

Additively manufactured composite materials under biaxial loading: a systematic review of characterization, modeling, and failure prediction

Materiales compuestos fabricados aditivamente bajo carga biaxial: revisión sistemática de su caracterización, modelado y predicción de falla

O. A. González-Estrada  ; J. D Pérez-Ruiz  ; D. F. Santamaría-Maldonado 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.26500>

Artículo de revisión.

Abstract— Additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composites offers new possibilities for structural design, yet their response under biaxial loading remains fragmented and insufficiently consolidated. This systematic review analyzes additively manufactured fiber-reinforced polymers subjected to biaxial loading. Publications from January 2014 to August 2025 were searched in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Dialnet, Redalyc, SciELO, and Redib. Of 281 records identified, 52 studies met the eligibility criteria and were included in the thematic synthesis and bibliometric analysis. The evidence was classified as direct, indirect, transferred from conventional composites, or methodologically enabling. The findings reveal a limited experimental base, substantial heterogeneity in specimens and testing protocols, insufficient validation of numerical models, and few predictive criteria calibrated for printing-induced defects. Finite-element, multiscale, and machine-learning approaches show potential, but require more systematic verification, experimental validation, and sensitivity analysis. A local σ_{11} – τ_{12} representation is proposed as a testable framework for constructing physically interpretable failure envelopes; its comparative advantage remains un demonstrated. Future research should prioritize experimental standardization, data traceability, model validation, and environmental assessment.

Index Terms— Additive manufacturing, biaxial testing, composites, failure criteria, mechanical behavior

Resumen— La fabricación aditiva de polímeros reforzados con fibras ofrece nuevas posibilidades para el diseño estructural; sin embargo, su respuesta bajo carga biaxial permanece dispersa y poco consolidada. Esta revisión sistemática analiza polímeros reforzados con fibras fabricados aditivamente y sometidos a cargas biaxiales. Se buscaron publicaciones entre enero de 2014 y agosto de 2025 en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Dialnet, Redalyc, SciELO y Redib. De los 281 registros identificados, 52 estudios cumplieron los criterios de elegibilidad y se incluyeron en la síntesis temática y el análisis bibliométrico. La evidencia se clasificó como directa, indirecta, transferida desde compuestos convencionales o habilitadora desde el punto de vista metodológico. Los resultados revelan una base experimental limitada, una marcada heterogeneidad en las probetas y los protocolos de ensayo, una validación insuficiente de los modelos numéricos y pocos criterios predictivos calibrados para defectos inducidos por la impresión. Los enfoques de elementos finitos, multiescala y aprendizaje automático muestran potencial, pero requieren verificación sistemática, validación experimental y análisis de sensibilidad. Se propone una

representación local σ_{11} – τ_{12} como marco comprobable para construir envolventes de falla físicamente interpretables; su ventaja comparativa aún no ha sido demostrada. Las investigaciones futuras deberían priorizar la estandarización experimental, la trazabilidad de los datos, la validación de modelos y la evaluación ambiental.

Palabras claves— Ensayos biaxiales, comportamiento mecánico, criterios de falla, fabricación aditiva, materiales compuestos

I. INTRODUCTION

EL desarrollo y aplicación de materiales compuestos ha marcado un hito en el diseño de estructuras avanzadas debido a su alta relación resistencia-peso, capacidad de personalización y resistencia frente a condiciones extremas. Estos materiales se emplean ampliamente en los sectores aeroespacial, automotriz, civil y energético, donde el desempeño estructural es crítico. En particular, los polímeros reforzados con fibras han demostrado un notable potencial como sustitutos de materiales tradicionales como el acero o el aluminio, especialmente en aplicaciones donde la ligereza y la integridad mecánica son esenciales [1], [2].

Paralelamente, la evolución de la manufactura aditiva (AM) ha abierto un nuevo paradigma de diseño y fabricación, permitiendo la producción capa por capa de componentes con geometrías complejas, gradientes funcionales y altos niveles de personalización. La combinación de esta tecnología con materiales compuestos ha dado lugar a los llamados materiales compuestos fabricados aditivamente (*Additively Manufactured Composites*, AMCs), que integran eficiencia estructural, flexibilidad geométrica y potencial de optimización funcional [3].

Sin embargo, la comprensión del comportamiento mecánico de los AMCs aún se encuentra en desarrollo, especialmente bajo condiciones de carga multiaxial, donde los efectos de la anisotropía inducida por el proceso de fabricación son más evidentes. La carga biaxial, en particular, representa un escenario tanto complejo como habitual en aplicaciones reales (Figura 1), donde los componentes están sometidos



simultáneamente a esfuerzos en múltiples direcciones. Ensayos como el dispositivo de Arcan han sido tradicionalmente utilizados para caracterizar compuestos convencionales [4], [5], y están comenzando a adaptarse al estudio de los AMCs.

Estudios recientes revelan que los modos de falla bajo carga biaxial pueden diferir significativamente de los observados en ensayos uniaxiales, manifestando fenómenos como iniciación localizada de grietas, deslaminaciones interlaminares, o fracturas progresivas influenciadas por la arquitectura interna del material [6], [7]. Además, factores ambientales como humedad, temperatura y envejecimiento térmico pueden intensificar estos efectos, como se ha evidenciado en estudios sobre el comportamiento higrotérmico de uniones adhesivas entre compuestos y aleaciones metálicas [6].

Desde una perspectiva numérica, la predicción del comportamiento mecánico de los AMCs bajo carga biaxial requiere modelos avanzados capaces de representar anisotropía, evolución de daño y mecanismos multiescala [8], [9] (Figura 1). En este contexto, herramientas como el método de los elementos finitos, técnicas experimentales avanzadas y enfoques basados en aprendizaje automático han emergido como estrategias prometedoras para mejorar la caracterización

evolución del daño interlaminar y translaminar [18], [19].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo ofrecer una visión integral del estado del arte sobre el comportamiento mecánico de materiales compuestos fabricados aditivamente bajo carga biaxial, abarcando tanto enfoques experimentales como metodologías de simulación, y destacando los desafíos actuales y tendencias emergentes. Se busca así sentar una base sólida para futuras investigaciones orientadas al diseño, optimización y validación de estructuras avanzadas sometidas a condiciones de carga compleja.

El manuscrito se organiza de la siguiente manera. A continuación, se describe la metodología de la investigación, incluyendo las fuentes de información, la estrategia de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, el proceso de selección de los artículos y los procedimientos empleados para el análisis bibliométrico y la síntesis temática. Posteriormente, la sección “Resultados bibliométricos” presenta la evolución temporal de las publicaciones, la distribución geográfica e institucional, las revistas y autores más influyentes, los clústeres de palabras clave y las principales tendencias del campo. Luego, la sección “Estado del arte” examina la manufactura aditiva de materiales compuestos, su

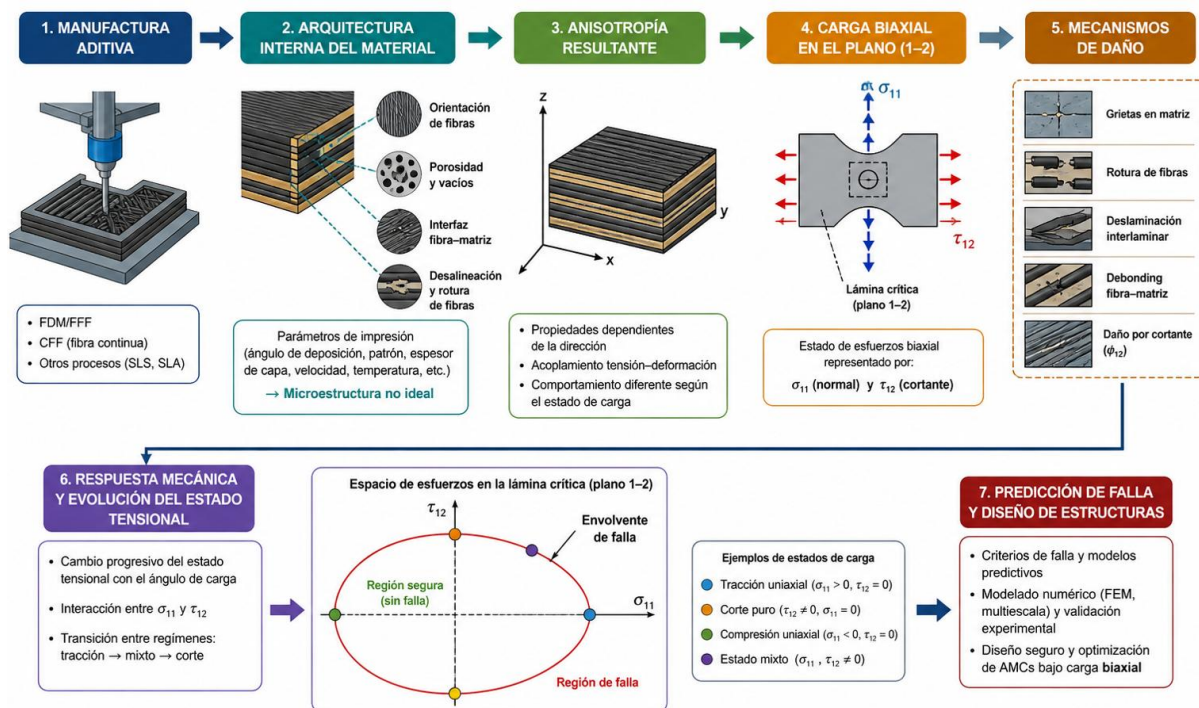


Figura 1. Relación conceptual entre la manufactura aditiva y la evolución del estado tensional bajo carga biaxial (Fuente: elaboración propia).

y predicción de falla en estos materiales [9], [10], [11], [12], [13], [14].

