

**Análisis Experimental de Falla por Acción de Cargas Biaxiales en Polímeros
Fabricados Aditivamente y Reforzados con Fibras Continuas de Vidrio**

John Sebastián González Pérez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Octavio Andrés González Estrada

PhD. en Ingeniería Mecánica

Codirector

David Fernando Santamaría Maldonado

M Sc (c) en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

A mis padres, por su esfuerzo inmensurable y por ser el pilar fundamental que me permitió alcanzar esta meta, gracias por creer en mí y por brindarme las oportunidades que hoy se transforman en este logro. A mi hermana menor, por ser mi fuente de alegría y esa luz constante que con su ternura ilumina cada rincón de nuestro hogar.

A Angie, mi compañera, por sus consejos, su apoyo incondicional y por caminar a mi lado en cada paso de este proceso tan significativo para mi vida. A Daniela, por su generosidad como compañera de hogar y amiga, gracias por su apoyo constante y por convertir nuestro espacio compartido en un lugar de alegría que hizo los días de mayor carga mucho más llevaderos. Y finalmente a mi mejor amigo Sebastián, por su lealtad incondicional y por esos momentos de descanso necesarios que fueron el equilibrio perfecto para llegar con éxito al final de este camino.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme llegar a este momento, y por darme la salud y fortaleza para culminar mi formación profesional.

A mi director de proyecto, por su disposición, paciencia y por compartir su conocimiento técnico, el cual fue fundamental para estructurar este trabajo. Asimismo, agradezco al codirector por su acompañamiento y el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y al personal de los laboratorios. De manera especial, quiero expresar mi gratitud al auxiliar David por su valiosa colaboración y asesoría técnica en la impresión 3D de las probetas de material compuesto, su disposición fue fundamental para el éxito de la fase experimental. Sin el soporte técnico y los recursos institucionales, la validación de este proyecto no habría sido posible.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
2. Marco Referencial y Estado del Arte.....	12
2.1 Manufactura Aditiva de Compuestos con Fibra Continua	12
2.2 Fibras Continuas de Vidrio en Matrices Poliméricas	13
2.3 Comportamiento Mecánico bajo Cargas Multiaxiales	14
2.4 Ensayo Arcan para Caracterización Biaxial	15
2.5 Dispersión, Confiabilidad y Análisis Estadístico.....	17
3. Objetivos	19
3.1 Objetivo General.....	19
3.2 Objetivos Específicos.....	19
4. Materiales y Métodos.....	20
4.1 Selección, Parametrización y Fabricación de Probetas	20
4.2 Diseño Experimental y Montaje del Dispositivo Arcan	24
4.3 Ejecución de Ensayos Mecánicos	25
4.4 Análisis Estadístico y Modelado Numérico Computacional	27
5. Resultados y Discusión	33

5.1 Caracterización de la Respuesta Mecánica Global.....	33
5.2 Análisis de Rigidez Elástica y Rango de Comportamiento Lineal	35
5.3 Análisis Estadístico y Confiabilidad.....	36
5.4 Caracterización de Modos de Falla	38
5.5 Calibración y Actualización del Modelo Numérico	40
5.6 Validación del Modelo Numérico.....	44
6. Conclusiones	49
7. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Parámetros de Impresión 3D para la Manufactura de Probetas AM-CGFRP</i>	22
Tabla 2. <i>Propiedades Mecánicas de los Materiales Constituyentes para el Modelo Numérico en ANSYS</i>	30
Tabla 3. <i>Rigidez estructural del sistema AM-CGFRP en función del ángulo de carga biaxial</i> ...	35
Tabla 4. <i>Dispersión Estadística de la Carga Máxima de Rotura</i>	37
Tabla 5. <i>Comparación de rigideces iniciales utilizando propiedades teóricas (ANSYS vs. Experimental)</i>	41
Tabla 6. <i>Propiedades elásticas calibradas de los materiales para el modelo numérico final en ANSYS</i>	43
Tabla 7. <i>Comparativa de la rigidez estructural entre el modelo experimental y la simulación numérica (ANSYS)</i>	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Trayectoria de la fibra de vidrio continua en la zona media de la probeta tipo mariposa bajo la estrategia de deposición isotrópica (90°, 45°, 0° y -45°).</i>	21
Figura 2. <i>Plano de la probeta tipo mariposa con sus cotas principales (largo, ancho, radio de la muesca, espesor), y detalle del área crítica de la probeta</i>	23
Figura 3. <i>Esquema de descomposición de la carga vertical P en el dispositivo Arcan.</i>	25
Figura 4. <i>Fotografía del montaje experimental</i>	26
Figura 5. <i>Mallado de elementos finitos de la probeta tipo mariposa en ANSYS Workbench.</i>	29
Figura 6. <i>Curvas promedio de carga-desplazamiento para las probetas AM-CGFRP bajo relaciones de biaxialidad a 0°, 45° y 90°.</i>	33
Figura 7. <i>Modos de falla macroscópicos observados en la sección significativa de las probetas AM-CGFRP.</i>	40
Figura 8. <i>Concentración de esfuerzos de von Mises y esfuerzo cortante máximo (ANSYS) de los tres estados de carga analizados.</i>	47

Resumen

Título: Análisis Experimental de Falla por Acción de Cargas Biaxiales en Polímeros Fabricados Aditivamente y Reforzados con Fibras Continuas de Vidrio *

Autor: John Sebastián González Pérez**

Palabras Clave: Manufactura aditiva, fibra continua de vidrio, falla multiaxial, ensayo Arcan, polímeros reforzados, método de elementos finitos, análisis de Weibull, confiabilidad mecánica.

Descripción: La manufactura aditiva aplicada a polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio (AM-CGFRP) ha impulsado el diseño de componentes estructurales altamente eficientes. Sin embargo, caracterizar su comportamiento bajo estados de carga multiaxiales presenta desafíos significativos debido a su marcada anisotropía y a los defectos microestructurales inherentes al proceso de impresión tridimensional. En respuesta a esta necesidad, el presente proyecto de grado evalúa, tanto experimental como numéricamente, la respuesta mecánica y los modos de falla de probetas poliméricas de Nylon reforzadas con hilos continuos de fibra de vidrio bajo condiciones de carga biaxial. Para la fase experimental, se utilizó una adaptación del dispositivo Arcan acoplado a una máquina universal de ensayos, induciendo estados precisos de tracción pura (0°), carga combinada (45°) y corte puro (90°). Los hallazgos demostraron que la máxima rigidez elástica y capacidad portante se alcanzan a los 0° , donde el refuerzo gobierna la respuesta. Por el contrario, al orientar la carga a 90° , la resistencia decrece al depender fundamentalmente de la matriz termoplástica y la adhesión interfacial. A través de un análisis probabilístico de Weibull, se determinó que la falla por cizalladura (90°) posee menor dispersión estadística y resulta más predecible que la fractura frágil a tracción (0°). Finalmente, se formuló un modelo predictivo mediante el método de elementos finitos en ANSYS. Al calibrar las propiedades elásticas aparentes para compensar las holguras del equipo y la porosidad, el modelo reprodujo la rigidez experimental con un error menor al 1.5 % en los estados dominantes, confirmando como una metodología confiable para el diseño estructural.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada. PhD. Ingeniería Mecánica y de Materiales. Codirector: David Fernando Santamaría Maldonado. M Sc (c) en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Experimental Failure Analysis of Additively Manufactured Continuous Glass Fiber Reinforced Polymers Under Biaxial Loads*

Author: John Sebastián González Pérez**

Key Words: Additive manufacturing, continuous glass fiber, multiaxial failure, Arcan test, reinforced polymers, finite element method, Weibull analysis, mechanical reliability.

Description: Additive manufacturing applied to continuous glass fiber reinforced polymers (AM-CGFRP) has advanced the design of highly efficient structural components. However, characterizing their behaviour under multiaxial load states presents significant challenges due to their pronounced anisotropy and the microstructural defects inherent to the three-dimensional printing process. In response to this need, this degree project evaluates, both experimentally and numerically, the mechanical response and failure modes of polymeric Nylon specimens reinforced with continuous glass fiber under biaxial loading conditions. For the experimental phase, an adaptation of the Arcan fixture coupled to a universal testing machine was used, inducing precise states of pure tension (0°), combined loading (45°), and pure shear (90°). The findings demonstrated that the maximum elastic stiffness and load-bearing capacity are achieved at 0° , where the reinforcement governs the response. Conversely, when orienting the load at 90° , the resistance decreases as it relies fundamentally on the thermoplastic matrix and interfacial adhesion. Through a Weibull probabilistic analysis, it was determined that shear failure (90°) has lower statistical dispersion and is more predictable than brittle tensile fracture (0°). Finally, a predictive model was formulated using the Finite Element Method in ANSYS. By calibrating the apparent elastic properties to compensate for equipment clearances and porosity, the model reproduced the experimental stiffness with an error of less than 1.5% in the dominant states, confirming it as a reliable methodology for structural design.

* Degree Work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Octavio Andrés González Estrada. PhD in Mechanical and Materials Engineering. Co-director: David Fernando Santamaría Maldonado. M Sc (c) en Ingeniería Mecánica

Introducción

La manufactura aditiva (AM) ha transformado el diseño y fabricación de componentes poliméricos al permitir la integración de refuerzos continuos dentro de arquitecturas complejas, optimizando la relación resistencia-peso y habilitando aplicaciones estructurales de alto desempeño (Dickson et al., 2017; Huang et al., 2013). En particular, los polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio fabricados mediante AM (AM-CGFRP) representan una alternativa prometedora frente a métodos tradicionales, al ofrecer control sobre la orientación del refuerzo y la geometría final del componente.

A pesar de estos avances, el conocimiento disponible sobre el comportamiento mecánico de estos materiales bajo estados de carga multiaxiales es limitado. La mayoría de estudios se concentran en ensayos uniaxiales, los cuales no reproducen adecuadamente las condiciones reales de servicio en aplicaciones estructurales donde coexisten esfuerzos normales y cortantes (Caminero et al., 2018). En compuestos anisotrópicos reforzados con fibra continua, la interacción entre tensiones longitudinales, transversales y de corte puede modificar significativamente los mecanismos de daño y los modos de falla.

Adicionalmente, la manufactura aditiva introduce fuentes adicionales de variabilidad, como porosidad interlaminar, variaciones en la trayectoria del filamento y diferencias en la adherencia matriz-refuerzo, lo que puede afectar la repetibilidad de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (Blok et al., 2018; Chacón et al., 2017). Esta dispersión resulta crítica cuando se pretende utilizar estos materiales en aplicaciones de ingeniería de alta responsabilidad.

