

Análisis mecánico de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva con refuerzo de fibra de carbono y recubrimiento de pla, evaluadas mediante ensayo arcan y seguimiento de imágenes 2d para su aplicación en el diseño de un chasis de dron

Julian David Vega Lizarazo

Manuel Alejandro Melo Rueda

Daniel Mateo Rodriguez Lopez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director UIS

WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ

Dr. Ingeniería Mecánica, Profesor

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado, con todo mi amor y gratitud, a la mujer que convirtió cada obstáculo en una oportunidad, mi madre **Esmeralda Lizarazo Díaz**, quien ha sido el pilar más importante de mi vida. Así como una esmeralda representa una joya preciosa, fuerte y llena de valor, ella ha sido para mí el tesoro más grande que Dios pudo poner en mi camino. Su amor incondicional, su sacrificio silencioso, sus consejos y su capacidad de nunca rendirse me enseñaron que los sueños se alcanzan con esfuerzo, disciplina y fe.

Cada logro que hoy alcanzo lleva consigo el reflejo de su entrega, de las noches de preocupación, de las palabras de aliento en los momentos difíciles y de la confianza que siempre depositó en mí, incluso cuando yo mismo dudaba. Gracias a Dios por regalarme una madre tan admirable, capaz de darlo todo por el bienestar y el futuro de su hijo.

Este trabajo no solo representa años de estudio y dedicación, sino también el resultado de todos los sacrificios que ella realizó para verme crecer como persona y como profesional. Por ello, este logro también es suyo.

A mi madre, mi inspiración eterna, mi orgullo y mi mayor bendición: gracias por enseñarme el verdadero significado del amor y la perseverancia.

Julian David Vega Lizarazo

Manuel Alejandro Melo Rueda

Dedico este proyecto de grado a mi familia, por ser el principal apoyo durante cada etapa de mi formación académica y personal. Gracias por acompañarme en los momentos de dificultad, por creer en mis capacidades y por motivarme constantemente a seguir adelante incluso cuando el camino parecía complicado. Este logro también es resultado del esfuerzo, la confianza y el apoyo que siempre me brindaron.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi madre, quien ha sido un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y dedicación a lo largo de mi vida. Gracias por cada sacrificio realizado, por cada consejo, por su apoyo incondicional y por impulsarme siempre a luchar por mis metas. Su confianza en mí fue fundamental para mantenerme firme durante este proceso y alcanzar este importante objetivo profesional.

Así mismo, dedico este proyecto a todas aquellas personas que creyeron en mí y en mis capacidades, quienes con sus palabras de apoyo, motivación y confianza contribuyeron de alguna manera a que hoy pueda culminar esta etapa tan importante. Cada enseñanza, consejo y muestra de apoyo hicieron parte de este camino y quedarán siempre presentes en este logro.

Dedicado a mi yo del pasado por no dejar de luchar, por soñar que con esfuerzo todo es posible.

Dedicado a mi familia, que a lo largo de este camino me han enseñado el valor del trabajo, de la perseverancia y de la dedicación.

Dedicado a mi Mel, que, con su apoyo, su amor, y su confianza en mí, me ha convertido en un ser mas exigente y creyente de mi mismo.

Dedicado a mis amigos, que en este camino me brindaron su apoyo, sus conocimientos y sus risas.

Dedicado a Dios, que por el, se que todo es posible con fe.

Daniel Mateo Rodríguez López

Agradecimientos

A Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada reto presentado durante mi formación académica y permitirme culminar satisfactoriamente esta etapa tan importante de mi vida. Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ser el espacio donde adquirí los conocimientos, experiencias y valores que contribuyeron a mi formación profesional y personal.

De manera especial, agradezco al profesor William Pinto Hernández por su orientación, apoyo, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de grado. Su experiencia, exigencia académica y compromiso con la investigación fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

Asimismo, agradezco a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, quienes a lo largo de mi carrera compartieron sus conocimientos y contribuyeron significativamente a mi formación como ingeniero mecánico.

A mis compañeros y amigos de carrera, gracias por cada momento compartido, por el apoyo mutuo, las largas jornadas de estudio, las experiencias vividas y las amistades construidas durante este proceso universitario. Cada uno de ustedes hizo más valioso este camino.