La arquitectura interna del refuerzo, particularmente la orientación de fibras, el tipo de matriz y el patrón de deposición, afecta directamente la rigidez, resistencia y comportamiento a fractura de los AMCs bajo carga biaxial [15]–[17]. Para capturar esta complejidad, se han desarrollado modelos micromecánicos que combinan elementos finitos con subrutinas personalizadas, capaces de describir con precisión la

comportamiento anisotrópico y multiaxial, los ensayos biaxiales, el modelado numérico, los enfoques multiescala y los criterios de falla. La sección “Prioridades de investigación” identifica las principales brechas y propone líneas futuras relacionadas con la estandarización experimental, los modelos constitutivos, los factores ambientales, las bases de datos, la escalabilidad y la integración de enfoques híbridos. Finalmente, “Conclusiones y perspectivas futuras” sintetiza los hallazgos principales y sus implicaciones para el desarrollo de

investigaciones posteriores.

I. MÉTODOS

A. Metodología de la revisión

Esta revisión sistemática fue elaborada siguiendo las recomendaciones del protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) con el fin de garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico en el proceso de recopilación y análisis de la literatura científica. Se realizó una búsqueda estructurada de artículos en bases de datos científicas internacionales reconocidas, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Dialnet, Redalyc, SciELO y Redib. La búsqueda se llevó a cabo entre enero y agosto de 2025, sin restricción de idioma, aunque se priorizaron documentos en inglés y español por su relevancia y accesibilidad académica.

B. Criterios de inclusión

En esta revisión se incluyeron los estudios que cumplían con criterios claramente definidos, centrados en investigaciones que analizan el comportamiento mecánico de materiales compuestos, especialmente aquellos sometidos a condiciones de carga biaxial. Asimismo, se consideraron los trabajos que abordan materiales compuestos fabricados mediante procesos de manufactura aditiva, como el moldeo por deposición fundida (FDM), la sinterización selectiva por láser (SLS), la estereolitografía (SLA) o tecnologías híbridas. También se incorporaron artículos que presentan modelos numéricos, criterios de falla o enfoques basados en aprendizaje automático aplicados al análisis mecánico de dichos materiales. Finalmente, se seleccionaron únicamente publicaciones indexadas en revistas científicas arbitradas o en actas de conferencias internacionales con comité técnico, garantizando la calidad y el rigor metodológico de las fuentes analizadas.

C. Criterios de exclusión

Se excluyeron de esta revisión los estudios que abordaban exclusivamente materiales convencionales que no fueran compuestos, así como aquellos que no analizaban el comportamiento de los materiales bajo cargas multiaxiales o que no consideraban la manufactura aditiva como método de fabricación. También se descartaron las revisiones de tipo narrativo que no presentaban un análisis sistemático, y los trabajos que carecían de resultados cuantitativos o replicables que permitieran la comparación y validación de sus hallazgos.

D. Estrategia de búsqueda

Para maximizar la cobertura de la búsqueda, se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos en inglés y en español. Entre los principales términos utilizados se incluyeron expresiones como “*additive manufacturing*” AND “*composites*” AND “*biaxial loading*”, “*additive manufacturing*” AND “*mechanical behavior*” AND (“*biaxial testing*” OR “*Arcan*”), “*Arcan*” AND “*composites*” AND (“*mechanical behaviour*” OR “*biaxial*”) y “*fabricación aditiva*” AND “*materiales compuestos*” AND “*cargas*

biaxiales”. El rango temporal considerado abarcó el período comprendido entre enero de 2014 y agosto de 2025; por tanto, 2025 corresponde a un año parcial, en atención a la consolidación reciente de la manufactura aditiva de materiales compuestos y al creciente interés por su caracterización mecánica bajo condiciones de carga multiaxial.

E. Proceso de selección de artículos

Además del proceso de cribado representado en el diagrama PRISMA, se elaboró una clasificación de los criterios de exclusión aplicados (Figura 2). La mayoría de los artículos descartados correspondían a estudios sobre compuestos tradicionales sin relación con manufactura aditiva, trabajos de ensayos uniaxiales o investigaciones enfocadas en polímeros sin refuerzo. Esta depuración refuerza la especificidad de la revisión, garantizando que los 52 estudios incluidos aborden directamente el comportamiento mecánico de materiales compuestos fabricados aditivamente bajo condiciones de carga biaxial.

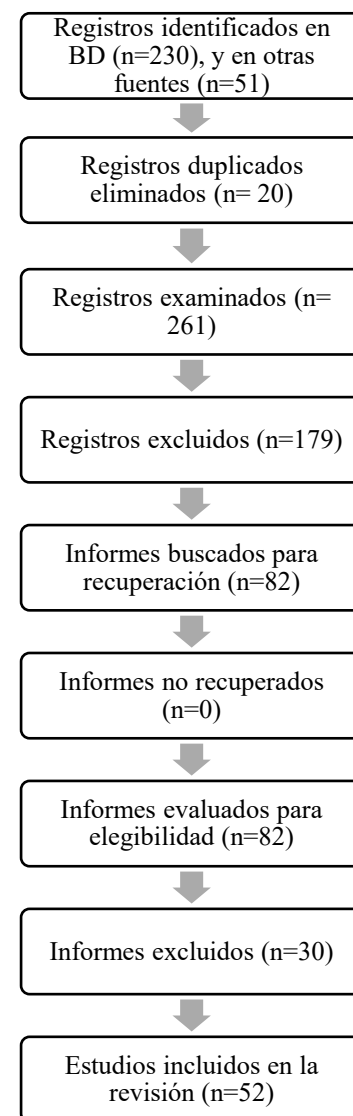


Figura 2. Diagrama PRISMA del proceso de selección de artículos (2014-2025) (Fuente: elaboración propia).

El diagrama de flujo PRISMA 2020 (Figura 2) ilustra de manera sistemática el proceso de identificación, cribado y selección de los estudios incluidos en la presente revisión. En total, se identificaron 281 registros (230 provenientes de bases de datos (BD) indexadas y 51 de otros registros o fuentes complementarias). Tras la eliminación de 20 duplicados, se evaluaron 261 documentos únicos en la fase de cribado inicial, basada en la lectura de títulos y resúmenes. Durante esta primera etapa se excluyeron 179 artículos, principalmente por no abordar materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva o por carecer de análisis bajo condiciones de carga multiaxial. Posteriormente, 82 informes completos fueron seleccionados para su revisión a texto completo, de los cuales 30 fueron excluidos al no cumplir con los criterios de elegibilidad previamente establecidos (por ejemplo, ausencia de resultados cuantitativos, enfoque uniaxial o revisiones narrativas sin metodología sistemática).

Finalmente, 52 estudios fueron incluidos en la revisión sistemática, los cuales constituyen la base analítica para el desarrollo de la síntesis temática y el análisis bibliométrico. Este proceso asegura la transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico de la revisión, conforme a las directrices establecidas por la declaración PRISMA 2020, garantizando la trazabilidad del proceso de selección y la coherencia entre los objetivos de investigación y las fuentes consultadas.

F. Análisis bibliométrico y síntesis temática

El análisis bibliométrico se llevó a cabo utilizando la herramienta VOSviewer, lo que permitió examinar la evolución temporal de las publicaciones y generar mapas de co-ocurrencia de palabras clave que reflejan las tendencias de investigación más relevantes en el campo. Posteriormente, se realizó una síntesis temática en la que los artículos seleccionados fueron clasificados en cinco ejes principales: (1) tecnologías de manufactura aditiva aplicadas a materiales compuestos, (2) ensayos biaxiales y criterios de falla, (3) modelos numéricos y enfoques multiescala, (4) aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático en compuestos fabricados aditivamente, y (5) factores ambientales y comparaciones con materiales compuestos tradicionales. Finalmente se busca obtener una relación entre el proceso de manufactura aditiva y su respuesta a cargas biaxiales, desde la evolución del estado tensional hasta la manifestación de la falla (Figura 3).

II. RESULTADOS

A. Resultados bibliométricos

El análisis bibliométrico se llevó a cabo a partir de la base de datos construida en esta revisión sistemática, la cual incluyó artículos publicados entre 2014 y 2024 en revistas indexadas de alto impacto. Tras la depuración y aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 52 artículos que constituyen la muestra analizada.

El mapa de co-ocurrencias generado con VOSviewer (Figura 3) muestra una estructura temática compuesta por varios clusters diferenciados, lo que evidencia un campo

multidisciplinario aún en consolidación. El nodo central corresponde al *finite element method* y los *numerical models*, confirmando que la modelación computacional sigue siendo el eje dominante de la investigación, aunque con una limitada articulación con validaciones experimentales bajo cargas biaxiales. El cluster asociado a *failure (mechanical)* y *laminated composites* representa la base histórica del dominio, sustentada en estudios de compuestos convencionales, mientras que *additive manufacturing* aparece en una posición periférica, indicando un desarrollo aún emergente y poco integrado a los marcos analíticos tradicionales. Por su parte, el cluster de *polymer matrix composites* y *fiber reinforced plastics* actúa como un enlace entre fabricación y respuesta mecánica, pero presenta alta dispersión, reflejada en la ausencia de estandarización y la baja comparabilidad entre estudios. En conjunto, los patrones observados sugieren que el avance del campo progresa más rápido en modelación que en caracterización experimental multiaxial, lo cual refuerza la necesidad de enfoques híbridos que integren experimentación avanzada, simulación multiescala e inteligencia artificial para consolidar la investigación en materiales compuestos fabricados aditivamente bajo carga compleja. Finalmente, 52 estudios fueron incluidos en la revisión sistemática, constituyendo la base analítica para la síntesis temática y el análisis bibliométrico.

1) Evolución temporal de las publicaciones

La producción científica sobre materiales compuestos fabricados aditivamente (AMCs) ha mostrado un crecimiento sostenido en la última década, con un incremento notable a partir de 2018, coincidiendo con la madurez de las tecnologías de impresión 3D de fibras continuas y con el auge de los estudios sobre criterios de falla multiaxial. El pico de publicaciones se observa en el periodo 2021–2023, lo cual evidencia un interés creciente en la comunidad científica por abordar el desempeño estructural de AMCs en condiciones complejas de carga (Figura 4).