El ensayo Arcan ha demostrado ser una herramienta eficaz para generar estados de esfuerzo plano controlados, permitiendo caracterizar materiales compuestos bajo combinaciones de tracción y corte (Arcan et al., 1978; Hao et al., 2019). No obstante, su aplicación sistemática en compuestos fabricados aditivamente con fibra continua de vidrio aún requiere mayor validación experimental y contraste con modelos numéricos.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación. ¿Cómo influyen las condiciones de carga biaxial, generadas mediante el dispositivo Arcan, en el comportamiento mecánico y los modos de falla de polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio fabricados por manufactura aditiva, y qué nivel de correlación puede establecerse entre los resultados experimentales y un modelo numérico por elementos finitos?

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar experimentalmente la respuesta mecánica y la confiabilidad de AM-CGFRP bajo diferentes relaciones de biaxialidad, evaluando la dispersión estadística de los resultados y contrastando los hallazgos con un modelo numérico por elementos finitos. Con ello, se busca aportar información relevante para la caracterización estructural de compuestos fabricados aditivamente y fortalecer los criterios de diseño bajo cargas multiaxiales.

2. Marco Referencial y Estado del Arte

2.1 Manufactura Aditiva de Compuestos con Fibra Continua

La manufactura aditiva aplicada a materiales compuestos ha evolucionado significativamente con la incorporación de refuerzos continuos dentro de matrices termoplásticas, particularmente mediante tecnologías basadas en deposición de filamento fundido (FFF) (Dickson et al., 2020; Parandoush & Lin, 2017). A diferencia de los polímeros impresos sin refuerzo, la integración de fibras continuas permite incrementar de manera sustancial la rigidez y la resistencia mecánica, acercando el desempeño del material a aplicaciones estructurales exigentes (Zhang et al., 2021).

En estos sistemas, el comportamiento mecánico final depende no solo de las propiedades intrínsecas de la fibra y la matriz, sino también del control del proceso de fabricación. Parámetros como la orientación del refuerzo, la altura de capa, la temperatura de extrusión y la estrategia de deposición influyen directamente en la calidad de la unión interlaminar y en la eficiencia de transferencia de carga (Chacón et al., 2017; Jamal et al., 2024). En particular, la programación del camino de la fibra (toolpath) permite alinear el refuerzo con las trayectorias principales de esfuerzo, generando materiales altamente anisotrópicos cuyo desempeño depende críticamente de la dirección de carga aplicada (Dickson et al., 2020).

No obstante, la manufactura aditiva introduce defectos característicos como porosidad, vacíos interlaminares y variaciones locales en la fracción volumétrica de fibra, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos y pueden reducir la resistencia efectiva del material (Blok et al., 2018; Zhang et al., 2021). Estas imperfecciones adquieren mayor relevancia cuando el material

es sometido a estados de carga combinados, donde la matriz y la interfase fibra-matriz desempeñan un papel determinante.

En el contexto de cargas biaxiales, la capacidad de orientar fibras continuas en múltiples direcciones dentro de una misma pieza representa una ventaja de diseño frente a procesos convencionales. Sin embargo, esta misma libertad geométrica puede generar respuestas mecánicas complejas que requieren caracterización experimental específica. Por ello, comprender la relación entre los parámetros de impresión y la respuesta bajo estados multiaxiales constituye un aspecto central en la validación estructural de compuestos fabricados aditivamente.

2.2 Fibras Continuas de Vidrio en Matrices Poliméricas

Los polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio (GFRP) combinan la capacidad de conformado de la matriz termoplástica con la elevada resistencia y rigidez específica del refuerzo, logrando materiales con una relación resistencia-peso superior a la de los polímeros convencionales (Dickson et al., 2017; Rajak et al., 2021). En estos sistemas, la fibra soporta principalmente los esfuerzos longitudinales, mientras que la matriz transmite la carga, protege el refuerzo y resiste las solicitaciones transversales y de corte.

El desempeño mecánico del compuesto depende críticamente de la eficiencia de transferencia de carga en la interfase fibra-matriz, así como de la fracción volumétrica y orientación del refuerzo (Jariwala et al., 2020; Müzel et al., 2020). En configuraciones con fibra continua, la integridad del filamento a lo largo de toda la probeta maximiza la capacidad portante en la dirección de alineación, pero simultáneamente incrementa la anisotropía del material. Como consecuencia, la resistencia fuera del eje principal de la fibra está gobernada en mayor medida por la matriz polimérica y por la calidad de la adhesión interfacial.

Las fibras de vidrio, particularmente en su formulación tipo E-glass por su eficiencia costo-desempeño, presentan un comportamiento predominantemente elástico lineal hasta la fractura y una dispersión estadística asociada a defectos superficiales y variaciones geométricas microscópicas (Dugvekar & Dixit, 2021; Jariwala et al., 2020). Esta variabilidad intrínseca puede amplificarse en procesos de manufactura aditiva debido a irregularidades en la impregnación y en la deposición capa por capa.

Bajo estados de carga multiaxiales, la interacción entre esfuerzos normales y cortantes puede activar mecanismos de daño combinados, tales como microfisuración de la matriz, desprendimiento interfacial y rotura progresiva de fibras. Por ello, el estudio de GFRP fabricados aditivamente requiere una caracterización que considere explícitamente la orientación del refuerzo y su influencia en la respuesta biaxial, aspecto central del presente trabajo.

2.3 Comportamiento Mecánico bajo Cargas Multiaxiales

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos reforzados con fibra continua es intrínsecamente anisotrópico y dependiente del estado de esfuerzos aplicado. En condiciones reales de servicio, los componentes estructurales rara vez experimentan cargas uniaxiales puras. Por el contrario, están sometidos a combinaciones simultáneas de esfuerzos normales y cortantes que generan estados de esfuerzo plano multiaxial (Duda et al., 2025; Muñoz & Serna, 2022).

La biaxialidad puede describirse mediante la relación entre los esfuerzos principales que actúan en el plano del material, lo que permite distinguir configuraciones dominadas por tracción, por corte o por combinaciones intermedias. En compuestos laminados, cuando la carga se aplica alineada con la dirección principal de la fibra, la resistencia está gobernada por la capacidad portante del refuerzo. Sin embargo, a medida que aumenta la componente de corte o la sollicitación

fuera del eje, la matriz polimérica y la interfase fibra-matriz adquieren mayor relevancia en la iniciación del daño (Muñoz & Serna, 2022; Müzel et al., 2020).

Bajo estados multiaxiales, la interacción entre tensiones puede reducir la resistencia efectiva respecto a los valores obtenidos en ensayos uniaxiales convencionales. Se activan mecanismos como microfisuración de la matriz, desprendimiento interfacial (debonding) y redistribución progresiva de carga entre fibras, lo que conduce a una evolución no trivial del daño (Duda et al., 2025). Por esta razón, la caracterización basada exclusivamente en tracción simple resulta insuficiente para establecer criterios de diseño confiables en compuestos anisotrópicos.

El análisis multiaxial suele apoyarse en criterios de falla que relacionan las componentes de esfuerzo normal y cortante con las resistencias características del material. Estos criterios permiten definir envolventes de falla en el plano de esfuerzos y evaluar la sensibilidad del compuesto frente a diferentes relaciones de carga (Müzel et al., 2020). En materiales fabricados por manufactura aditiva, dicha envolvente puede verse modificada por defectos de impresión y por variaciones locales en la arquitectura del refuerzo.

En consecuencia, la evaluación experimental bajo condiciones controladas de biaxialidad constituye un requisito fundamental para comprender la respuesta estructural de polímeros reforzados con fibra continua de vidrio. La generación de estos estados mediante dispositivos específicos, como el ensayo Arcan, permite reproducir combinaciones de tracción y corte de manera sistemática y establecer bases sólidas para la validación de modelos numéricos.

2.4 Ensayo Arcan para Caracterización Biaxial

El ensayo Arcan es una técnica experimental desarrollada para generar estados de esfuerzo plano uniformes en materiales compuestos mediante el uso de una probeta plana con muescas antisimétricas y un dispositivo de sujeción específico (Arcan et al., 1978). A través de la aplicación

de una carga uniaxial en una máquina universal de ensayos y la rotación controlada de la probeta dentro del dispositivo, es posible inducir combinaciones definidas de esfuerzo normal y cortante en la región central calibrada.

La característica distintiva del método radica en que el ángulo de orientación de la probeta respecto al eje de carga determina la relación de biaxialidad. De este modo, pueden reproducirse estados dominados por tracción pura, corte puro o configuraciones intermedias, permitiendo construir una caracterización más representativa del comportamiento real del material (Din et al., 2020; Hao et al., 2019). Esta versatilidad resulta especialmente relevante en compuestos anisotrópicos, donde la resistencia depende de la dirección del refuerzo y de la interacción entre sus fases constitutivas.

La geometría tipo “mariposa” empleada en el dispositivo Arcan está diseñada para concentrar el estado de esfuerzos en una zona central denominada sección significativa, donde se busca que la distribución sea lo más uniforme posible. Una correcta alineación, así como el control de las condiciones de sujeción, son fundamentales para evitar concentraciones espurias de esfuerzo en los orificios de fijación o la aparición de momentos flectores fuera del plano.

En materiales compuestos fabricados por manufactura aditiva, el ensayo Arcan adquiere un papel estratégico, ya que permite evaluar simultáneamente la contribución de la fibra continua, la matriz polimérica y la interfase bajo estados combinados de carga. Esto facilita identificar la transición entre fallas dominadas por tracción del refuerzo y aquellas gobernadas por corte en la matriz o por desprendimiento interlaminar.

En consecuencia, el empleo del dispositivo Arcan en esta investigación no solo posibilita la obtención de resistencias bajo distintas relaciones de carga, sino que constituye la base

experimental para definir la respuesta biaxial del material y validar posteriormente los modelos numéricos desarrollados.

2.5 Dispersión, Confiabilidad y Análisis Estadístico

La respuesta mecánica de materiales compuestos reforzados con fibra continua presenta una variabilidad inherente asociada tanto a defectos microscópicos del refuerzo como a heterogeneidades introducidas durante el proceso de manufactura (Dugvekar & Dixit, 2021). En el caso de compuestos fabricados mediante manufactura aditiva, esta dispersión puede verse incrementada por factores como variaciones en la impregnación de la fibra, discontinuidades locales, porosidad y fluctuaciones en los parámetros de impresión.

A diferencia de materiales metálicos homogéneos, donde la dispersión suele ser relativamente baja, en compuestos poliméricos reforzados la resistencia última no puede considerarse un valor único determinístico. Por ello, el análisis estadístico de los resultados experimentales constituye un componente esencial para interpretar adecuadamente la respuesta del material y establecer márgenes de confiabilidad.

