como regiones rígidas y dúctiles, reduciendo la eficiencia de su interacción dentro de la estructura multimaterial (Wang et al., 2025).

3.5.3. Control de la gradación

La gradación funcional permite generar transiciones progresivas entre materiales, reduciendo cambios abruptos en las propiedades mecánicas que pueden favorecer concentraciones de esfuerzos y zonas de falla. Desde una perspectiva biomimética, este principio se relaciona con sistemas naturales donde las propiedades varían progresivamente entre regiones, favoreciendo una distribución más gradual de las cargas dentro de una estructura (Ahn et al., 2024). Sin embargo, el control de este gradiente tiene un alto nivel de complejidad debido a las limitaciones de los programas de laminado y dispositivos actuales de FFF (Wang et al., 2025; Zhou et al., 2024).

Su complejidad radica en gestionar el depósito y la integración de múltiples materiales de manera precisa dentro de zonas específicas, evitando comprometer la integridad de las interfaces. Comprender la distribución de materiales dentro de la estructura, como se ilustra en la Figura 4c), permite identificar regiones donde la gradación del material puede implementarse de forma estratégica, favoreciendo una distribución más gradual de los esfuerzos y reduciendo concentraciones en las interfaces entre materiales (Ahn et al., 2024; García-Collado et al., 2022; Nazir et al., 2023).

En sistemas de fabricación multimaterial, ya sea mediante múltiples extrusores o mecanismos automáticos de cambio de filamento, la transición entre materiales depende del control de variables relacionadas con el depósito, el cambio de material y las condiciones térmicas de la interfaz (Wang et al., 2025).

A pesar de los avances en los programas de laminado y dispositivos de fabricación, mantener un control adecuado de la gradación continúa siendo una tarea compleja, debido a la interacción entre distintas variables de proceso que pueden generar diferentes respuestas mecánicas (Nazir et al., 2023).

3.5.4. Predicción del desempeño

La predicción del comportamiento de una EMM difiere de la de predecir el comportamiento de una estructura monolítica de material termoplástico, debido a la distribución variable de los materiales y a la anisotropía generada durante el proceso de fabricación.

En este contexto, el diseño bioinspirado puede incorporarse desde el modelado digital, permitiendo evaluar configuraciones estructurales basadas en principios naturales mediante herramientas de asistencia por computadora antes de su fabricación. Mediante el diseño asistido por computadora (CAD) se define la geometría, la estructura y la zonificación

multimaterial. El análisis asistido por computadora (CAE), usualmente mediante métodos de elementos finitos, permite evaluar la respuesta mecánica considerando la anisotropía, las interfaces y la distribución de los materiales. Por su parte, dentro del flujo de manufactura asistida por computadora (CAM), el modelo digital se traslada a las condiciones de fabricación, incluyendo la generación de trayectorias y la definición de parámetros de proceso mediante programas de laminado. Este proceso, ilustrado en la Figura 4d), permite relacionar el diseño, el análisis y las condiciones reales de fabricación dentro de un flujo integrado CAD-CAE-CAM (X. Yu et al., 2025; Zhou et al., 2024).

De manera complementaria, revisiones recientes destacan el creciente uso de enfoques computacionales avanzados para mejorar la predicción del desempeño en sistemas fabricados mediante manufactura aditiva (Zhou et al., 2024).

4. Integración del concepto multimaterial en el proceso de diseño y fabricación

La integración de principios biomiméticos en estructuras multimaterial fabricadas mediante FFF muestra una relación estrecha entre las posibilidades geométricas del diseño y las limitaciones propias del proceso de fabricación. Como se ha observado a lo largo de la revisión, estrategias como la zonificación de materiales, la orientación dirigida y la gradación funcional permiten aproximarse a principios presentes en sistemas naturales, aunque su reproducción mediante FFF continúa condicionada por la naturaleza discreta del depósito capa por capa (Ahn et al., 2024; Nazir et al., 2023; Tuninetti et al., 2025).

Desde esta perspectiva, existe una diferencia importante entre los gradientes presentes en los sistemas biológicos y aquellos que pueden fabricarse actualmente mediante FFF. En la naturaleza, las variaciones en composición, densidad o geometría pueden desarrollarse de manera continua y a diferentes escalas, mientras que en FFF estas transiciones deben aproximarse mediante capas, regiones o cambios discretos de material. Por lo tanto, la capacidad de reproducir una transición bioinspirada depende no solo del diseño propuesto, sino también de la resolución de fabricación, la compatibilidad entre materiales y el control disponible sobre su distribución.