2) Distribución geográfica e institucional

El análisis de afiliaciones revela que los países con mayor contribución son China, Estados Unidos y países de la Unión Europea (particularmente Alemania y España), reflejando la fuerte inversión en investigación aplicada a sectores aeroespacial y automotriz. En América Latina, destacan aportes recientes de Brasil y Colombia, con estudios experimentales en ensayos biaxiales y desarrollos en manufactura aditiva reforzada con fibras naturales (Figura 5).

3) Revistas y autores más influyentes

Las publicaciones se concentran en revistas Q1 como *Composites Part B*, *Composite Structures*, *Additive Manufacturing*, *Materials & Design* y *Journal of Composites Science*, lo que confirma la pertinencia y visibilidad del tema en foros de alto impacto. Autores como Dutra, Post, Mu y Gljušić aparecen recurrentemente en los trabajos más citados, aportando tanto desde enfoques experimentales como de modelado multiescala.

4) Análisis de co-ocurrencia de palabras clave

El mapa de co-ocurrencia de términos (Figura 3), generado con la herramienta VOSviewer, permitió identificar cuatro

interna del material [20], [21].
Entre las tecnologías más utilizadas se encuentra el modelado

materiales estructurales convencionales, aunque con una alta dependencia de la fracción volumétrica de fibra y su orientación

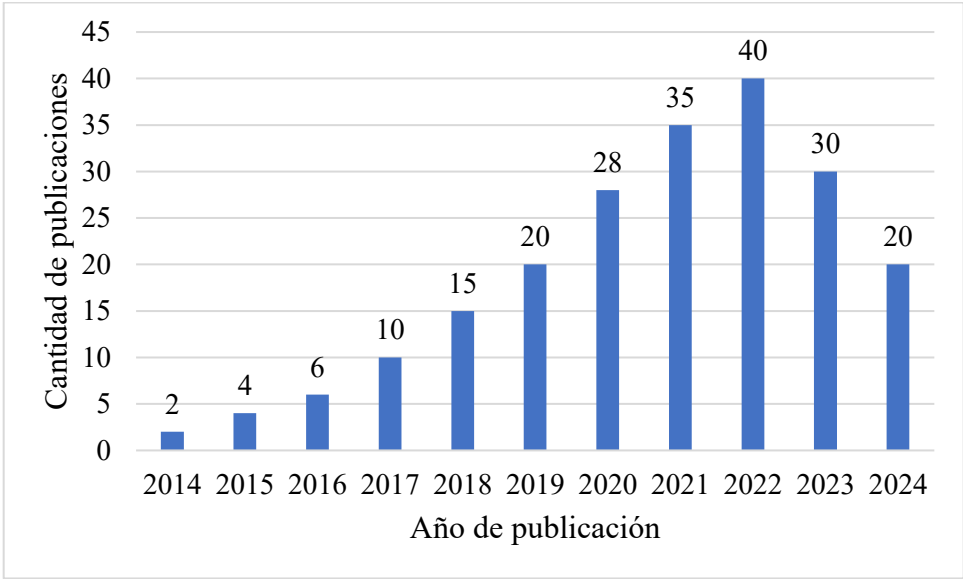


Figura 4. Evolución temporal de publicaciones científicas sobre AMCs bajo carga biaxial (2014–2025; búsqueda cerrada en agosto de 2025). (Fuente: elaboración propia).

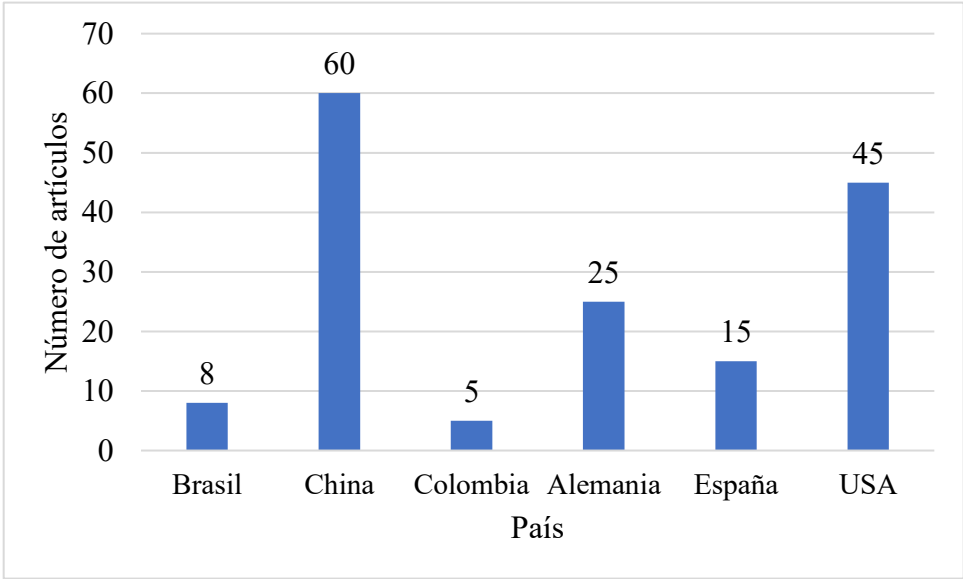


Figura 5. Distribución geográfica de producción de artículos (Fuente: elaboración propia).

por deposición fundida (FDM/FFF), ampliamente empleado por su bajo costo y facilidad de implementación (Figura 6). Sin embargo, este proceso presenta limitaciones importantes asociadas a la formación capa a capa, tales como la presencia de porosidad, interfaces débiles y variabilidad en la calidad de unión interlaminar, lo que afecta significativamente las propiedades mecánicas de los componentes fabricados [22].
Con el fin de superar estas limitaciones, se han desarrollado tecnologías de refuerzo con fibra continua, las cuales han demostrado mejoras significativas en propiedades como módulo elástico y resistencia a tracción. Estudios experimentales han evidenciado que la incorporación de fibras continuas permite alcanzar valores de rigidez comparables a

[21], [23]. No obstante, la presencia de defectos inducidos por el proceso de fabricación continúa siendo un factor crítico en la respuesta mecánica de estos materiales (Figura 7).
Revisiones recientes sobre compuestos de carbono fabricados aditivamente destacan que la incorporación de fibra de carbono permite desplazar la AM desde aplicaciones de prototipado hacia piezas funcionales y estructurales; sin embargo, persisten retos asociados a la calidad interfacial fibra–matriz, la anisotropía inducida por impresión y la variabilidad de propiedades mecánicas [24].

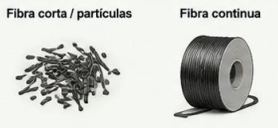
TECNOLOGÍAS DE AM	MATRIZ POLIMÉRICA	TIPOS DE REFUERZO	CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES
1. FDM / FFF <i>Fused Deposition Modeling</i> 	- PLA - ABS - Nylon - PETG - PEEK - Onyx (nylon + CF)	Fibra corta / partículas Fibra continua  Contenido de refuerzo: bajo – medio	- Tecnología más utilizada en AM de compuestos - Costo relativamente bajo - Fácil acceso y operación - Adecuada para piezas de tamaño pequeño a mediano  Prototipos funcionales, componentes estructurales no críticos
2. CFF <i>Co-continuous Fused Filament Fabrication</i> 	- Nylon (PA6/PA12) - Onyx (nylon + CF) - PEEK - PEKK	Fibra continua (tows / filamentos)  Contenido de refuerzo: alto	- Refuerzo continuo → alta rigidez y resistencia - Mejor desempeño mecánico - Desafíos: impregnación, curvaturas y trayectoria - Adecuada para piezas estructurales  Componentes ligeros de alta resistencia (aeroespacial, automotriz, deporte)
3. SLS / MJF <i>Selective Laser Sintering / Multi Jet Fusion</i> 	- PA12 (nylon 12) - TPU - PP	Partículas / fibra corta  Contenido de refuerzo: bajo – medio	- Buenas propiedades isotrópicas - Geometrías complejas sin soportes - Limitado por la longitud de fibra - Adecuado para series pequeñas  Piezas funcionales complejas, prototipos, utilajes
4. SLA / DLP <i>Stereolithography / Digital Light Processing</i> 	- Resinas epóxicas - Resinas acrílicas - Resinas fotopoliméricas reforzadas	Partículas / fibra corta  Contenido de refuerzo: bajo	- Alta resolución y acabado superficial - Refuerzos limitados por la viscosidad de la resina - Ideal para prototipos y componentes funcionales de precisión  Prototipos de alta precisión, componentes funcionales especializados
PLA: ácido poliláctico ABS: acrilonitrilo butadieno estireno PETG: tereftalato de polietileno glicol CF: fibra de carbono GF: fibra de vidrio TPU: poliuretano termoplástico PP: polipropileno PA: poliamida (nylon) PEEK / PEKK: polímeros de alto desempeño			

Figura 6. Tecnologías de manufactura aditiva y tipos de refuerzo empleados en compuestos poliméricos (Fuente: elaboración propia).

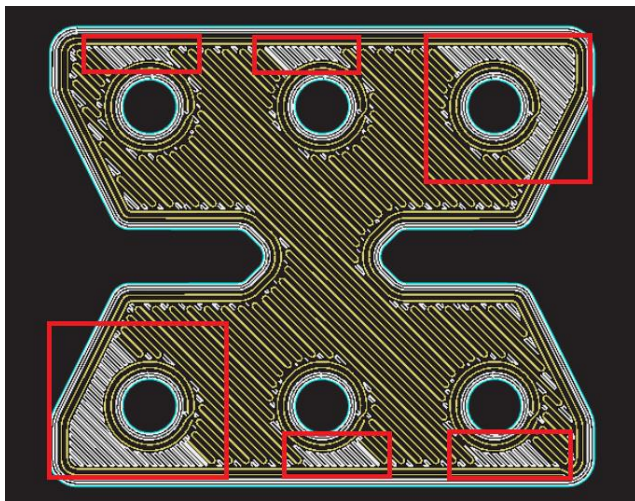


Figura 7. Defectos típicos inducidos durante la manufactura aditiva de materiales compuestos y su influencia potencial sobre la respuesta mecánica (Fuente: elaboración propia).