Una herramienta ampliamente utilizada para describir la variabilidad en resistencia es la distribución de Weibull, la cual permite relacionar la probabilidad de falla con el nivel de esfuerzo aplicado mediante parámetros que caracterizan la dispersión y la resistencia característica del material. El módulo de Weibull, en particular, proporciona una medida cuantitativa de la sensibilidad del material a defectos. valores bajos indican alta dispersión y mayor influencia de imperfecciones críticas.

En el presente trabajo, el tratamiento estadístico de los datos experimentales no se limita al cálculo de promedios, sino que incorpora medidas de dispersión como desviación estándar, coeficiente de variación y ajuste a modelos probabilísticos cuando sea pertinente. Este enfoque

permite evaluar la repetibilidad de los ensayos Arcan, comparar configuraciones de carga y analizar la influencia de los parámetros de manufactura en la confiabilidad mecánica.

De esta manera, la integración del análisis estadístico con la caracterización biaxial proporciona una visión más completa del desempeño estructural del compuesto, alineada con criterios modernos de diseño basados en confiabilidad y no únicamente en valores nominales de resistencia.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Estudiar experimentalmente el comportamiento mecánico y la respuesta al fallo de polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio (AM-CGFRP) fabricados mediante manufactura aditiva, bajo condiciones de cargas biaxiales, utilizando la herramienta Arcan en la máquina de ensayo de tensión.

3.2 Objetivos Específicos

Ejecutar ensayos de tensión en probetas de AM-CGFRP, empleando la herramienta Arcan instalado en la máquina de ensayo de tensión para simular condiciones de cargas biaxiales y obtener datos sobre la resistencia, deformación y fallo de las muestras bajo diferentes configuraciones de carga.

Examinar la dispersión y repetibilidad de los resultados experimentales obtenidos bajo condiciones de carga biaxial controlada, para estudiar la confiabilidad del proceso de manufactura aditiva y del sistema de ensayo con Arcan.

Desarrollar un modelo numérico por elementos finitos que represente la estructura del material compuesto, para contrastar la respuesta mecánica simulada con los datos de los ensayos biaxiales.

4. Materiales y Métodos

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento mecánico y la evaluación de la confiabilidad de los polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio (AM-CGFRP) bajo cargas biaxiales, se implementó una metodología estructurada y secuencial. Este enfoque metodológico abarcó desde la preparación geométrica y material de las probetas hasta la correlación de los resultados experimentales con un modelo numérico. Dicha estructuración garantizó la rigurosidad en la obtención de los datos, permitiendo un análisis estadístico robusto de la dispersión inherente a la manufactura aditiva y una correlación computacional precisa.

4.1 Selección, Parametrización y Fabricación de Probetas

La manufactura de las probetas de ensayo requirió la definición de un sistema de materiales compatible con el proceso de extrusión y capaz de soportar estados de esfuerzo biaxial. Se seleccionó como matriz polimérica un termoplástico de poliamida (Nylon) provisto por el fabricante Markforged, el cual fue reforzado con hilos de fibra de vidrio continua de la misma marca. Esta combinación fue elegida por su excelente relación entre resistencia mecánica y peso, así como por la alta adherencia interfacial que se logra durante la coextrusión térmica.

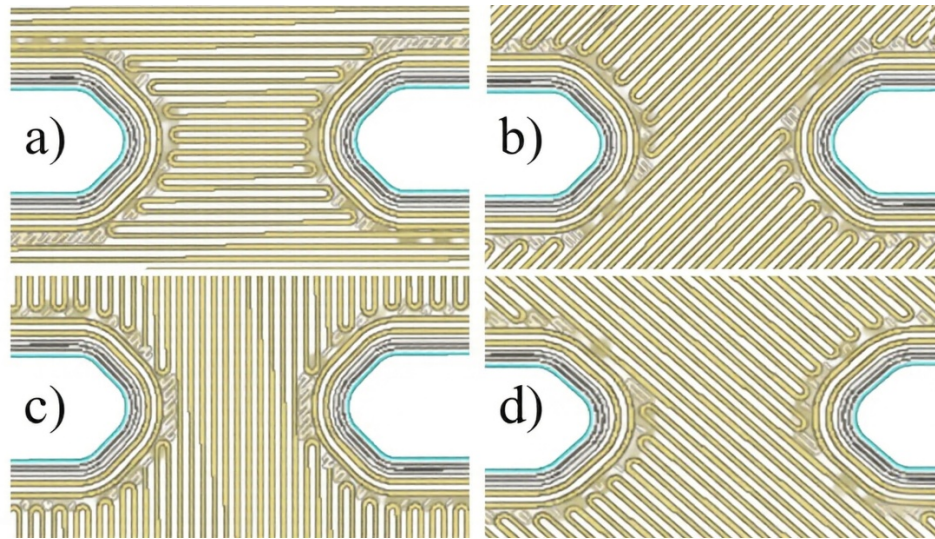
El proceso de conformado se llevó a cabo utilizando una impresora tridimensional basada en la tecnología de deposición de filamento fundido (FFF) modelo Markforged Mark Two, la cual permite incrustar el refuerzo continuo dentro de la matriz termoplástica. Para asegurar la consistencia del lote de material y aislar la variable de estudio, se mantuvieron estrictamente constantes los parámetros de impresión. Se estableció una altura de capa de 0.100 mm y una densidad de relleno estructural del 100% utilizando un patrón rectilíneo.

El diseño geométrico de las probetas se basó en la configuración tipo "mariposa", empleada específicamente para su acople en el dispositivo Arcan, caracterizada por sus muescas centrales antisimétricas que aseguran la concentración del estado de esfuerzos en una sección transversal conocida. El modelado tridimensional se ejecutó en el software CAD SolidWorks, exportando posteriormente la geometría en formato STL al software de laminado Eiger, propio del entorno Markforged.

Dentro de este laminador, la orientación de las fibras continuas se programó bajo una estrategia de deposición isotrópica simétrica con secuencias angulares de $[90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ]$ s. Para visualizar la distribución de esta anisotropía programada, ver Figura 1. Esta presenta las capturas del software Eiger evidenciando las trayectorias del refuerzo específicamente en la zona de interés (la sección media transversal de la probeta) para cada una de las orientaciones. Asimismo, las temperaturas de extrusión se fijaron en un rango de 250°C a 270°C para la matriz de Nylon y de 260°C a 270°C para el refuerzo de fibra de vidrio, garantizando así una termofusión óptima entre las capas.

Figura 1.

Trayectoria de la fibra de vidrio continua en la zona media de la probeta tipo mariposa bajo la estrategia de deposición isotrópica (90° , 45° , 0° y -45°).



Nota. Capturas obtenidas desde el software laminador Eiger detallando la trayectoria del refuerzo en la sección de interés para cada capa angular a) 90° , b) 45° , c) 0° , d) -45° .

Para facilitar la replicabilidad del experimento, los parámetros fundamentales de manufactura se consolidan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros de Impresión 3D para la Manufactura de Probetas AM-CGFRP

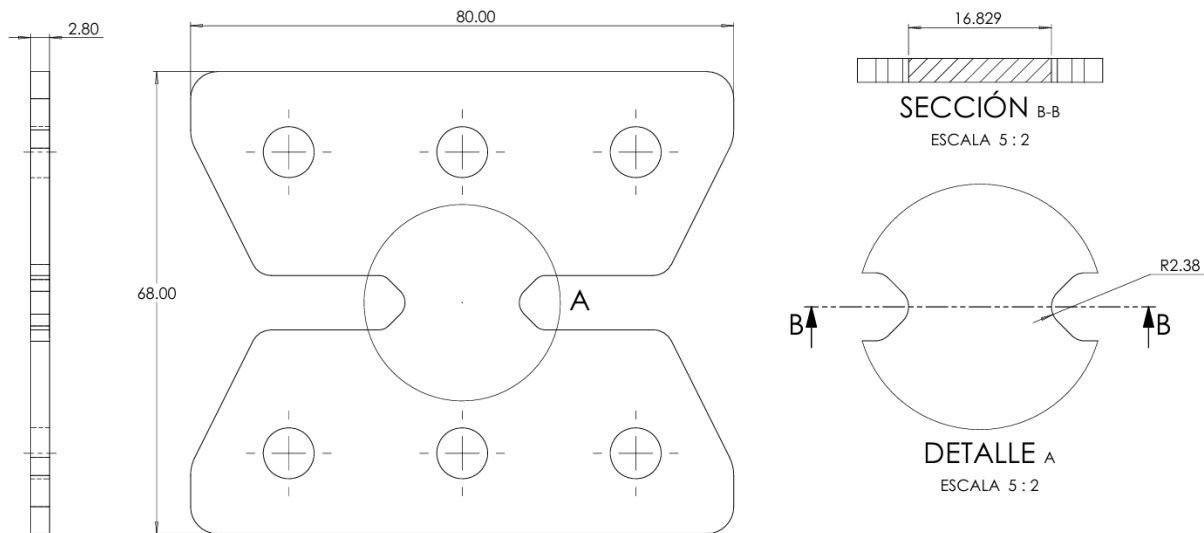
Parámetro	Especificación
Equipo de manufactura	Impresora Markforged Mark Two
Material de la matriz	Termoplástico de poliamida (Nylon)
Material de refuerzo	Fibra de vidrio continua
Altura de capa	0.100 mm
Densidad de relleno de la matriz	100 %
Patrón de relleno	Rectilíneo
Orientación de las fibras continuas	Isótropo simétrico [90° , 45° , 0° y -45°] _s
Temperatura de extrusión (Matriz)	250 °C - 270 °C
Temperatura de extrusión (Fibra)	260 °C - 270 °C

Nota. Los parámetros de impresión se mantuvieron constantes para todos los especímenes con el fin de aislar la relación de biaxialidad como la única variable independiente del estudio.

Una vez impresas, todas las muestras fueron sometidas a un riguroso control de calidad visual y dimensional, empleando instrumentos de medición calibrados (pie de rey) para verificar el espesor total y el ancho en la garganta (sección significativa). Este procedimiento permitió descartar aquellos especímenes que presentaran defectos severos de impresión, variaciones dimensionales fuera de tolerancia o delaminación temprana, asegurando así la uniformidad y representatividad del lote ensayado (Ver Figura 2).

Figura 2.

Plano de la probeta tipo mariposa con sus cotas principales (largo, ancho, radio de la muesca, espesor), y detalle del área crítica de la probeta



Nota. Imagen tomada del software SolidWorks de la probeta ensayada.