Esta diferencia plantea una relación relevante entre diseño y proceso de fabricación. En las condiciones actuales, un diseño bioinspirado debe ajustarse en cierta medida a las capacidades y limitaciones del proceso de fabricación para poder materializarse. Sin embargo, desde una perspectiva de desarrollo tecnológico, también puede plantearse la dirección contraria: adaptar progresivamente el proceso de fabricación para reproducir configuraciones multimaterial cada vez más cercanas al diseño propuesto. Esto requiere avances en los sistemas de deposición, programas de laminado, compatibilidad multimaterial y herramientas de predicción capaces de considerar simultáneamente la anisotropía, las interfaces y la distribución espacial de los materiales.

En este sentido, el verdadero desafío no radica en reproducir únicamente una geometría observada en la naturaleza, sino en trasladar su principio funcional dentro de las posibilidades del proceso. La biomimética aplicada a la FFF multimaterial puede comprenderse, por tanto, como una aproximación en la que el referente biológico se interpreta y adapta mediante variables controlables de fabricación, como la geometría, la orientación, la transición entre materiales y la distribución de sus propiedades. Tal relación muestra que el desempeño final depende de la interacción entre el diseño, los materiales y el proceso, más que de alguno de estos factores de manera individual.

5. Conclusiones

Las estructuras multimaterial obtenidas mediante FFF representan un área de desarrollo con alto potencial dentro de la manufactura aditiva. La combinación de materiales con propiedades contrastantes y la integración de estrategias de diseño bioinspirado permiten modificar la respuesta mecánica de una estructura mediante la distribución, la gradación y la zonificación de los materiales. De esta manera, es posible aproximarse a principios de organización presentes en la naturaleza, como la distribución jerárquica y funcional observada en estructuras óseas, corales o vegetales.

El desempeño mecánico de estas estructuras no depende únicamente de las propiedades individuales de los materiales, sino también de los mecanismos de transferencia de carga desarrollados en sus interfaces. Factores como la calidad de la adhesión, la transición entre los materiales, la secuencia de depósito capa por capa, la orientación de impresión y la anisotropía asociada al proceso condicionan la respuesta mecánica final de la estructura. Por esta razón, el diseño multimaterial mediante FFF necesita considerar de manera conjunta la relación entre materiales, geometría, interfaz y proceso de fabricación.

La revisión indica que la biomimética puede aportar principios funcionales para orientar la distribución de materiales y propiedades dentro de estructuras fabricadas mediante FFF; sin embargo, su implementación se mantiene condicionada por la resolución del proceso, la compatibilidad entre materiales y la capacidad de controlar las interfaces y las transiciones multimaterial. En este sentido, la integración entre diseño bioinspirado, fabricación multimaterial y herramientas de predicción constituye una línea relevante para continuar desarrollando estructuras con respuestas mecánicas cada vez más controladas.

Finalmente, la anisotropía, la adherencia interfacial y la sensibilidad a las variables del proceso continúan representando desafíos importantes. La comprensión de los mecanismos de transferencia de carga y de su relación con los parámetros de fabricación se mantiene como un área abierta de investigación, particularmente para aplicaciones donde sean necesarias respuestas mecánicas específicas y una distribución funcional de los materiales.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron Google Gemini para la elaboración generativa de la Figura 1 a partir de conceptos, ideas y diseños de los autores, quienes definieron colores, estructuras y composición, mientras que la IA se encargó de la ejecución visual. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes

asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Declaración de autores

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Querétaro por el apoyo institucional para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, se reconoce el apoyo de la SECIHTI a través del programa de becas a posgrado núm. 2128932.

Referencias

Acierno, D., & Patti, A. (2023). Fused deposition modelling (FDM) of thermoplastic-based filaments: Process and rheological properties—An overview. Materials, 16(24), 7664. https://doi.org/10.3390/ma16247664

Ahn, S. J., Lee, H., & Cho, K. J. (2024). 3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients. Nature Communications, 15, 3605. https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5

Banken, E., & Oeffner, J. (2023). Biomimetics for innovative and future-oriented space applications—A review. Frontiers in Space Technologies, 3, 1000788. https://doi.org/10.3389/frspt.2022.1000788

Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.

Drugă, C., Șerban, I., Braun, B., & Tulică, A. (2021). Analysis of the influence of the layer height on the strength of 3D printed structures. In 11th International Conference on Information Science and Information Literacy (pp. 177–181). https://doi.org/10.2478/9788395815065-019

García-Collado, A., Blanco, J. M., Gupta, M. K., & Dorado-Vicente, R. (2022). Advances in polymers based multi-material additive-manufacturing techniques: State-of-art review on properties and applications. Additive Manufacturing, 50, 102577. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102577

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7

Grande, E., Imbimbo, M., Pelliccio, A., & Tomei, V. (2025). Bio-inspired 3D-printed modular system for protection of historic floors: From multilevel knowledge to a customized solution. Heritage, 8(11), 450. https://doi.org/10.3390/heritage8110450

Hasanov, S., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., Huseynov, O., Fidan, I., Alifui-Segbaya, F., & Rennie, A. (2022). Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 6(1), 4. https://doi.org/10.3390/jmmp6010004