A pesar de los avances en manufactura aditiva, el comportamiento mecánico de los compuestos reforzados continúa siendo altamente dependiente de los parámetros de proceso, tales como la arquitectura de deposición, la fracción volumétrica de fibra y las condiciones de impresión, lo que introduce una variabilidad significativa en las propiedades finales del material [21], [25]. Además, factores como la orientación de las fibras y su distribución espacial influyen

directamente en la resistencia y rigidez del material, evidenciando la necesidad de caracterizaciones específicas para cada configuración de fabricación [26]. Estas limitaciones evidencian que, aunque la manufactura aditiva permite una alta flexibilidad geométrica, la predicción del comportamiento mecánico sigue siendo un desafío debido a la compleja interacción entre proceso, microestructura y respuesta estructural [27].

En los compuestos fabricados por FFF/CFF, la orientación de las fibras no solo modifica la rigidez y la resistencia global, sino también los modos de falla. Estudios recientes muestran que la resistencia de unión y la respuesta frente a concentraciones de esfuerzo pueden variar de forma significativa con la orientación de fibra, incluso mostrando tendencias distintas a las observadas en compuestos convencionales debido a vacíos, superficies curvas y discontinuidades inducidas por el proceso de impresión [28]. Esta dependencia confirma que la manufactura aditiva no debe analizarse únicamente como una tecnología de fabricación, sino como un proceso que define la arquitectura mecánica interna del material [29].

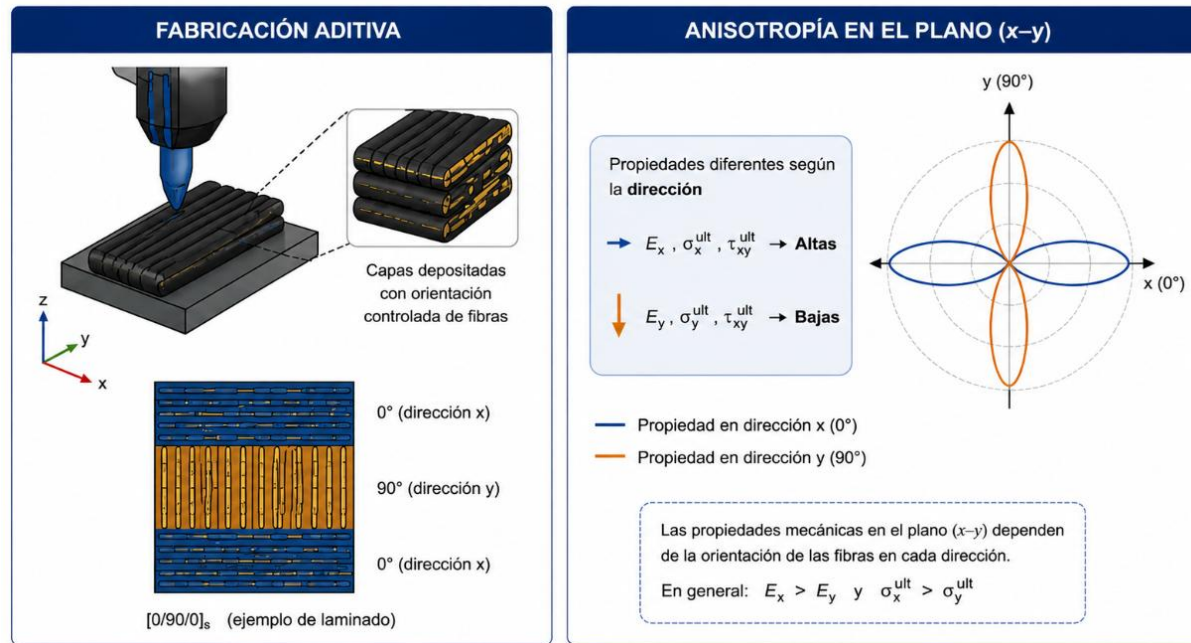


Figura 8. Representación general de la anisotropía en el plano (x-y) de un compuesto fabricado aditivamente (Fuente: elaboración propia).

La calidad mecánica de los compuestos fabricados aditivamente depende de forma directa de defectos inducidos por el proceso, como vacíos, mala impregnación, desalineación y rotura de fibras. Estudios recientes han mostrado que durante la impresión FFF de compuestos reforzados con fibra corta se generan variaciones en la orientación de fibra, fracción de vacíos y longitud efectiva de refuerzo, lo que condiciona la respuesta mecánica final del material [30]. De forma similar, en compuestos con fibra continua se ha evidenciado que radios de curvatura reducidos y cambios bruscos de trayectoria pueden incrementar la desalineación, el plegamiento y la rotura de fibras durante la deposición [31].

2) Comportamiento mecánico anisotrópico y multiaxial

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos está fuertemente condicionado por su naturaleza anisotrópica, la cual depende de la orientación de las fibras, la secuencia de apilamiento y la interacción entre matriz y refuerzo. En el caso de los AMCs, esta anisotropía se ve amplificada por la arquitectura generada durante el proceso de manufactura, lo que conduce a una respuesta altamente dependiente del estado de carga [20]. La orientación de fibra es un parámetro crítico en compuestos impresos con refuerzo continuo: la respuesta depende de la arquitectura de deposición, la fracción de refuerzo y la configuración de apilamiento. En consecuencia, los resultados uniaxiales no deben extrapolarse a estados multiaxiales sin una validación específica.

Si bien la mayoría de los estudios se han enfocado en condiciones de carga uniaxial, en aplicaciones reales los componentes están sometidos a estados de carga multiaxiales, donde la interacción entre esfuerzos normales y cortantes gobierna los mecanismos de deformación y falla [32]. Investigaciones experimentales han demostrado que la

respuesta del material varía significativamente con el estado de carga (Figura 8), observándose diferentes mecanismos de daño bajo condiciones combinadas de tracción y corte, en particular, la evolución de la fractura en polímeros y compuestos bajo estados multiaxiales ha sido asociada a fenómenos como cavitación, formación de vacíos y redistribución de tensiones, evidenciando que múltiples mecanismos pueden coexistir dependiendo del estado tensional aplicado [33]. Esto pone de manifiesto la necesidad de analizar el comportamiento mecánico en términos de variables que representen adecuadamente la interacción entre diferentes componentes de esfuerzo.

Adicionalmente, el comportamiento mecánico de los compuestos fabricados aditivamente está influenciado no solo por la anisotropía inherente del material, sino también por la heterogeneidad introducida durante el proceso de fabricación, lo que puede generar concentraciones de esfuerzo y mecanismos de falla localizados, tales como delaminación, rotura de fibra y separación fibra-matriz [20].

En este contexto, la caracterización bajo condiciones multiaxiales resulta fundamental, ya que diferentes combinaciones de esfuerzos pueden activar mecanismos de daño distintos, cuya interacción no puede ser adecuadamente capturada mediante análisis uniaxiales tradicionales [34]. Bajo estados multiaxiales, la respuesta del compuesto depende de la interacción entre esfuerzos normales, cortantes y mecanismos de daño locales. La literatura reciente sobre modelos micromecánicos indica que la predicción de falla en polímeros reforzados con fibra sigue siendo un desafío debido a la

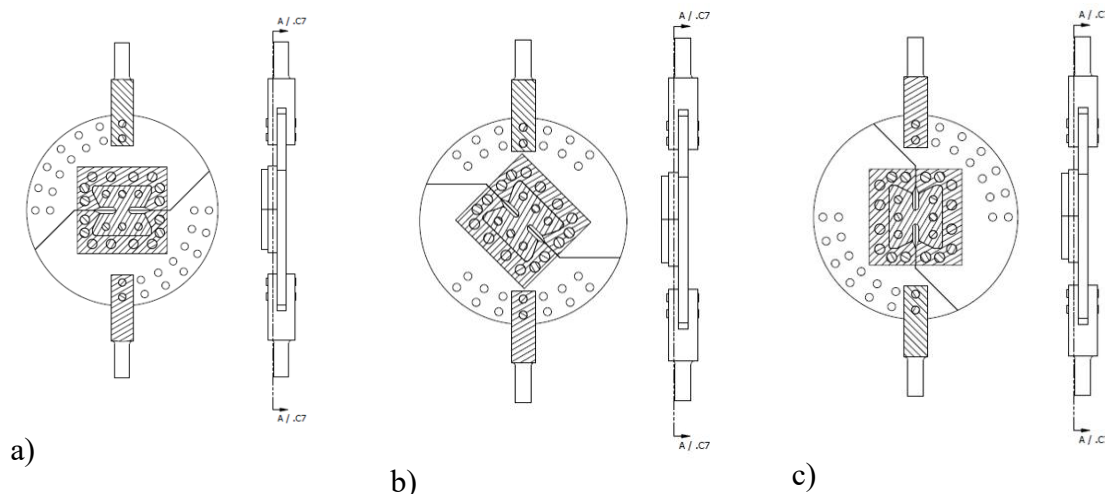


Figura 9. Configuración experimental de probetas tipo Arcan para 0°, 45° y 90° (Fuente: elaboración propia).

coexistencia de rotura de fibra, agrietamiento de matriz, despegue fibra-matriz y delaminación, especialmente bajo condiciones de carga multiaxial [35]. Esto justifica la necesidad de interpretar la respuesta del laminado mediante componentes locales de esfuerzo, como σ_{11} y τ_{12} , en lugar de limitarse a métricas globales.

3) Ensayos biaxiales y limitaciones experimentales

La caracterización experimental bajo carga biaxial se ha abordado mediante diferentes configuraciones, incluyendo probetas cruciformes, ensayos fuera de eje (off-axis) y dispositivos tipo Arcan. Estos métodos buscan generar estados de esfuerzo controlados que permitan estudiar la interacción entre tracción y corte en materiales compuestos.

El dispositivo Arcan, en particular, ha sido ampliamente utilizado debido a su capacidad para generar una familia continua de estados de carga mediante la variación del ángulo de aplicación (Figura 9). Desde su desarrollo inicial, diversas modificaciones han permitido mejorar la medición de propiedades bajo cargas combinadas, facilitando la obtención de curvas tensión-deformación en condiciones de carga multiaxial [36].