4.2 Diseño Experimental y Montaje del Dispositivo Arcan

El esquema de experimentación fue diseñado para evaluar de manera aislada la influencia del ángulo de aplicación de la carga sobre la respuesta estructural del material compuesto. Se definió como variable independiente la relación de biaxialidad, materializada a través de tres configuraciones de carga predeterminadas, 0° para inducir un estado de tracción pura, 45° para generar un estado combinado de tracción y corte, y 90° para someter la muestra a un esfuerzo de corte puro. Como variables dependientes del estudio, se monitoreó la carga máxima absoluta soportada por el ensamble, el desplazamiento total de las mordazas hasta el punto de falla estructural y los modos de falla observables a nivel macroscópico, aislando así la respuesta global del sistema frente a las variaciones del ángulo de aplicación de la carga. Con el fin de dotar al estudio de validez estadística y caracterizar adecuadamente la dispersión geométrica y mecánica propia de la manufactura aditiva, se establecieron cuatro repeticiones por cada configuración angular, consolidando un universo total de doce probetas ensayadas.

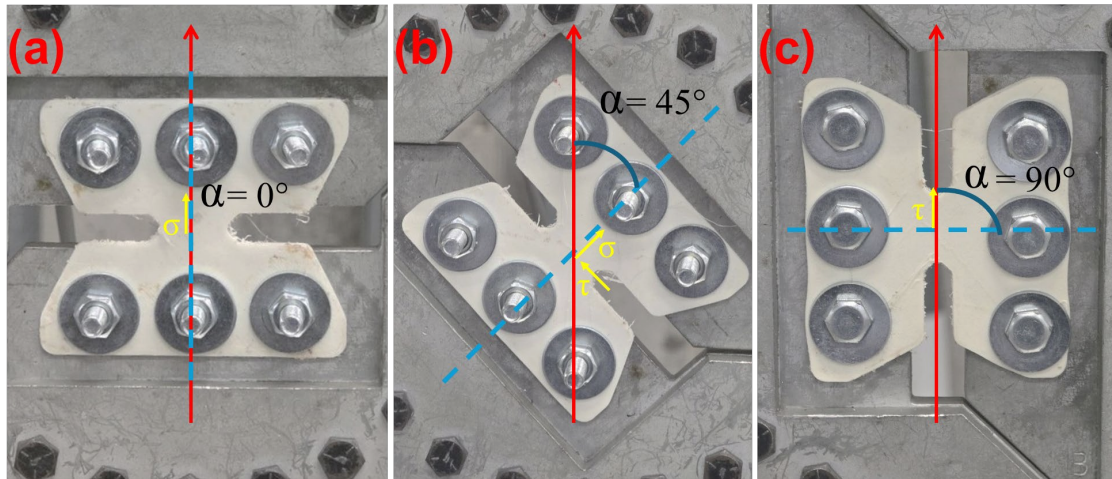
Para la materialización de los estados de esfuerzo plano, se empleó una adaptación de la herramienta Arcan, la cual consiste en un ensamble de dos semidiscos de acero maquinados que se acoplan directamente a las mordazas de la máquina universal. La principal ventaja de este dispositivo radica en su capacidad de variar la relación de tensiones al rotar el eje geométrico de la probeta un ángulo α respecto a la línea de acción de la carga aplicada (P).

Las probetas de geometría mariposa fueron instaladas en el dispositivo garantizando una alineación estricta de la muesca central respecto al eje principal de aplicación de carga para cada uno de los tres estados de carga, tal como se esquematiza en la Figura 3. La sujeción se realizó mediante tornillos de alta resistencia ajustados con un torque controlado. Esta precaución fue fundamental para evitar el deslizamiento prematuro de la probeta por pérdida de fricción,

asegurando la transmisión íntegra de la carga sin llegar a inducir concentraciones de esfuerzo excesivas o daños locales en las zonas de los agujeros de anclaje.

Figura 3.

Esquema de descomposición de la carga vertical P en el dispositivo Arcan.



Nota. (a) Configuración a $\alpha = 0^\circ$ generando un estado de tracción pura ($\tau = 0$). (b) Configuración a $\alpha = 45^\circ$ generando esfuerzos combinados de tracción y corte. (c) Configuración a $\alpha = 90^\circ$ generando un estado de corte puro ($\sigma = 0$). Las líneas rojas indican el eje de tracción de la máquina universal.

4.3 Ejecución de Ensayos Mecánicos

Las pruebas de caracterización física se desarrollaron bajo condiciones ambientales controladas en las instalaciones del laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para la aplicación de las sollicitaciones mecánicas se hizo uso de una máquina universal de ensayos MTS Bionix Tabletop Test System, modelo 370.02, debidamente instrumentada con una celda de carga calibrada de 25 kN de capacidad, Figura 4. Previo al inicio de cada iteración, se efectuó un tarado del sistema de adquisición y se aplicó una pre-carga mínima para eliminar holguras mecánicas en los pasadores del montaje Arcan.

Figura 4.

Fotografía del montaje experimental



Nota. Fotografía del arreglo experimental en el laboratorio. En el centro se observa el ensamble del dispositivo Arcan acoplado a las mordazas, sujetando firmemente la probeta de polímero reforzado con fibra de vidrio (AM-CGFRP) lista para la ejecución del ensayo bajo un régimen de desplazamiento cuasi-estático.

Todos los ensayos fueron programados bajo un régimen de control de desplazamiento continuo, imponiendo una velocidad de cruceta constante de 1 mm/min. Esta tasa de deformación lenta fue seleccionada con el propósito de mitigar los efectos dinámicos o de inercia, asegurando que la carga se transfiriera de manera cuasi-estática a través de las fibras y la matriz. Los ensayos se dieron por concluidos una vez se registró una caída drástica en la capacidad portante de la probeta, lo cual evidenció la fractura del refuerzo continuo de fibra de vidrio y un desgarro sustancial en la zona media de la matriz de Nylon. Debido a la alta elasticidad y naturaleza dúctil

del polímero, no se buscó la separación total de la probeta en dos mitades, sino la captura del punto máximo de falla estructural. Durante el transcurso de cada prueba, el sistema de adquisición de datos del equipo registró de forma ininterrumpida las variables de fuerza aplicada y desplazamiento absoluto de las mordazas. De forma complementaria, al concluir cada ensayo se procedió a documentar fotográficamente la zona ensayada, facilitando la identificación visual de los modos de falla macroscópicos, tales como la rotura localizada de las fibras de refuerzo, la dirección del daño transversal y el nivel de deformación o desgarro en la matriz polimérica.

4.4 Análisis Estadístico y Modelado Numérico Computacional

Una vez finalizada la recolección empírica, los datos crudos de fuerza y desplazamiento fueron exportados para su respectivo procesamiento analítico. El análisis se enfocó rigurosamente en la respuesta estructural global del material, evaluando la curva fuerza-desplazamiento para determinar los límites de carga última y la rigidez del sistema bajo las diferentes configuraciones angulares. Para ponderar la confiabilidad del proceso de impresión FFF, se ejecutó un tratamiento estadístico descriptivo calculando la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) para cada uno de los agrupamientos angulares de carga. El monitoreo del coeficiente de variación fungió como el indicador métrico principal para cuantificar la homogeneidad de las propiedades mecánicas y diagnosticar la repetibilidad estructural del sistema de manufactura implementado.

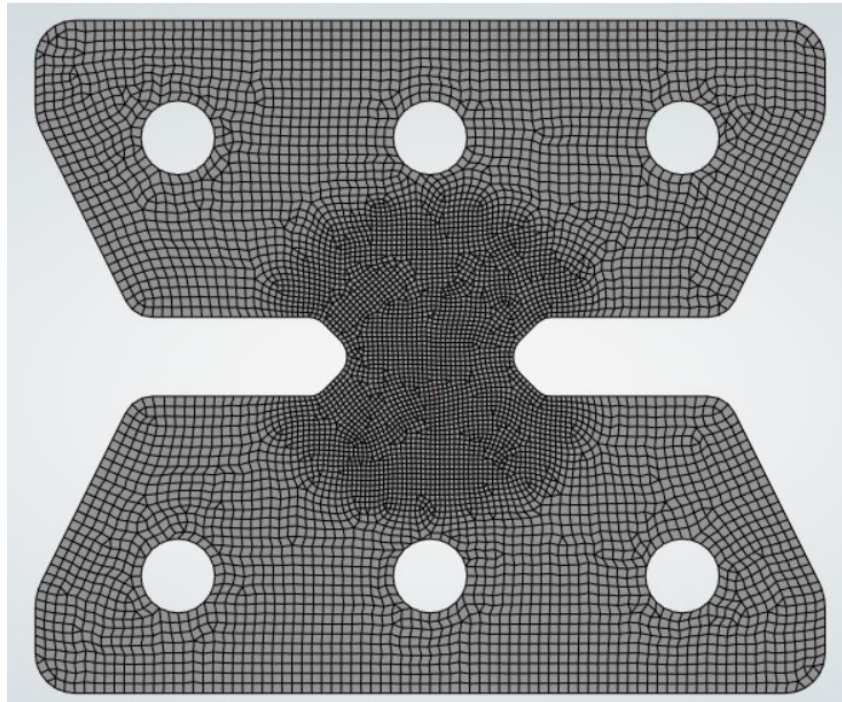
Para el análisis por el método de elementos finitos, la estructura del material compuesto se abordó numéricamente utilizando el módulo especializado ANSYS Composite PrepPost. La discretización del dominio se llevó a cabo utilizando elementos lineales tipo cáscara (SHELL181). La selección de esta formulación lineal frente a elementos cuadráticos de orden superior se justifica por la naturaleza del análisis y la alta densidad de la discretización. En primer lugar, el ensayo

ARCAN induce un estado de esfuerzo plano dominado por fuerzas de membrana (tracción y cizalladura), sin presencia de flexiones severas fuera del plano donde las funciones de forma cuadráticas resultarían estrictamente necesarias. En segundo lugar, dado que la simulación se restringe a la caracterización de la rigidez aparente dentro del régimen elástico-lineal del material compuesto, los elementos de primer orden capturan el comportamiento tensional de manera adecuada. Finalmente, el alto grado de refinamiento implementado en la zona crítica, con un tamaño de elemento de 0.5 mm, garantiza la convergencia de la solución analítica y mitiga el fenómeno de rigidez artificial, logrando la precisión geométrica requerida para representar el apilamiento ortotrópico de 28 capas con una eficiencia computacional notablemente superior.

Una vez justificado y definido el tipo de elemento, se estableció un tamaño global de malla de 1 mm. Para asegurar la convergencia de los resultados y capturar con alta resolución los gradientes de esfuerzo, se aplicó un refinamiento focalizado en la región central de la muesca (sección significativa) mediante una esfera de influencia de 16 mm de radio, reduciendo el tamaño del elemento a 0.5 mm en esta zona crítica, ver Figura 5. El modelo final quedó constituido por un total de 7177 nodos y 7070 elementos. La idoneidad de la discretización se verificó mediante métricas de calidad, obteniendo un coeficiente de asimetría promedio de 0.116 y un valor máximo de 0.657, lo cual garantiza una malla de alta calidad y minimiza el error numérico asociado a la distorsión geométrica. La idoneidad de la malla se determinó también al obtener una variación de esfuerzo de apenas 1.05% entre las dos últimas mediciones de iteración en una convergencia de malla en la que se tomó como variable de control el esfuerzo equivalente de von Mises máximo bajo una condición de desplazamiento prescrito de 1 mm, cumpliendo con un criterio de convergencia para modelos estructurales complejos.