Hsueh, M. H., Lai, C. J., Chung, C. F., Wang, S. H., Huang, W. C., Pan, C. Y., Zeng, Y. S., & Hsieh, C. H. (2021). Effect of printing parameters on the tensile properties of 3D-printed polylactic acid (PLA) based on fused deposition modeling. Polymers, 13(14), 2387. https://doi.org/10.3390/polym13142387

International Organization for Standardization. (2021). Additive manufacturing—General principles—Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021). https://www.iso.org/standard/74514.html

Lendvai, L., Fekete, I., Jakab, S. K., Szarka, G., Verebélyi, K., & Iván, B. (2024). Influence of environmental humidity during filament storage on the structural and mechanical properties of material extrusion 3D-printed poly(lactic acid) parts. Results in Engineering, 24, 103013. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103013

Lorkowski, L., Wybrzak, K., Brancewicz-Steinmetz, E., Świniarski, J., & Sawicki, J. (2025). Influence of print speed on the mechanical performance of 3D-printed bio-polymer polylactic acid. Materials, 18(8), 1765. https://doi.org/10.3390/ma18081765

Maqsood, N., Rimašauskas, M., Ghobakhloo, M., Mordas, G., & Skotnicová, K. (2024). Additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polymer composites using materials extrusion process. Mechanical properties, process parameters, fracture analysis, challenges, and future prospect. A review. Advanced Composites and Hybrid Materials, 7, 202. https://doi.org/10.1007/s42114-024-01035-w

Nazir, A., Gokcekaya, O., Billah, K. M. M., Ertugrul, O., Jiang, J., Sun, J., & Hussain, S. (2023). Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. Materials & Design, 226, 111661. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661

Saldívar, M. C., Tay, E., Isaakidou, A., Moosabeiki, V., Fratila-Apachitei, L. E., Doubrovski, E. L., Mirzaali, M. J., & Zadpoor, A. A. (2023). Bioinspired rational design of bi-material 3D printed soft-hard interfaces. Nature Communications, 14, 7919. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43422-9

Seidel, C. (2022, June 20). Multi-material metal parts by Powder Bed Fusion: New application opportunities. Metal Additive Manufacturing. https://www.metal-am.com/articles/multi-material-metal-parts-by-powder-bed-fusion-new-application-opportunities/

Stratasys. (n.d.). Legal information. Recuperado el 19 de agosto de 2026, de https://www.stratasys.com/en/legal/legal-information/

Tarrés, N., Garcia-Romeu, M. L., & Ferrer, I. (2025). On the interlaminar bonding adhesion of the PLA-TPU printed multimaterial. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. https://doi.org/10.1007/s00170-025-17099-x

Tuninetti, V., Narayan, S., Ríos, I., Menacer, B., Valle, R., Allehaibi, M., Kaisan, M. U., Samuel, J., Oñate, A., Pincheira, G., Mertens, A., Duchêne, L., & Garrido, C. (2025). Biomimetic lattice structures design and manufacturing for high stress, deformation, and energy absorption performance. Biomimetics, 10(7), 458. https://doi.org/10.3390/biomimetics10070458

Wang, Z., Wang, L., Tang, F., & Chen, J. (2025). Multi-material additive manufacturing via fused deposition modeling 3D printing: A systematic review on the material feeding mechanism. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 239(6), 3865–3880. https://doi.org/10.1177/09544089231223316

Wong, J., Altassan, A., & Rosen, D. W. (2023). Additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composites: A technical review and status of design methodologies. Composites Part B: Engineering, 255, 110603. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110603

Yang, D., Guo, L., & Fan, C. (2024). Mechanical behavior of 3D-printed thickness gradient honeycomb structures. Materials, 17(12), 2928. https://doi.org/10.3390/ma17122928

Yávar, J. (2015, April 7). Silla Durotaxis / Synthesis Design + Architecture. ArchDaily México. https://www.archdaily.mx/mx/765024/silla-durotaxis-synthesis-design-plus-architecture

Yu, K., Dunn, M. L., Qi, H. J., & Maute, K. (2025). Recent advances in design optimization and additive manufacturing of composites: From enhanced mechanical properties to innovative functionalities. npj Advanced Manufacturing, 2, 26. https://doi.org/10.1038/s44334-025-00040-1

Yu, X., Griffis, J., Manogharan, G., & Panesar, A. (2025). Multi-material additive manufacturing: A computational design perspective. Virtual and Physical Prototyping, 20(1), e2546671. https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2546671

Zhang, F., Zhu, P., Lu, P., Qian, K., Liu, S., & Wang, L. (2024). Biomimetic design and impact simulation of Al_2O_3/Al composite armor based on armadillo shell. Scientific Reports, 14, 20216. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71255-z

Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. Sensors, 24(9), 2668. https://doi.org/10.3390/s24092668