Los dispositivos Arcan y sus variantes permiten estudiar combinaciones controladas de esfuerzo normal y cortante. En un antecedente transferido desde compuestos convencionales, datos obtenidos con una configuración Arcan modificada se emplearon para entrenar un modelo constitutivo multiaxial basado en redes neuronales [37]. Otros trabajos muestran que estas configuraciones pueden apoyar la construcción de envolventes normal-cortante en laminados y uniones compuestas [38], y la determinación de constantes elásticas y parámetros de resistencia bajo cortante puro o carga combinada [39].

No obstante, la caracterización del comportamiento en corte puro continúa siendo un problema abierto. Diferentes técnicas experimentales han sido propuestas, incluyendo ensayos cruciformes y off-axis, pero ninguna ha logrado establecer un método universalmente aceptado para la determinación precisa

de propiedades cortantes en materiales compuestos [40]. Además, muchos estudios se limitan a la obtención de respuestas globales sin profundizar en la distribución local de tensiones, lo que restringe la comprensión de los mecanismos de falla a nivel de lámina crítica. La caracterización experimental bajo modos mixtos (I/II) ha sido ampliamente estudiada mediante dispositivos modificados que buscan reproducir condiciones de carga más realistas. Sin embargo, se ha evidenciado que incluso en configuraciones tipo Arcan pueden presentarse contribuciones indeseadas de modos adicionales de carga, lo que introduce incertidumbre en la interpretación de los resultados experimentales [41].

A pesar de su utilidad, los ensayos biaxiales presentan desafíos asociados a la concentración de esfuerzos, la definición de la zona útil de medición y la interpretación de los campos locales. Por ello, varios estudios combinan experimentación con simulación numérica para identificar zonas críticas y validar la distribución real de esfuerzos en la probeta. Esta tendencia respalda el uso de FEM como herramienta complementaria para interpretar la respuesta de probetas tipo Arcan y para extraer variables locales físicamente significativas.

La evidencia transferida desde compuestos convencionales indica que la geometría de la probeta, el sistema de medición y la validación numérica condicionan la representatividad de los ensayos biaxiales. En configuraciones tipo Arcan, estudios con compuestos bio-basálticos entallados muestran que el ángulo de carga modifica la transición entre tracción-corte y corte dominante, con acumulación de daño asociada a la deformación cortante [42]. La extrapolación de estos resultados a materiales fabricados aditivamente requiere verificación experimental específica.



Figura 10. Montaje experimental de probetas tipo Arcan (Fuente: elaboración propia).

4) Modelado numérico y enfoques multiescala

El método de los elementos finitos (FEM) se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis del comportamiento mecánico de materiales compuestos bajo condiciones complejas de carga. En particular, permite evaluar la distribución de tensiones, identificar zonas críticas y analizar

la evolución del daño en estructuras laminadas. En los últimos años, se han desarrollado enfoques multiescala que integran modelos micromecánicos con simulaciones a nivel estructural (Figura 11), permitiendo capturar la interacción entre microestructura y respuesta macroscópica. Modelos como el High Fidelity Generalized Method of Cells (HFGMC) han sido utilizados para representar explícitamente la interacción entre fibra y matriz, así como la evolución del daño en laminados compuestos [43].

El modelado multiescala conecta la arquitectura microscópica con la respuesta estructural. Los métodos de homogeneización permiten estimar propiedades elásticas efectivas considerando fibras, matriz e interfaces imperfectas y muestran la influencia de la calidad interfacial [44]. No obstante, la aplicación de RVE con interfaces cohesivas, distribuciones complejas de orientación y defectos inducidos por impresión debe sustentarse con referencias específicas y con validación frente a observaciones experimentales [45].

Estos enfoques permiten generar envolventes de falla y predecir el comportamiento del material bajo diferentes estados de carga. Sin embargo, la mayoría de los modelos se enfocan en criterios globales de falla, sin abordar explícitamente la descomposición del estado tensional en componentes físicas representativas bajo condiciones biaxiales. En los últimos años, los enfoques tradicionales de modelado han sido complementados con técnicas basadas en aprendizaje automático, las cuales permiten predecir el comportamiento mecánico y la falla de materiales fabricados aditivamente a partir de grandes volúmenes de datos experimentales y numéricos [46], [47].

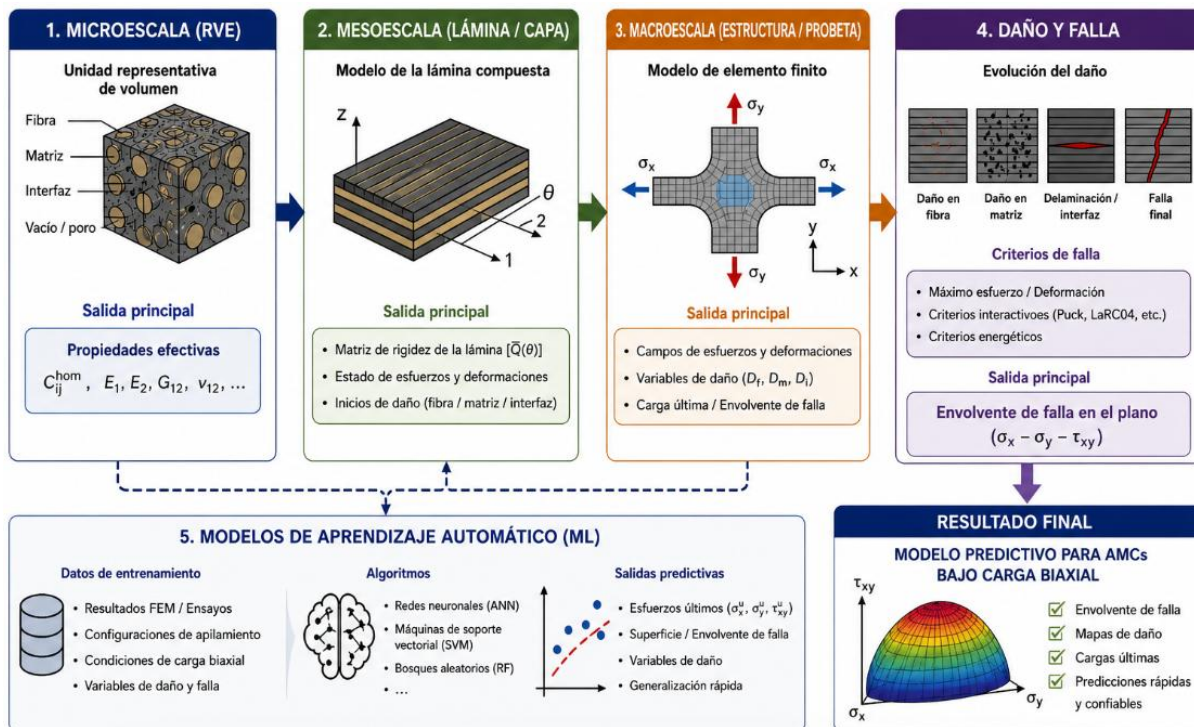


Figura 11. Flujo de modelado multiescala y predictivo para AMCs bajo carga biaxial (Fuente: elaboración propia).

No obstante, estos modelos suelen carecer de interpretabilidad física, lo que limita su capacidad para explicar los mecanismos fundamentales de daño, particularmente bajo estados de carga biaxiales. De forma paralela, los modelos micromecánicos de falla progresiva han permitido representar mecanismos como rotura de fibra, daño de matriz, despegue fibra-matriz y delaminación. Sin embargo, las revisiones recientes coinciden en que la predicción de falla bajo carga multiaxial continúa siendo un problema abierto debido a la interacción entre modos de daño y a la dificultad de validar experimentalmente los modelos en estados de carga complejos [35].

Los enfoques recientes combinan micromecánica computacional, ensayos virtuales y aprendizaje automático para mejorar la predicción de falla en compuestos bajo carga biaxial. Wan et al. propusieron un enfoque basado en RVE, redes neuronales artificiales y cuantificación de incertidumbre para predecir la falla de compuestos unidireccionales CFRP bajo combinaciones biaxiales, obteniendo alto desempeño en problemas de regresión y clasificación de falla [35]. De forma complementaria, otros estudios han empleado modelos RVE de alta fidelidad para comparar criterios como Tsai-Wu y Hashin bajo estados dominados por esfuerzo transversal y cortante, mostrando que la transición de modos de falla depende fuertemente del estado tensional aplicado [48].

En términos críticos, la evidencia numérica es heterogénea: no todos los estudios documentan independencia de malla, condiciones de frontera y contacto, rutas de carga, verificación del código, validación experimental o sensibilidad a parámetros materiales. Sin estas comprobaciones, la concordancia entre curvas o envolventes puede deberse a calibración y no a capacidad predictiva. Los futuros modelos FEM deberían reportar sistemáticamente convergencia, métricas cuantitativas de validación e incertidumbre de parámetros.

5) Criterios de falla y representación en el espacio de esfuerzos

La predicción de la falla en materiales compuestos ha sido tradicionalmente abordada mediante criterios como Tsai-Hill, Tsai-Wu y modelos basados en mecanismos físicos como el criterio de Puck. Estos enfoques permiten estimar la resistencia del material bajo diferentes combinaciones de carga y generar envolventes de falla en el espacio de esfuerzos (Figura 12).

La evaluación de criterios de falla mediante modelos micromecánicos computacionales ha mostrado que las envolventes de falla de compuestos unidireccionales no siempre son capturadas adecuadamente por criterios clásicos, debido a la dependencia del mecanismo dominante respecto al estado tensional aplicado [49]. En consecuencia, la representación de la falla en espacios de esfuerzo biaxiales sigue siendo una herramienta necesaria para identificar la interacción entre esfuerzos normales y cortantes y para evaluar la validez de los criterios de falla disponibles.