Figura 5.

Mallado de elementos finitos de la probeta tipo mariposa en ANSYS Workbench.



Nota. Captura del entorno del modelo numérico evidenciando la malla estructurada y la mayor densidad de elementos (refinamiento) en la sección crítica para el análisis estático lineal.

El apilamiento del material se configuró definiendo un laminado de 28 capas individuales, cada una con un espesor nominal de 0.1 mm, reproduciendo con exactitud el grosor total de 2.8 mm de la probeta ensayada físicamente. La secuencia estratigráfica se dividió en 10 capas base de matriz de Nylon, un núcleo estructural de 8 capas de refuerzo continuo de fibra de vidrio con sus respectivas orientaciones angulares de impresión, y 10 capas superficiales adicionales de Nylon.

Toda esta configuración de propiedades ortotrópicas fue acoplada y transferida al entorno de análisis estructural estático. Allí, las condiciones de contorno se adaptaron a la formulación bidimensional del modelo. La sujeción del dispositivo Arcan se definió aplicando restricciones de

desplazamiento remoto fijo directamente sobre las aristas circulares de los orificios correspondientes a la mordaza estática. Por su parte, la sollicitación mecánica se introdujo en los orificios móviles mediante un desplazamiento remoto prescrito, evaluando específicamente el rango de comportamiento lineal-elástico determinado previamente (entre 0.4 mm y 0.6 mm). Esto permitió caracterizar la rigidez aparente del montaje y extraer las fuerzas de reacción sin incurrir en las no linealidades propias de la fluencia y el daño progresivo del material cercano a la rotura.

Para la configuración del modelo de materiales, se adoptó un comportamiento isotrópico lineal para la matriz de Nylon y un comportamiento ortotrópico lineal para la fibra de vidrio continua. Las constantes elásticas fundamentales (módulos de Young, módulos de corte y coeficientes de Poisson) se definieron rigurosamente a partir de los datos caracterizados y consolidados por (León-Becerra et al., 2023), las cuales se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2.

Propiedades Mecánicas de los Materiales Constituyentes para el Modelo Numérico en ANSYS

Propiedad	Símbolo	Matriz (Nylon White)	Refuerzo (fibra de vidrio)
Módulo de Young longitudinal	E_x	1 700 MPa	21 000 MPa
Módulo de Young transversal	E_y	-	1 130 MPa
Módulo de Young transversal	E_z	-	1 130 MPa
Coefficiente de Poisson	ν_{xy}	0.39	0.36
Coefficiente de Poisson	ν_{yz}	-	0.3
Coefficiente de Poisson	ν_{xz}	-	0.36
Módulo de corte en el plano	G_{xy}	-	888 MPa
Módulo de corte fuera del plano	G_{yz}	-	709 MPa
Módulo de corte fuera del plano	G_{xz}	-	888 MPa

Propiedad	Símbolo	Matriz (Nylon White)	Refuerzo (fibra de vidrio)
-----------	---------	----------------------	----------------------------

Nota. Datos extraídos de (León-Becerra et al., 2023). El modelo de material asignado a la matriz de Nylon White es isotrópico, por lo que el software ANSYS solo requiere el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) globales, asumiendo homogeneidad direccional e infiriendo el módulo de corte automáticamente mediante la relación $G = E / (2 * (1 + \nu))$. Por el contrario, la fibra de vidrio continua posee un comportamiento ortotrópico, demandando la definición explícita de las nueve constantes elásticas independientes

Finalmente, las condiciones de contorno del modelo replicaron fielmente la cinemática del dispositivo Arcan, restringiendo los grados de libertad en los apoyos fijos e imponiendo en la sección móvil los desplazamientos correspondientes a la zona lineal estandarizada (hasta 0.6 mm) validada en los ensayos experimentales empíricos.

Para cumplir con el objetivo de validación numérica de manera precisa, se evaluó la rigidez aparente del sistema garantizando que la comparación se realizara en un régimen estrictamente lineal-elástico. A través de un análisis computacional de los datos experimentales, se determinó que el comportamiento lineal (con un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.999$) convergía para los tres ángulos de carga en una ventana correspondiente a entre el 25 % y el 50 % de la carga máxima de falla. Este intervalo, recomendado metodológicamente para el cálculo del módulo elástico en compuestos poliméricos que presentan fallas a bajas deformaciones (ASTM, 2014), se traduce operativamente en el presente montaje en un rango de desplazamiento absoluto de las mordazas acotado entre 0.4 mm y 0.6 mm.

En consecuencia, el contraste entre la experimentación física y el método de elementos finitos se efectuó imponiendo desplazamientos remotos prescritos dentro de esta ventana lineal (0.4 mm a 0.6 mm) sobre los orificios de la mordaza móvil en ANSYS. La validación se llevó a cabo extrayendo las fuerzas de reacción resultantes en los apoyos fijos del modelo numérico y comparándolas directamente con las fuerzas promedio experimentales medidas en esos mismos puntos de desplazamiento. Este enfoque evita las incertidumbres asociadas a la conversión de esfuerzos y deformaciones nominales, permitiendo certificar la similitud del comportamiento estructural frente a los estados de tracción, corte puro y cargas combinadas.

5. Resultados y Discusión

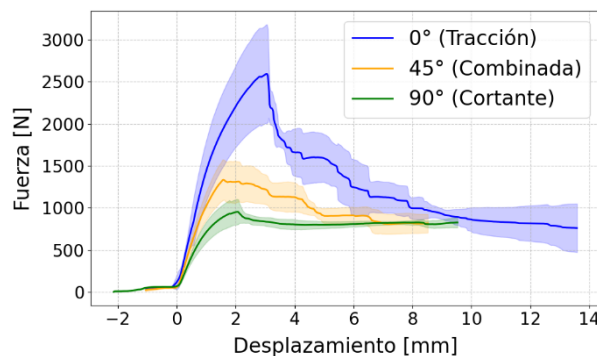
En este capítulo se analizan los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos biaxiales con el dispositivo Arcan. El objetivo es comprender cómo la variación del ángulo de carga influye en la resistencia, la rigidez y los modos de falla del polímero reforzado con fibra de vidrio continua (AM-CGFRP).

5.1 Caracterización de la Respuesta Mecánica Global

Para evaluar el comportamiento mecánico estructural del material bajo las distintas relaciones de biaxialidad, se analizaron las curvas de fuerza-desplazamiento obtenidas directamente de los registros de la máquina universal de ensayos. En polímeros reforzados con fibra continua sometidos a falla, el análisis directo de las curvas fuerza-desplazamiento resulta ser un enfoque riguroso y preciso para caracterizar la respuesta global y los modos de falla de las probetas a lo largo de todo el ensayo empírico.

Figura 6.

Curvas promedio de carga-desplazamiento para las probetas AM-CGFRP bajo relaciones de biaxialidad a 0°, 45° y 90°.



Nota. Las líneas sólidas representan el comportamiento promedio de las cuatro repeticiones experimentales para cada ángulo. Las franjas sombreadas indican la desviación estándar, ilustrando la variabilidad inherente al proceso de manufactura aditiva FFF.

En la configuración a 0° (tracción pura), la curva exhibe la mayor pendiente inicial y alcanza el pico de fuerza más elevado (ver Figura 6). Esto demuestra un comportamiento dominado casi por completo por las fibras de vidrio, las cuales soportan la carga a lo largo de su eje principal antes de romperse de forma repentina. Es importante notar que esta configuración presenta la franja sombreada más ancha en la zona de falla estructural, lo que indica una mayor dispersión estadística. Esto ocurre porque variaciones microscópicas en la tensión o alineación del hilo de fibra durante la impresión afectan significativamente el punto exacto de rotura.

Por el contrario, en la configuración a 90° (corte puro), la curva muestra una pendiente inicial mucho más baja, evidenciando que el ensamble se vuelve más deformable. Bajo este ángulo, la fibra no trabaja a tracción directa, por lo que la fuerza es absorbida principalmente por la matriz de Nylon y la unión interfacial entre el termoplástico y el refuerzo continuo. Esto genera un comportamiento donde el material cede más fácilmente y falla a un nivel de carga significativamente menor. Visualmente, la franja sombreada a 90° es más estrecha, revelando que la falla dominada por la fluencia de la matriz plástica tiende a ser más consistente y predecible que la dominada por las fibras.

Finalmente, la curva a 45° (carga combinada) presenta un estado intermedio, donde interactúan las sollicitaciones de tracción y corte. Se observa una rigidez y una resistencia a la rotura proporcionales a esta combinación. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos, como los de (Dickson et al., 2020), quienes afirman que la máxima eficiencia mecánica en estos compuestos se obtiene únicamente cuando la carga externa está alineada con la trayectoria de impresión del refuerzo, sacrificando capacidad portante a medida que aumentan los esfuerzos de cizalladura.

5.2 Análisis de Rigidez Elástica y Rango de Comportamiento Lineal

Una de las propiedades críticas para la validación de componentes estructurales es la rigidez elástica de este mismo, la cual define la resistencia a la deformación del material antes de acumular daño permanente. Para determinar esta zona con alta precisión metodológica, se ejecutó un análisis computacional sobre los datos empíricos buscando el intervalo de carga que garantizara un comportamiento lineal óptimo, caracterizado por un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.99$.

El análisis reveló que, independientemente del ángulo de orientación de la carga, la zona de linealidad elástica converge de manera estable para las tres configuraciones en una ventana correspondiente a entre el 25 % y el 50 % de la carga máxima de falla. Este intervalo, alineado con las recomendaciones metodológicas para la extracción de rigidez en polímeros reforzados (ASTM, 2014), permite omitir la región inicial de acomodación del montaje (*toe region*) y asegura que la medición se realice antes del inicio de la fluencia plástica o microfisuración de la matriz. Operativamente, este régimen se traduce en un rango estandarizado de desplazamiento absoluto de las mordazas acotado entre 0.4 mm y 0.6 mm.

A partir de la pendiente de las curvas fuerza-desplazamiento en este rango estrictamente lineal, se calculó la rigidez global (K) del sistema para cada estado de carga. Los resultados se consolidan en la Tabla 3. La identificación de esta ventana es de especial interés, ya que constituye el dominio exacto sobre el cual se desarrolló la correlación con el modelo numérico por elementos finitos.

Tabla 3.