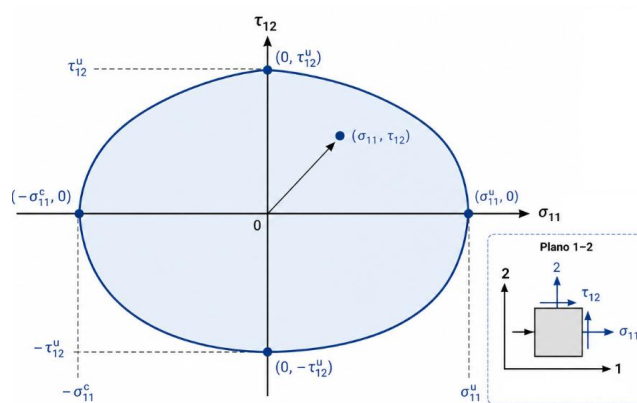


Figura 12. Ejemplo de envolvente de falla sobre el plano de esfuerzos (Fuente: elaboración propia).

Estudios recientes han demostrado la importancia de construir envolventes σ - τ para describir la interacción entre esfuerzos normales y cortantes, especialmente en aplicaciones donde los materiales están sometidos a cargas complejas [50]. En este contexto, el uso de dispositivos tipo Arcan ha permitido generar datos experimentales para la construcción de dichas envolventes. No obstante, muchos de estos criterios asumen condiciones de homogeneidad o isotropía efectiva, lo cual no es consistente con la naturaleza altamente anisotrópica de los AMC. Adicionalmente, el uso de esfuerzos equivalentes limita la interpretación física de los mecanismos de falla.

La predicción de falla en materiales compuestos es compleja por la interacción entre rotura de fibras, agrietamiento de matriz, daño interfacial y delaminación [51]. Para laminados fabricados aditivamente, el plano σ_{11} - τ_{12} podría facilitar una interpretación local de la contribución de fibra, matriz e interfaces; sin embargo, su superioridad frente a otras representaciones o criterios constituye una hipótesis que debe contrastarse mediante datos biaxiales independientes.

La generación de envolventes mediante ensayos virtuales puede reducir, pero no sustituir, la necesidad de campañas experimentales. Wan et al. [52] combinaron ensayos con un dispositivo Arcan modificado y un RVE de alta fidelidad para estudiar la respuesta multiaxial de CFRP. Este antecedente directo respalda el uso de espacios de esfuerzo físicamente interpretables, aunque su transferencia a compuestos fabricados aditivamente exige considerar defectos, arquitectura de impresión y validación específica.

A partir de los estudios revisados, se identificaron varios enfoques experimentales, numéricos y computacionales empleados para analizar el comportamiento de los materiales compuestos fabricados aditivamente bajo condiciones de carga biaxial. La Tabla I resume estos métodos, su utilidad y las principales limitaciones señaladas en la literatura.

TABLA I. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EXPERIMENTALES, NUMÉRICOS Y COMPUTACIONALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS ADITIVAMENTE BAJO CARGA BIAxIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).

Método o enfoque	Aplicación	Utilidad identificada	Limitaciones señaladas
Dispositivo Arcan y variantes	Generación de combinaciones controladas de esfuerzo normal y cortante; obtención de curvas tensión-deformación y envolventes de falla [36]–[39], [41], [42], [52]	Caracterizar la respuesta biaxial y estudiar la transición entre tracción y corte	Concentraciones de esfuerzo, contribuciones no deseadas de otros modos de carga y necesidad de validación numérica
Probetas cruciformes y ensayos <i>off-axis</i>	Evaluación de estados combinados de carga y propiedades de corte [40]	Comparar diferentes configuraciones experimentales	No existe un procedimiento universalmente aceptado para determinar con precisión las propiedades cortantes
Método de los elementos finitos (FEM)	Distribución de tensiones, identificación de zonas críticas y evolución del daño [8]–[14], [43]–[47]	Complementar los ensayos e interpretar variables locales de esfuerzo	Algunos estudios no documentan independencia de malla, condiciones de frontera, verificación, validación o sensibilidad paramétrica
Modelos micromecánicos, RVE y multiescala	Relación entre fibra, matriz, interfaces, microestructura y respuesta macroscópica [18], [35], [43], [44], [48], [52]	Estimar propiedades efectivas y representar mecanismos de daño	Requieren validación experimental específica y una representación adecuada de defectos y arquitectura de impresión
Criterios de falla	Aplicación de Tsai–Hill, Tsai–Wu, Hashin, Puck y otros criterios basados en mecanismos [19], [49], [50]	Construir envolventes de falla y analizar la interacción entre esfuerzos normales y cortantes	Los criterios clásicos pueden no representar adecuadamente la anisotropía, la porosidad y los defectos de los AMC's
Aprendizaje automático e inteligencia artificial	Predicción de propiedades mecánicas, curvas tensión-deformación y modos de falla [12]–[14], [37], [46], [47]	Identificar relaciones complejas y apoyar la predicción del comportamiento	Dependencia de bases de datos suficientes y limitaciones de interpretabilidad física
Correlación digital de imágenes y mediciones de campo completo	Caracterización de deformaciones y daño durante los ensayos [9], [51]	Obtener información espacial sobre la respuesta local del material	Su utilidad depende de la configuración experimental y de la adecuada validación de las mediciones

La comparación muestra que ningún método proporciona por sí solo una caracterización completa del comportamiento biaxial de los AMC's. Los resultados experimentales proporcionan evidencia directa para caracterizar la interacción entre los esfuerzos normales y cortantes, comparar configuraciones de probeta y establecer datos para la calibración de modelos. Los modelos de elementos finitos y los enfoques multiescala permiten identificar distribuciones locales de tensión, zonas críticas y mecanismos de daño que no siempre pueden observarse directamente durante los ensayos. Los criterios de falla son útiles para construir y comparar envolventes de resistencia, aunque requieren calibración específica para los materiales compuestos fabricados aditivamente. Por su parte, los métodos de aprendizaje automático pueden apoyar la predicción de propiedades y modos de falla, pero su utilidad depende de la disponibilidad de bases de datos trazables y suficientemente representativas. En conjunto, estos resultados sirven para orientar la selección de ensayos, mejorar la validación de modelos y definir prioridades de investigación; sin embargo, no permiten establecer todavía un método universal ni transferir directamente las conclusiones a componentes estructurales sin validación adicional.

III. DISCUSIÓN

A. Brechas y agenda de investigación

A partir del análisis de la literatura, se identifican varias brechas relevantes en el estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos fabricados aditivamente bajo carga biaxial. En primer lugar, existe una falta de integración entre

estudios experimentales y numéricos que permitan caracterizar de manera consistente los estados de carga multiaxiales. En segundo lugar, se evidencia la ausencia de marcos de análisis basados en variables físicas representativas del estado tensional a nivel de lámina, lo que limita la interpretación de los mecanismos de falla y la comparación entre diferentes configuraciones de material (Tabla II).

A pesar de los avances en la caracterización experimental, modelado numérico y criterios de falla, persiste una brecha significativa en la comprensión del comportamiento de materiales compuestos fabricados aditivamente bajo estados de carga biaxiales. En conjunto, la literatura evidencia avances significativos en manufactura aditiva de compuestos, caracterización multiaxial, modelado micromecánico, ensayos virtuales y aprendizaje automático. Sin embargo, persiste una brecha importante: aún son escasos los trabajos que conectan de manera explícita la arquitectura de impresión, los defectos inducidos por manufactura, la respuesta local de la lámina y la construcción de envolventes de falla bajo carga biaxial (Figura 13).

Una oportunidad científica consiste en evaluar si las componentes locales σ_{11} y τ_{12} , medidas en la lámina crítica, permiten relacionar la respuesta global con mecanismos locales de daño. Esta propuesta se formula como hipótesis y agenda de

TABLA II. COMPARACIÓN ENTRE COMPUESTOS TRADICIONALES (CFRPS) Y COMPUESTOS FABRICADOS ADITIVAMENTE (AMCS). (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).			
Aspecto	CFRPs tradicionales	AMCs	Implicaciones bajo cargas biaxiales
Proceso de fabricación	Moldeo por autoclave, infusión de resina, RTM, laminación manual.	Impresión 3D (FDM, CFF, LPBF) con deposición capa a capa.	Mayor variabilidad microestructural en AMCs afecta reproducibilidad en cargas combinadas.
Microestructura	Laminados uniformes con baja porosidad y alineación controlada de fibras.	Alta porosidad, interfaces débiles y orientación de fibras dependiente de la ruta de impresión.	Anisotropía acentuada en AMCs condiciona su respuesta biaxial.
Propiedades mecánicas	Alta resistencia y rigidez específicas, bien caracterizadas en literatura.	Menor resistencia transversal y menor homogeneidad.	Mayor sensibilidad al modo de carga y a la interacción tracción-corte.
Criterios de falla aplicados	Hashin, Puck, Tsai-Wu validados experimentalmente.	Adaptaciones necesarias para capturar defectos de impresión y variabilidad local.	Necesidad de criterios específicos y calibrados para AMCs.
Aplicaciones típicas	Aeronáutica, automoción, energía eólica, defensa.	Aún en fase de validación, aplicaciones en prototipado y piezas personalizadas.	Escalado hacia aplicaciones estructurales requiere mayor estandarización en ensayos biaxiales.

validación, no como una superioridad ya demostrada frente a criterios clásicos.

B. Síntesis y prioridades de investigación

La evidencia disponible sugiere una transición hacia enfoques híbridos que combinan experimentación, simulación multiescala y aprendizaje automático. Su madurez, sin embargo, está limitada por la falta de protocolos comparables, datos abiertos y validación independiente.