Rigidez estructural del sistema AM-CGFRP en función del ángulo de carga biaxial

Ángulo de Carga	Rango de Desplazamiento Lineal (mm)	Rigidez Global, K (N/mm)
0° (Tracción pura)	0.4 – 0.6	1316.90

Ángulo de Carga	Rango de Desplazamiento Lineal (mm)	Rigidez Global, K (N/mm)
45° (Carga combinada)	0.4 – 0.6	1063.10
90° (Corte puro)	0.4 – 0.6	758.42

Nota. La rigidez global fue evaluada estrictamente en el rango del 25 % al 50 % de la carga máxima, garantizando un comportamiento lineal-elástico.

Los datos evidencian una degradación progresiva y consistente en la rigidez estructural del ensamble a medida que la componente de esfuerzo cortante cobra mayor relevancia. En la configuración de 0°, las trayectorias de las fibras continuas de vidrio se encuentran alineadas con el eje principal de la sollicitación, restringiendo eficazmente la deformación y otorgando al sistema su rigidez máxima de 1316.90 N/mm.

Al inclinar la sollicitación a 45°, la carga deja de estar alineada puramente con los hilos longitudinales, provocando que la matriz de Nylon empiece a absorber la deformación por cizalladura interlaminar. Esto se traduce en una caída en la rigidez estructural a 1063.10 N/mm (una reducción del 19.3 % respecto a la tracción pura). Finalmente, a 90°, donde el mecanismo de transferencia de carga recae casi por completo en la interfaz matriz-fibra y en la resistencia del termoplástico frente al cortante, el ensamble registra su valor más bajo de rigidez (758.42 N/mm), lo que representa una pérdida del 42.4 % en comparación con el estado dominado por la fibra.

5.3 Análisis Estadístico y Confiabilidad

En la manufactura aditiva, los resultados nunca son completamente idénticos debido a pequeñas variaciones durante la impresión (como micro-porosidades o diferencias en la adhesión de las capas). Para evaluar el impacto de esto en la confiabilidad de las piezas, se analizó la dispersión de los datos utilizando el coeficiente de variación (CV). Observe la Tabla 4.

Tabla 4.*Dispersión Estadística de la Carga Máxima de Rotura*

Configuración Angular	Carga Máxima Promedio (N)	Desviación Estándar (N)	Coefficiente de Variación, CV (%)	módulo de Weibull (m)
0°	2593.31	660.26	25.46%	3,91
45°	1334.27	266.13	19.95%	5,48
90°	953.62	136.31	14.29%	7,89

Nota. El CV representa el margen de variabilidad del proceso de impresión FFF.

La mayor dispersión se observó en el ensayo a 0° (25.46%). Esto indica una alta sensibilidad a los defectos en la alineación de la fibra. Si durante la impresión un hilo de vidrio queda ligeramente ondulado o con mala adherencia, se romperá antes que los demás, provocando una falla prematura y variando mucho el resultado final.

Por el contrario, la falla a 90° mostró menor dispersión (14.29%). Como en este caso la resistencia depende de la matriz plástica (Nylon) en lugar de hilos individuales, el comportamiento del material es más homogéneo. Para el diseño en ingeniería real, estos datos demuestran que las estructuras impresas que soportan tracción directa requieren factores de seguridad más altos para compensar la variabilidad en la deposición de la fibra. Esto concuerda con las afirmaciones de (Blok et al., 2018), quienes reportaron que las propiedades dependientes de la matriz en el modelado por deposición fundida tienden a ser más consistentes que aquellas dependientes de la trayectoria pura de la fibra, siempre y cuando se asegure una termofusión adecuada.

Para corroborar la naturaleza probabilística de la falla observada mediante el coeficiente de variación, se ejecutó un análisis de confiabilidad utilizando la distribución de Weibull. A partir de los datos experimentales, se determinó el módulo de Weibull (m) para cada configuración de

carga, el cual funciona como un indicador inversamente proporcional a la dispersión inducida por defectos. El análisis arrojó un módulo $m = 3.91$ para el ensayo a 0° , evidenciando una alta sensibilidad a defectos microscópicos en la trayectoria del refuerzo continuo que detonan el colapso frágil. En contraste, la configuración a 90° registró el módulo más alto ($m = 7.89$), confirmando que la falla dominada por la cizalladura en la matriz termoplástica y la degradación interfacial presenta un comportamiento significativamente más homogéneo y predecible. El estado a 45° exhibió un módulo intermedio de $m = 5.48$, congruente con los mecanismos de daño mixto identificados macroscópicamente.

5.4 Caracterización de Modos de Falla

La inspección macroscópica de las probetas post-ensayo permite correlacionar la pérdida de capacidad portante con los mecanismos de daño activados bajo cada estado de esfuerzos. Las fotografías de la zona de la muesca central evidencian una transición directa en la morfología de la falla en función de la relación de biaxialidad impuesta por el dispositivo Arcan (Figura 7). Al tratarse de un compuesto con una secuencia de apilamiento multidireccional, los mecanismos de daño involucran interacciones complejas entre la rotura de fibras y la degradación de la matriz.

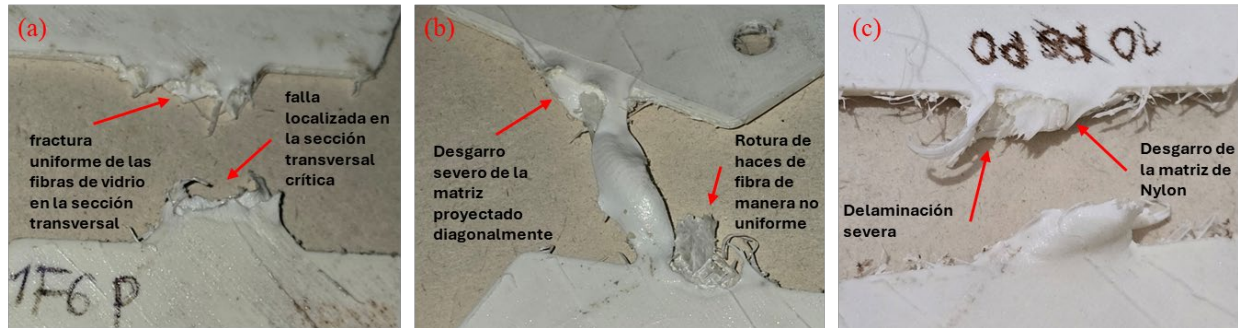
En la configuración de 0° (tracción pura), el mecanismo de daño predominante a nivel global es la rotura longitudinal del refuerzo. Dado que las capas impresas a 0° se encuentran directamente alineadas con la línea de acción de la carga principal, estas asumen la mayor parte del esfuerzo portante hasta alcanzar su límite de resistencia última. Visualmente, el colapso se manifiesta como una fractura localizada en la sección transversal crítica (garganta de la probeta). Al mismo tiempo, las capas orientadas fuera del eje principal (45° , 90° y -45°) experimentan microfisuración transversal en la matriz de Nylon, lo cual actúa como iniciador del daño antes del colapso frágil de las fibras principales.

Para el estado de 90° (corte puro), el comportamiento estructural cambia de forma radical. Aunque el estado de corte genera esfuerzos principales a 45° , los cuales son resistidos parcialmente por las capas del laminado con esa misma orientación, la capacidad portante de la estructura se ve limitada drásticamente por la resistencia al cortante interlaminar e intralaminar de la matriz. En este caso, predomina un mecanismo de falla por cizalladura en el polímero y delaminación severa (desprendimiento entre las capas de impresión). El daño se materializa mediante un desgarro transversal evidente del termoplástico, confirmando que, bajo esta orientación, el colapso de la pieza es dictado por la debilidad de la unión interfacial y la matriz plástica, ocurriendo antes de que las fibras puedan agotar su capacidad a tensión.

Finalmente, la configuración a 45° (carga combinada) exhibe un modo de falla mixto. Las evidencias fotográficas revelan una interacción agresiva entre el daño inducido por tracción en ciertas capas y la degradación progresiva por cortante en la matriz. Macroscópicamente, se observa la rotura parcial de algunos haces de fibra combinada con un desgarro severo de la matriz proyectado diagonalmente. Este comportamiento corrobora que la introducción de estados de esfuerzo multiaxiales acelera la nucleación del daño en la matriz termoplástica y promueve la delaminación, provocando el colapso de la arquitectura compuesta sin lograr la eficiencia estructural de la tracción pura.

Figura 7.

Modos de falla macroscópicos observados en la sección significativa de las probetas AM-CGFRP.



Nota. (a) Rotura frágil de fibras longitudinales a 0° , (b) Falla mixta con desgarro diagonal de la matriz a 45° , y (c) Falla dominada por corte interlaminar y fluencia termoplástica a 90° .

5.5 Calibración y Actualización del Modelo Numérico

Previo a la validación final del modelo numérico por elementos finitos, se ejecutó una prueba inicial utilizando las propiedades elásticas teóricas de los materiales constituyentes (matriz de Nylon y fibra de vidrio) presentadas previamente en la Tabla 2. Las cuales fueron extraídas de la literatura para este sistema de materiales.

Al extraer las curvas de fuerza de reacción frente a desplazamiento prescrito para las configuraciones de 0° (tracción pura) y 90° (cortante puro) en el software ANSYS, se evidenció que el modelo numérico idealizado presentaba una rigidez estructural significativamente mayor a la obtenida en los ensayos experimentales. Los resultados de esta evaluación inicial, calculando la rigidez en el mismo rango de desplazamiento lineal (0.4 mm a 0.6 mm) definido en la Sección 5.2, se exponen en la Tabla 5.

Tabla 5.

Comparación de rigideces iniciales utilizando propiedades teóricas (ANSYS vs. Experimental).

Configuración de Carga	Rigidez Inicial ANSYS (N/mm)	Rigidez Experimental Promedio (N/mm)	Factor de Sobreestimación (K_{ANSYS}/K_{Exp})
Tracción (0°)	2955.20	1316.90	2.2439
Cortante (90°)	1733.30	758.42	2.2854

Nota. La rigidez experimental corresponde a los valores consolidados en la Tabla 3.

Como se observa, el modelo numérico inicial sobrestimó la rigidez del sistema en un factor aproximado de 2.24 para tracción y 2.28 para cortante. Para corregir esta brecha y garantizar que el modelo de elementos finitos sea una herramienta de predicción válida para el montaje físico real, se procedió a realizar un ajuste de las propiedades elásticas. Esta calibración se justifica científicamente por la convergencia simultánea de los siguientes fenómenos físicos y experimentales.