La síntesis anterior permite ordenar las oportunidades de

investigación en las siguientes prioridades:

1) *Estandarización de ensayos biaxiales*

En la actualidad no existe un protocolo estandarizado para la evaluación biaxial de materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva (AMCs). Aunque se han empleado ensayos como el dispositivo Arcan y los especímenes cruciformes con diversas adaptaciones experimentales, la ausencia de procedimientos uniformes dificulta la comparabilidad de los resultados y limita la consolidación de criterios de referencia en el ámbito científico y técnico. Esta situación representa una oportunidad para el desarrollo de

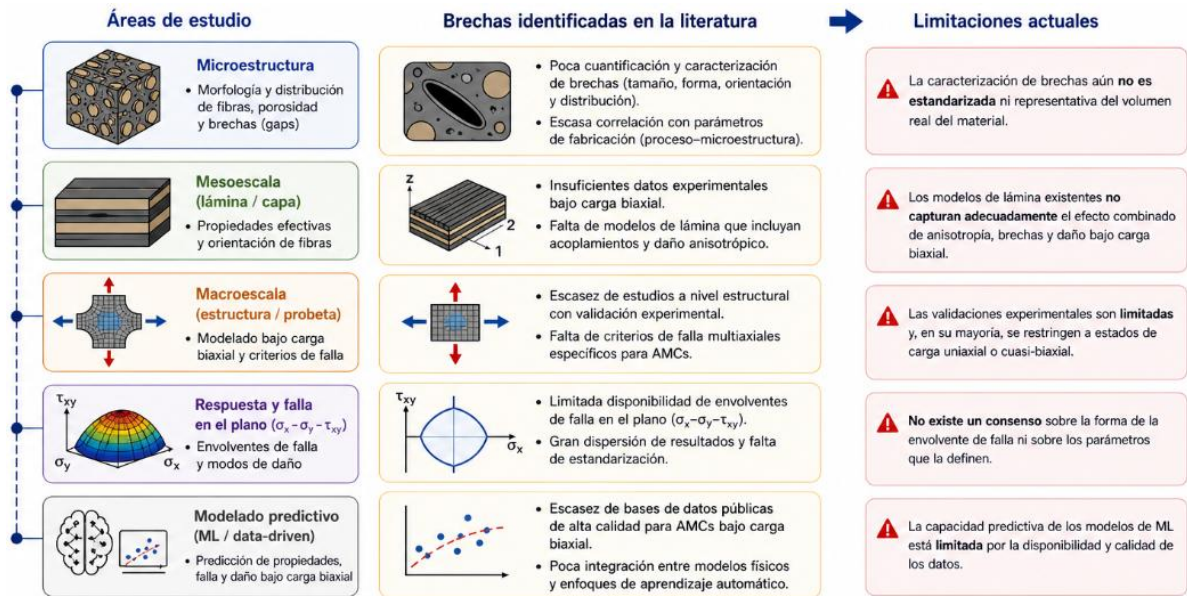


Figura 13. Brechas en la literatura y limitaciones actuales en el modelado de AMCs bajo carga biaxial (Fuente: elaboración propia).

normas experimentales, tanto a nivel ASTM como ISO, específicamente orientadas a los AMCs bajo condiciones de carga multiaxial, que integren parámetros de impresión, geometrías de prueba y métricas de daño de manera coherente y reproducible.

2) *Modelos constitutivos específicos para AMCs*

Los criterios de Hashin, Tsai–Wu y Puck no deben descartarse de forma general: su desempeño depende del material, la calibración, el estado tensional y el mecanismo dominante. Se requieren comparaciones cuantitativas frente a datos biaxiales de AMCs y modelos que incorporen, cuando sea necesario, porosidad, interfaces y arquitectura de impresión.

3) *Influencia de factores ambientales*

Existe aún una limitada cantidad de estudios que integren los efectos higrotérmicos, el envejecimiento y la fatiga ambiental en la caracterización biaxial de materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva. Esta carencia representa una oportunidad relevante para el desarrollo de investigaciones sistemáticas que combinen la aplicación de cargas multiaxiales con condiciones ambientales controladas, lo cual resulta esencial para optimizar el desempeño de estos materiales en sectores altamente exigentes como el aeronáutico, el automotriz y el marino.

4) *Limitada disponibilidad de bases de datos abiertas*

El uso de técnicas de inteligencia artificial en el análisis y modelado del comportamiento de materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva se ha visto limitado por la falta de bases de datos robustas, coherentes y estandarizadas. Esta restricción plantea una oportunidad significativa para el desarrollo de repositorios abiertos que reúnan propiedades mecánicas de AMCs evaluados bajo distintos estados de carga, con el fin de facilitar el entrenamiento de modelos predictivos reproducibles y confiables, capaces de apoyar el diseño y la optimización de estos materiales en entornos de ingeniería avanzada.

5) *Escalabilidad hacia aplicaciones reales*

La mayoría de los estudios identificados se han concentrado en el análisis de probetas o configuraciones de laboratorio, limitando la comprensión del comportamiento de los materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva en condiciones de aplicación real. Esta situación abre una oportunidad importante para el desarrollo de investigaciones aplicadas que aborden componentes estructurales funcionales, como uniones híbridas, conectores, piezas aeronáuticas o dispositivos biomédicos, con el fin de validar la transición desde los resultados obtenidos en laboratorio hacia la ingeniería aplicada y el uso industrial de estos materiales.

6) *Integración de enfoques híbridos*

Aunque comienzan a surgir investigaciones que combinan el modelado multiescala, los ensayos avanzados y las técnicas de aprendizaje automático, estos estudios siguen siendo limitados y se desarrollan de manera aislada. Esta situación evidencia la necesidad de avanzar hacia el diseño de marcos predictivos unificados, en los que la simulación física, los datos experimentales y la inteligencia artificial actúen de forma sinérgica para el desarrollo y validación de materiales compuestos fabricados aditivamente (AMCs) de próxima

generación. En conjunto, estos vacíos reflejan que el campo aún se encuentra en una fase de consolidación metodológica y tecnológica. El futuro de la investigación deberá orientarse hacia la creación de protocolos normalizados, modelos predictivos robustos y aplicaciones a gran escala, con el objetivo de garantizar la fiabilidad y el desempeño de los AMCs en entornos de servicio multiaxiales y altamente exigentes.

En conjunto, estas brechas deben interpretarse considerando las limitaciones de la presente revisión. No se realizó una evaluación formal del riesgo de sesgo ni de la calidad metodológica de los estudios incluidos. Asimismo, la búsqueda finalizó en agosto de 2025, las cadenas generales podrían haber omitido terminología específica y no se dispuso de los archivos fuente necesarios para reproducir íntegramente los mapas bibliométricos. Finalmente, la heterogeneidad de materiales, probetas y métricas restringe la comparación cuantitativa; por tanto, las tendencias identificadas deben entenderse como evidencia descriptiva.

IV. CONCLUSIONES

La evidencia revisada confirma que la arquitectura de deposición, la orientación de fibra, la porosidad y la calidad interfacial condicionan la respuesta de los AMCs. No obstante, la caracterización biaxial sigue siendo escasa y heterogénea.

Los ensayos Arcan y cruciformes son opciones relevantes, pero requieren protocolos comparables, control de concentraciones de tensión y mediciones de campo completo. La validación numérica debe incluir independencia de malla, condiciones de frontera documentadas, sensibilidad paramétrica y contraste cuantitativo con experimentos.

Los modelos FEM, multiescala y de aprendizaje automático pueden complementar la experimentación, siempre que distingan calibración, verificación y validación y reporten incertidumbre y dominio de aplicabilidad.

La evidencia no demuestra todavía que una representación o criterio de falla sea universalmente superior. El plano local σ_{11} – τ_{12} constituye una hipótesis prometedora que debe evaluarse frente a criterios clásicos y datos biaxiales independientes.

Las prioridades son estandarizar ensayos, compartir datos trazables, validar modelos en condiciones no usadas para calibración e incorporar efectos ambientales y de escala. Estas acciones son necesarias antes de transferir los resultados a componentes estructurales.

En conjunto, el campo requiere integrar manufactura, microestructura, respuesta local y falla mediante estudios reproducibles que combinen experimentación y modelado con alcance claramente delimitado.

V. REFERENCIAS

- [1] P. P. Camanho, C. G. Dávila, S. T. Pinho, L. Iannucci, and P. Robinson, “Prediction of in situ strengths and matrix cracking in composites under transverse tension and in-plane shear,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 2, pp. 165–176, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.04.023.
- [2] G. Liu, Y. Xiong, and L. Zhou, “Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design