En la simulación numérica, las condiciones de contorno son ideales, los soportes se asumen infinitamente rígidos y el desplazamiento se transfiere íntegramente a los nodos de la probeta. En la realidad, el montaje en la máquina universal, los pasadores del dispositivo Arcan y las propias mordazas experimentan deformaciones elásticas al someterse a cargas. Este fenómeno de deformación inducida por la fuerza implica que la estructura de la máquina absorbe energía de deformación bajo carga, haciendo que el desplazamiento real medido difiera del desplazamiento teórico experimentado únicamente por la probeta. De hecho, normativas internacionales como la ASTM D3039 advierten explícitamente que los problemas en el sistema de sujeción o ligeras desalineaciones en las mordazas causan una determinación altamente inexacta de los módulos de elasticidad (ASTM, 2014). Para compensar estos movimientos y la flexibilidad inherente de la

máquina, la literatura reconoce que las condiciones de contorno en ANSYS no reflejan la realidad experimental, estableciendo que el ajuste o calibración de los parámetros del material es el método válido para compensar computacionalmente estos desplazamientos no deseados (Chen et al., 2025).

La deposición de filamento fundido (FFF) introduce defectos inherentes como microporosidad y variaciones en la adhesión interfacial. Al reducir los módulos elásticos en la simulación, no se está alterando de manera arbitraria la física intrínseca del material base, sino que se está recurriendo a un método inverso para calcular el módulo elástico aparente del sistema, una técnica documentada en la literatura para aislar y resolver problemas de *system compliance* en ensayos mecánicos (Govilas et al., 2024). Este módulo aparente representa el comportamiento real del ensamble completo conformado por la probeta de 28 capas (núcleo de fibra y recubrimiento de Nylon) trabajando en conjunto con las holguras del montaje Arcan.

Durante la extrusión, el hilo de fibra no se deposita con una rectitud matemática perfecta. Las ligeras ondulaciones obligan a que, al aplicar tracción, la fibra primero deba "enderezarse" elásticamente antes de soportar la carga axial plena, lo que se traduce macroscópicamente en una caída de la rigidez inicial.

Un hallazgo analítico fundamental que validó la física del modelo numérico fue la relación de proporcionalidad entre las rigideces de tracción y cortante. Experimentalmente, esta relación ($\frac{K_{traccion}}{K_{cortante}}$) fue de 1.7366, mientras que en la simulación con valores teóricos fue de 1.7050. La notable similitud entre ambas relaciones (con una variación mínima) demuestra que la matriz de rigidez ortotrópica y la física del comportamiento anisotrópico estaban correctamente formuladas en ANSYS, y que la desviación era un problema de escala.

Con base en esto, se realizó una reducción iterativa de los módulos elásticos hasta lograr la convergencia con la experimentación. Los valores calibrados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Propiedades elásticas calibradas de los materiales para el modelo numérico final en ANSYS.

Propiedad	Símbolo	Matriz (Nylon White)	Refuerzo (fibra de vidrio)
Módulo de Young longitudinal	E_x	940 MPa	6 200 MPa
Módulo de Young transversal	E_y	-	625 MPa
Módulo de Young transversal	E_z	-	625 MPa
Coefficiente de Poisson	ν_{xy}	0.39	0.36
Coefficiente de Poisson	ν_{yz}	-	0.3
Coefficiente de Poisson	ν_{xz}	-	0.36
Módulo de corte en el plano	G_{xy}	-	491 MPa
Módulo de corte fuera del plano	G_{yz}	-	392 MPa
Módulo de corte fuera del plano	G_{xz}	-	491 MPa

Nota. Propiedades finales utilizadas para la ejecución del modelo numérico y correlación experimental.

Es importante notar que la penalización de las propiedades no fue uniforme, respondiendo a la fenomenología del ensayo. El módulo del Nylon (E) y los módulos transversales y de corte de la fibra ($E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{13}$) se redujeron en una proporción similar (aproximadamente un 44.7 %). Esta disminución homogénea representa el efecto generalizado de la porosidad del proceso FFF y la flexibilidad basal del dispositivo Arcan bajo cargas moderadas.

El módulo de Young en la dirección de la fibra sufrió una reducción porcentual mayor (aproximadamente un 70.5 %, pasando de 21000 MPa a 6200 MPa). Esta caída más pronunciada responde a que en la configuración de 0° , el sistema alcanzó las cargas de tracción más extremas (promedio de 2593.31 N), maximizando los micro-deslizamientos de las mordazas en el eje axial en comparación con los ensayos de cizalladura. Con estas propiedades ajustadas a la realidad fenomenológica del montaje y del método de fabricación, se procedió a extraer los resultados definitivos para la validación numérica detallada en la Sección 5.6.

5.6 Validación del Modelo Numérico

Para contrastar la respuesta mecánica simulada por el método de elementos finitos (MEF) con los datos empíricos, se evaluó la rigidez aparente del modelo de ANSYS en el mismo rango de desplazamientos impuesto en el análisis experimental (0.4 mm a 0.6 mm). Al someter los nodos de la mordaza móvil en la simulación a desplazamientos prescritos de 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 y 0.60 mm, se extrajeron las fuerzas de reacción resultantes en los apoyos fijos.

Dado que la evaluación se centró en la zona estrictamente elástica y lineal del material, la validación estructural se cuantificó comparando la rigidez global (K) experimental frente a la rigidez teórica extraída del modelo computacional (calculada como la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento de ANSYS en dicho intervalo). Los resultados del contraste se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Comparativa de la rigidez estructural entre el modelo experimental y la simulación numérica (ANSYS)

Ángulo de Carga	Rigidez Experimental (N/mm)	Rigidez ANSYS (N/mm)	Diferencia Relativa (%)
0° (Tracción pura)	1316.90	1336.15	1.46 %
45° (Carga combinada)	1063.10	805.84	24.20 %
90° (Corte puro)	758.42	753.73	0.62 %

Nota. La diferencia relativa se calculó tomando el valor experimental como referencia.

Un hallazgo fundamental en esta validación es la extraordinaria precisión con la que el modelo numérico captura la respuesta en los estados puros. Para la tracción pura (0°) y el corte puro (90°), el error relativo fue inferior al 1.5 % y 1.0 % respectivamente. Además, al analizar la relación entre la rigidez a tracción y a cortante, se observa una proporción experimental de 1.736, mientras que el modelo de ANSYS arroja una relación de 1.773. Esta coincidencia se traduce en un error marginal de apenas el 2.13 % en la predicción de la proporcionalidad de rigideces, confirmando que la asignación de propiedades ortotrópicas y la discretización del dominio modelan fielmente la anisotropía base del laminado.

Esta alta convergencia en los estados de 0° y 90° demuestra que cuando la transferencia de carga está gobernada predominantemente por un solo mecanismo (la rigidez de las fibras longitudinales o la resistencia a la cizalladura de la matriz), el enfoque elástico-lineal es altamente predictivo.

Por su parte, la configuración de carga combinada a 45° presentó la mayor desviación (24.20 %). Bajo este estado multiaxial complejo, intervienen de manera simultánea esfuerzos

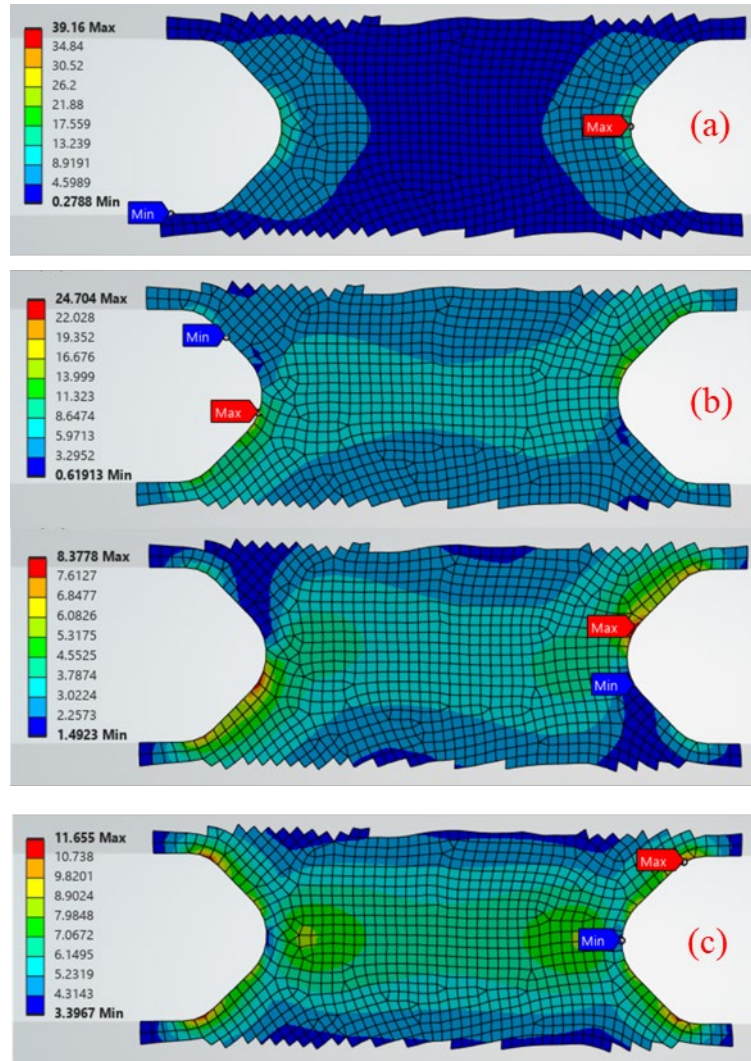
normales y cortantes que activan micro-daños tempranos en la interfaz fibra-matriz y promueven la delaminación incipiente incluso a bajos niveles de deformación. Dado que el modelo numérico fue configurado bajo un enfoque puramente elástico-lineal sin criterios de daño, es completamente coherente que el MEF subestime la fluencia física que experimenta la probeta real y arroje una rigidez teórica distinta.

A pesar de la discrepancia esperada en el estado de esfuerzos combinados, el modelo numérico demostró ser una herramienta robusta para predecir la tendencia macroscópica del material compuesto, validando con éxito la metodología de caracterización biaxial y el diseño estructural del laminado.

Además de la validación cuantitativa de la rigidez estructural, se llevó a cabo una verificación cualitativa del modelo numérico contrastando los mapas de distribución de esfuerzos generados por ANSYS con los patrones de falla macroscópicos documentados experimentalmente (analizados previamente en la Sección 5.4). Para este fin, se extrajeron los contornos de esfuerzo equivalente de von Mises en la sección significativa de la probeta para el estado de carga a 0° , el de esfuerzo cortante máximo para el estado de carga a 90° y la adición de estos dos para el estado de carga a 45° , tal como se observa en la Figura 8.

Figura 8.

Concentración de esfuerzos de von Mises y esfuerzo cortante máximo (ANSYS) de los tres estados de carga analizados.