- opportunities and novel applications,” *Composites Communications*, vol. 27. Elsevier Ltd, Oct. 2021. doi: 10.1016/j.coco.2021.100907.
- [3] A. Le Duigou *et al.*, “Thermomechanical performance of continuous carbon fibre composite materials produced by a modified 3D printer,” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13581, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13581.
- [4] R. R. de Sousa Junior, J. R. Gouveia, N. M. Ito, and D. J. dos Santos, “Failure prediction of hybrid composite using Arcan’s device and Drucker-Prager model,” *Polym. Test.*, vol. 58, pp. 256–261, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.01.001.
- [5] A. D. Nugraha, D. Alandro, K. G. H. Mangunkusumo, M. Kusni, Y. C. Wu, and M. A. Muflikhun, “Failure configuration and evaluation of hybrid CFRP-GFRP laminates using innovative Arcan fixture: Experimental and simulation approach,” *Compos. Part C Open Access*, vol. 14, no. March, p. 100452, 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100452.
- [6] W. L. Mu, Q. H. Xu, J. Na, Y. Fan, Y. Sun, and Y. Liu, “Investigating the failure behavior of hygrothermally aged adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints using modified Arcan fixture,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 182, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110303.
- [7] M. Fakoor and N. M. Khansari, “A new approach for investigation of mode II fracture toughness in orthotropic materials,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 15, no. 3, 2018, doi: 10.1590/1679-78253979.
- [8] T. Silva *et al.*, “Numerical-experimental plastic-damage characterisation of additively manufactured 18ni300 maraging steel by means of multiaxial double-notched specimens,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 5, no. 3, 2021, doi: 10.3390/jmmp5030084.
- [9] J. Holmes, S. Sommacal, R. Das, Z. Stachurski, and P. Compston, “Digital image and volume correlation for deformation and damage characterisation of fibre-reinforced composites: A review,” *Compos. Struct.*, vol. 315, no. October 2022, p. 116994, 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116994.
- [10] M. S. Hassan, L. A. Chavez, C. Chien-Chun, S. E. Hall, T. Tzu-Liang, and Y. Lin, “Mechanical response of shape-recovering metamaterial structures fabricated by additive manufacturing,” *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 11, 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ac343f.
- [11] K. Ren, K. Li, Y. Lin, R. Chen, Z. Zhang, and J. Sun, “Experimental and numerical investigation on the shock characteristics of U-notched ZL205A specimens under dynamic mixed-mode loading,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 15, no. 11, pp. 1–15, 2018, doi: 10.1590/1679-78254862.
- [12] A. J. Thomas, E. Barocio, and R. B. Pipes, “A machine learning approach to determine the elastic properties of printed fiber-reinforced polymers,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 220, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compscitech.2022.109293.
- [13] M. Zhao, H. Wei, Y. Mao, C. Zhang, T. Liu, and W. Liao, “Predictions of Additive Manufacturing Process Parameters and Molten Pool Dimensions with a Physics-Informed Deep Learning Model,” *Engineering*, vol. 23, pp. 181–195, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.eng.2022.09.015.
- [14] Z. Zhang, Q. Liu, and D. Wu, “Predicting stress–strain curves using transfer learning: Knowledge transfer across polymer composites,” *Mater. Des.*, vol. 218, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110700.
- [15] S. M. F. Kabir, K. Mathur, and A. F. M. Seyam, “Maximizing the performance of 3d printed fiber-reinforced composites,” *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 5, May 2021, doi: 10.3390/jcs5050136.
- [16] T. Yu, Z. Zhang, S. Song, Y. Bai, and D. Wu, “Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites,” *Compos. Struct.*, vol. 225, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111147.
- [17] T. A. Dutra, R. T. L. Ferreira, H. B. Resende, B. J. Blinzler, and L. E. Asp, “Mechanism based failure of 3D-printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 213, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108962.
- [18] M. Gljušćić, D. Lanc, M. Franulović, and A. Žerovnik, “Microstructural Analysis of the Transverse and Shear Behavior of Additively Manufactured CFRP Composite RVEs Based on the Phase-Field Fracture Theory,” *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/jcs7010038.
- [19] T. A. Dutra, R. T. L. Ferreira, H. B. Resende, B. J. Blinzler, and R. Larsson, “Expanding puck and schurmann inter fiber fracture criterion for fiber reinforced thermoplastic 3D-printed composite materials,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13071653.
- [20] M. Mohammadizadeh, A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, “3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, p. 107112, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107112.
- [21] J. Naranjo-Lozada, H. Ahuett-Garza, P. Orta-Castañón, W. M. H. Verbeeten, and D. Sáiz-González, “Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 227–241, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.12.020.
- [22] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, “Investigation of dynamic elastic deformation of parts processed by fused deposition modeling additive manufacturing,” *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 3, pp. 227–238, Sep. 2016, doi: 10.14743/apem2016.3.223.
- [23] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, “Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures,” *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 866–875, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018.
- [24] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, “Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100962, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100962.
- [25] A. D. Pertuz, S. Díaz-Cardona, and O. A. González-Estrada, “Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique,” *Int. J. Fatigue*, vol. 130, p. 105275, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105275.

- [26] A. Parmiggiani, M. Prato, and M. Pizzorni, "Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication", doi: 10.1007/s00170-021-06997-5/Published.
- [27] J. S. León-Becerra, O. A. González-Estrada, and H. G. Sánchez-Acevedo, "Comparison of Models to Predict Mechanical Properties of FR-AM Composites and a Fractographical Study," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 3546, pp. 1–27, 2022, doi: 10.3390/polym14173546.
- [28] J. S. Oh, M. J. Oh, Z. Han, and H. S. Seo, "Effects of Fiber Orientation on the Bearing Strength of 3D-Printed Composite Materials Produced by Fused Filament Fabrication," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 24, 2024, doi: 10.3390/polym16243591.
- [29] J. S. León-Becerra, M. Á. Hidalgo-Salazar, J. P. Correa-Aguirre, O. A. González-Estrada, and A. D. Pertuz, "Additive manufacturing of short carbon filled fiber nylon: effect of build orientation on surface roughness and viscoelastic behavior," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 130, pp. 425–435, Nov. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12503-w.
- [30] H. Zhang, J. Chen, and D. Yang, "Fibre misalignment and breakage in 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermoplastic composites," *Addit. Manuf.*, vol. 38, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101775.
- [31] D. Yavas, Z. Zhang, Q. Liu, and D. Wu, "Interlaminar shear behavior of continuous and short carbon fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 204, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108460.
- [32] L. N. McCartney, "5 Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites 810," 2004.
- [33] J. P. Manaia, F. A. Pires, and A. M. P. de Jesus, "Elastoplastic and fracture behaviour of semi-crystalline polymers under multiaxial stress states," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 13, no. 47, pp. 82–103, 2019, doi: 10.3221/IGFESIS.47.08.
- [34] T. Rev, M. R. Wisnom, X. Xu, and G. Czél, "The effect of transverse compressive stresses on tensile failure of carbon fibre/epoxy composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 156, no. November 2021, 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.106894.
- [35] L. Wan, Y. Ismail, Y. Sheng, J. Ye, and D. Yang, "A review on micromechanical modelling of progressive failure in unidirectional fibre-reinforced composites," *Compos. Part C Open Access*, vol. 10, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100348.
- [36] Z. Ma, H. Zhao, H. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "Decomposition method based on a modified Arcan fixture and its application in an in situ combined load tester," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 12, Dec. 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/12/127001.
- [37] R. Haj-Ali and H. K. Kim, "Nonlinear constitutive models for FRP composites using artificial neural networks," *Mech. Mater.*, vol. 39, no. 12, pp. 1035–1042, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.mechmat.2007.05.004.
- [38] L. Sohier, J. Y. Cognard, and P. Davies, "Analysis of the mechanical behaviour of adhesively bonded assemblies of composites under tensile-shear out-of-plane loads," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 53, pp. 65–74, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.05.008.
- [39] P. Hao, I. U. Din, and S. Panier, "Development of Modified Arcan Fixture for biaxial loading response of fiber-reinforced composites," *Polym. Test.*, vol. 80, no. August, p. 106148, 2019, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106148.
- [40] J. C. Marín and A. Barroso, "Comparison of the shear behavior in graphite-epoxy composites evaluated by means of biaxial test and off-axis tension test," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 215–222, 2021, doi: 10.1515/secm-2021-0022.
- [41] D. A. Şerban *et al.*, "3D characterization of mixed-mode fracture toughness of materials using a new loading device," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 1464–1482, 2025, doi: 10.1590/1679-78252779.
- [42] Z. Bergant, R. Šturm, T. Kek, M. Halilović, and A. Maček, "The Effects of Loading Angles on the Failure of Cross-Ply Notched Bio-Basalt Composites," *Polym. Test.*, vol. 140, no. October, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108609.
- [43] E. Massarwa, J. Aboudi, and R. Haj-Ali, "A multiscale modeling for failure predictions of fiber reinforced composite laminates," *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107166.
- [44] W. Shu and I. Stanciulescu, "Multiscale homogenization method for the prediction of elastic properties of fiber-reinforced composites," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 203, pp. 249–263, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.08.009.
- [45] Y. Shu, X. Qiang, X. Jiang, Y. Xiao, and H. Dong, "Long-term performance of single-lap joints: Review, challenges and prospects in civil engineering," *Eng. Reports*, vol. 6, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1002/eng2.12769.
- [46] S. Nasiri and M. R. Khosravani, "Machine learning in predicting mechanical behavior of additively manufactured parts," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 14, pp. 1137–1153, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.004.
- [47] J. Qin *et al.*, "Research and application of machine learning for additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 52, Elsevier B.V., Apr. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102691.
- [48] L. Wan, Z. Ullah, D. Yang, and B. G. Falzon, "Comprehensive inter-fibre failure analysis and failure criteria comparison for composite materials using micromechanical modelling under biaxial loading," *J. Compos. Mater.*, vol. 57, no. 18, pp. 2919–2932, Aug. 2023, doi: 10.1177/00219983231176609.
- [49] Q. Sun *et al.*, "Failure criteria of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites informed by a computational micromechanics model," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 172, pp. 81–95, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.01.012.
- [50] I. Mititelu *et al.*, "Multi-Criteria Evaluation of the Failure of CFRP Laminates for Frames in the Automotive Industry," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2022, doi: 10.3390/polym14214507.
- [51] J. C. A. de Deus Filho, L. C. da Silva Nunes, and J. M. C. Xavier, "iCorrVision-2D: An integrated python-based open-source Digital Image Correlation software for in-plane

measurements (Part 1),” *SoftwareX*, vol. 19, p. 101131, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.softx.2022.101131.

[52] L. Wan, K. Zhang, J. Chen, A. Li, J. Wu, and D. Yang, “Experimental testing and micromechanical modelling of unidirectional CFRP composite laminae under multiaxial loading conditions,” *Compos. Struct.*, vol. 357, no. February, p. 118889, 2025, doi: 10.1016/j.compstruct.2025.118889.

David Fernando Santamaría-Maldonado es ingeniero mecánico y magíster en Ingeniería Mecánica por la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Su trabajo académico y de investigación se orienta a la caracterización, el modelado y la predicción del comportamiento mecánico y la falla de materiales compuestos fabricados mediante manufactura aditiva, especialmente bajo condiciones de carga biaxial. Actualmente desarrolla actividades académicas y de investigación relacionadas con el diseño mecánico, los materiales compuestos y la manufactura avanzada. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8071-397X>.

José David Pérez-Ruiz es ingeniero mecánico y doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad del País Vasco, España. Actualmente está vinculado como profesor de carrera a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Su experiencia académica y profesional se concentra en la fabricación avanzada, la manufactura por tecnologías láser, la ciencia de materiales, el diseño microestructural, el mecanizado y la integridad de componentes fabricados aditivamente. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5189-1857>.

Octavio Andrés González-Estrada es ingeniero mecánico y de manufactura, magíster y doctor en Ingeniería Mecánica y de Materiales por la Universitat Politècnica de València, España, y realizó una estancia posdoctoral en Cardiff University, Reino Unido. Es profesor titular de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Sus actividades académicas y de investigación se centran en el diseño mecánico, los materiales compuestos, la manufactura aditiva, el análisis de fatiga, fractura y falla, y el modelado computacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2778-3389>.