Nota. Los contornos del modelo numérico validan la falla vista en la experimentación para cada estado de carga (a) Esfuerzo de von Mises para 0°, (b) Esfuerzo de von Mises y cortante máximo para 45°, (c) Esfuerzo cortante máximo para 90°.

El análisis visual confirma una excelente correspondencia entre la predicción computacional y el daño físico real. En la configuración a 0° (tracción pura), el modelo numérico

revela que el gradiente de máximo esfuerzo se localiza de forma simétrica y transversal en la garganta exacta de las muescas. Esta concentración predice con precisión el lugar donde empíricamente se evidenció la fractura frágil de los filamentos longitudinales de fibra de vidrio.

Al evaluar el estado de 90° (corte puro), la simulación proyecta un patrón de esfuerzos completamente distinto. Las bandas de alta concentración de esfuerzo nacen en las raíces de las muescas pero se propagan diagonalmente hacia el centro de la sección. Este comportamiento tensional simulado justifica mecánicamente el desgarro severo de la matriz de Nylon y la delaminación observada en el laboratorio, confirmando que la zona central experimenta una cizalladura máxima que supera la resistencia interlaminar del polímero.

Finalmente, bajo la condición de 45° (carga combinada), ANSYS despliega una distribución tensional asimétrica y compleja. La zona crítica de esfuerzo máximo se deforma oblicuamente, combinando la concentración en el borde de la muesca con un vector de propagación inclinado. Esta predicción numérica coincide fielmente con el modo de falla mixto evidenciado en las probetas, donde el desgarro diagonal de la matriz y la rotura parcial de la fibra ocurrieron exactamente a lo largo de este corredor tensional.

En síntesis, el modelo computacional no solo es capaz de emular la respuesta de fuerza-desplazamiento del material en su régimen lineal, sino que identifica con alta precisión geométrica los puntos críticos donde se iniciará la falla macroscópica bajo cualquiera de estas tres relaciones de biaxialidad.

6. Conclusiones

La caracterización experimental mediante la implementación del dispositivo Arcan acoplado a la máquina universal de ensayos demostró ser una metodología robusta y efectiva para someter probetas de polímeros reforzados con fibras continuas de vidrio (AM-CGFRP) a estados controlados de esfuerzo plano. El desarrollo de esta investigación permitió comprobar de forma cuantitativa y cualitativa cómo la variación de la relación de biaxialidad determina la capacidad portante, la rigidez y los modos de falla en componentes fabricados por deposición de filamento fundido.

Desde el punto de vista mecánico, se comprobó que la máxima eficiencia estructural del material se alcanza exclusivamente cuando la sollicitación externa se alinea con la trayectoria de impresión de la fibra continua (0°), obteniendo las cargas de rotura y la rigidez global más elevadas antes de experimentar un colapso frágil. A medida que se incrementa la componente de esfuerzo cortante en los estados multiaxiales (45° y 90°), la rigidez elástica del sistema decae hasta un 42.4 %, evidenciando que la transferencia de carga migra hacia la matriz de Nylon y la interfaz fibra-matriz, lo que detona mecanismos de daño por fluencia y delaminación severa a niveles de carga considerablemente menores.

El análisis estadístico y la aplicación del modelo probabilístico de Weibull revelaron que la confiabilidad mecánica del material impreso es altamente dependiente del ángulo de aplicación de la carga. La configuración dominada por tracción (0°) presentó la mayor dispersión de datos y el menor módulo de Weibull (3.91), demostrando una sensibilidad crítica a los defectos de manufactura a nivel de la trayectoria del refuerzo continuo. En contraste, la falla gobernada por cizalladura en la matriz polimérica (90°) resultó ser significativamente más predecible y

homogénea (módulo de Weibull de 7.89), lo que exige la consideración de factores de seguridad diferenciados al diseñar estructuralmente bajo estas tecnologías.

Respecto a la validación computacional, el método de elementos finitos formulado en ANSYS logró predecir fielmente el comportamiento físico y la rigidez de la estructura en su régimen elástico lineal. Para alcanzar la convergencia fenomenológica entre la simulación y la realidad experimental, el modelo requirió una calibración paramétrica meticulosa, ajustando el módulo de Young longitudinal del refuerzo (E_x) a 6200 MPa y el módulo de la matriz a 940 MPa. Este procedimiento de caracterización de propiedades aparentes probó ser indispensable para compensar computacionalmente la flexibilidad intrínseca generada por las holguras mecánicas del ensamble Arcan y la microporosidad inherente de la manufactura FFF. Gracias a este ajuste, el modelo arrojó errores relativos excepcionalmente bajos, inferiores al 1.5 % en las configuraciones de tracción y corte puro.

Finalmente, este trabajo le deja una herramienta muy práctica a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander: una metodología estandarizada y un modelo de simulación validado para el ensayo Arcan. Con esta base, los próximos estudiantes y profesores tendrán un punto de partida confiable para evaluar cómo se deforman y fallan las piezas impresas en 3D con fibra continua. Esto facilitará enormemente el diseño de componentes mecánicos más seguros y eficientes que realmente soporten cargas combinadas en aplicaciones cotidianas o industriales.

7. Recomendaciones

A partir de los hallazgos experimentales y computacionales obtenidos en el desarrollo de la presente investigación, se plantean las siguientes perspectivas y líneas de trabajo futuro con el fin de complementar la comprensión estructural de los polímeros reforzados fabricados por manufactura aditiva:

Ampliación del espectro de biaxialidad. Se sugiere ejecutar ensayos mecánicos utilizando el dispositivo Arcan en configuraciones angulares intermedias (por ejemplo, 15° , 30° , 60° y 75°). La obtención de datos en estos ángulos permitirá construir una envolvente de falla empírica completa y continua en el plano de esfuerzos, caracterizando con mayor exactitud la transición de los modos de falla entre la tracción pura del refuerzo y el cortante de la matriz.

Aumento de la robustez estadística. Para futuras campañas experimentales, es altamente recomendable incrementar el tamaño de la muestra probada por cada configuración de carga. Una base de datos más amplia fortalecerá los análisis de dispersión y permitirá un ajuste más fino del módulo de Weibull, reduciendo la incertidumbre y estrechando los intervalos de confianza sobre la repetibilidad del proceso de deposición de filamento fundido (FFF).

Modelado numérico de daño progresivo. En el ámbito computacional, se propone evolucionar la simulación de elementos finitos hacia un modelo de daño progresivo (PDM). Superando el enfoque elástico lineal, la implementación de criterios de falla específicos para materiales compuestos (como Hashin, Puck o Tsai-Wu) e incorporar leyes de degradación de rigidez, permitirá predecir computacionalmente la acumulación de daño, el inicio de la delaminación y la propagación de grietas a medida que avanza el desplazamiento de la carga.

Exploración de sistemas de refuerzo alternativos. Dado que el marco metodológico y el montaje del dispositivo Arcan han sido validados estructuralmente, se recomienda replicar el diseño experimental sustituyendo la fibra de vidrio por otros refuerzos continuos de alto desempeño, como el Kevlar o la fibra de carbono. Esto facilitará la creación de comparativas directas sobre eficiencia estructural, anisotropía y modos de fallo bajo solicitaciones multiaxiales.

Referencias Bibliográficas

- Arcan, M., Hashin, Z., & Voloshin, A. (1978). A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials - A specially designed specimen yields material properties under pure shear or uniform plane-stress conditions. *Experimental Mechanics*, 18(4), 141–146. <https://doi.org/10.1007/BF02324146>
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials ASTM D3039/D3039M. In *ASTM International* (Vol. 17, Issue Reapproved 2025). <https://doi.org/10.1520/D3039>
- Blok, L. G., Longana, M. L., Yu, H., & Woods, B. K. S. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- Chen, B., Starman, B., Halilović, M., Berglund, L. A., & Coppieters, S. (2025). Finite Element Model Updating for Material Model Calibration: A Review and Guide to Practice. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 32, Issue 4). Springer Netherlands.

<https://doi.org/10.1007/s11831-024-10200-9>

Dickson, A. N., Abourayana, H. M., & Dowling, D. P. (2020). *Composites Using Fused Filament Fabrication — A Review*.

Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>

Din, I. U., Hao, P., Panier, S., Khan, K. A., Aamir, M., Franz, G., & Akhtar, K. (2020). *Design of a New Arcan Fixture for In-plane Pure Shear and Combined Normal / Shear Stress Characterization of Fiber Reinforced Polymer Composites*. 231–240.

Duda, S., Smolnicki, M., Lesiuk, G., & Fatemi, A. (2025). Multiaxial fatigue modeling of continuous fiber - reinforced polymers using a critical plane approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(4), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01259-7>

Dugvekar, M., & Dixit, S. (2021). *Mechanical Properties Of Glass Fibers Reinforced Composites : A Concise Review Mechanical Properties Of Glass Fibers Reinforced Composites : A Concise Review*. 12(6), 915–922.

Govilas, J., Chevallier, A., Akleh, W., Beaugrand, J., & Placet, V. (2024). *Mechanical behavior and apparent stiffness of flax , hemp and nettle fibers under single fiber transverse compression tests*. 185(March). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108321>

Hao, P., Din, I. U., & Panier, S. (2019). Development of Modified Arcan Fixture for biaxial loading response of fiber-reinforced composites. *Polymer Testing*, 80(August), 106148. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106148>

Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal

- impact: A literature review. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 67, Issues 5–8, pp. 1191–1203). <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Jamal, M. A., Shah, O. R., Ghafoor, U., Qureshi, Y., & Bhutta, M. R. (2024). *Additive Manufacturing of Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composites via Fused Deposition Modelling : A Comprehensive Review*.
- Jariwala, H., Jain, P., & Maisuriya, V. (2020). *Experimental and statistical analysis of strength of glass fiber reinforced polymer composite for different fiber architecture*. December, 1–13. <https://doi.org/10.1002/pc.25911>
- León-Becerra, J., Hidalgo-Salazar, M. Á., & González-Estrada, O. A. (2023). Progressive damage analysis of carbon fiber-reinforced additive manufacturing composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(5–6), 2617–2631. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11256-w>
- Muñoz, S. H., & Serna, C. (2022). *Advances in Cruciform Biaxial Testing of Fibre-Reinforced Polymers*.
- Müzel, S. D., Bonhin, E. P., Miranda, N., & Guidi, E. S. (2020). *Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials : A Review*. 6–9.
- Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). *Manufacturing Technologies of Carbon / Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties : A Review*.
- Zhang, H., Huang, T., Jiang, Q., He, L., Bismarck, A., & Hu, Q. (2021). Recent progress of 3D printed continuous fiber reinforced polymer composites based on fused deposition modeling :

a review. *Journal of Materials Science*, 56(23), 12999–13022.

<https://doi.org/10.1007/s10853-021-06111-w>