Finalmente, agradezco a mi familia por su amor, comprensión y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Gracias por creer siempre en mí y motivarme a seguir adelante aun en los momentos más difíciles. Este logro también les pertenece.

Julian David Vega Lizarazo

Manuel Alejandro Melo Rueda

Agradezco primero a Dios por brindarme salud, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi vida. Durante todo este proceso, su guía fue fundamental para superar los retos y dificultades que se presentaron, permitiéndome mantener la constancia y la determinación necesarias para alcanzar este objetivo.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y acompañamiento constante a lo largo de mi formación académica. Gracias por estar presentes en cada momento, por motivarme a seguir adelante y por brindarme la tranquilidad y confianza necesarias para continuar creciendo tanto personal como profesionalmente.

A mi madre, le agradezco profundamente por cada esfuerzo y sacrificio realizado para ayudarme a cumplir mis metas. Gracias por su amor, paciencia y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Su ejemplo de lucha y perseverancia ha sido una inspiración constante y una de las principales razones por las que hoy puedo alcanzar este logro académico.

Finalmente, agradezco a mi novia por su compañía, paciencia y comprensión durante el desarrollo de este proyecto de grado. Gracias por estar presente en los momentos de mayor exigencia, por brindarme apoyo emocional, motivación y tranquilidad cuando más lo necesitaba. Su apoyo y confianza fueron una parte muy importante para culminar satisfactoriamente este proceso.

Le agradezco a mis padres, Katherine y Daniel, por creer siempre en mí y en lo lejos que he de llegar en este camino, sin su confianza, no podría enfrentar las dificultades de la vida, a mi tía, Johanna, por sus consejos en los tiempos difíciles, a mi nona Mimi, por su amor incondicional, a mi hermano, Daniel Felipe, por su compañía en las noches de estudio y por sus ideas de pedir comida en esas noches, a Fredy, por sus consejos y su confianza puesta en mí, a mi prima, Sarita, por compartir este sueño y ser una figura seguir.

Quisiera agradecer a mi Mel, por su amor, por haber sido un apoyo constante durante este proceso. Gracias por escucharme en los momentos de cansancio, estrés y agotamiento. Gracias por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba, por confiar en mis capacidades. Por su paciencia, por su compañía y sus palabras de amor.

A mi director, William, por su guía, disposición y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, recomendaciones y acompañamiento fueron fundamentales para superar los retos de este proceso y alcanzar la culminación de esta etapa académica.

A mis maestros, Paula Andrea Cuervo Velásquez y Alberto David Pertuz Comas, por haberme mostrado el mundo del mantenimiento predictivo, y darme la confianza de ser su auxiliar, no lo sabíamos, pero aquello me abriría todo un mundo de oportunidades.

Agradezco a mis compañeros y amigos por compartir conmigo este camino, también es de ustedes. Gracias a Andrés Ramírez, Daniel Ardila, Rafael, Andrés Mayorga, Jorge, Manuel, Daniel Torres, Frank, y Andrés Flórez.

Por último, agradezco a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Laboratorio de ensayos estáticos, al Laboratorio de diseño 3D, a María René, por su paciencia y sus consejos.

Daniel Mateo Rodríguez López

Tabla de Contenido

Introducción	18
1 Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos	20
2 Marco Teórico	21
2.1 Manufactura Aditiva (Impresión 3D)	21
2.1.1 Evolución y principios de la manufactura aditiva	21
2.1.2 Tipos de tecnologías de impresión 3D	21
2.1.3 Versatilidad de la manufactura aditiva	21
2.2 Materiales Compuestos en la Manufactura Aditiva.....	22
2.2.1 Generación de materiales compuestos en MA	22
2.2.2 Uso de fibras de refuerzo en la impresión 3D	22
2.2.3 Ventajas y desafíos de los materiales compuestos con fibra de carbono	22
2.3 Fibra de Carbono como Material de Refuerzo.....	23
2.3.1 Propiedades mecánicas de la fibra de carbono	23
2.3.2 Efecto de la concentración de fibra de carbono en materiales compuestos	23
2.3.3 Configuraciones de relleno y sus efectos	23
2.4 Método Arcan Test.....	24
2.4.1 Fundamentos del Arcan Test	24
2.4.2 Aplicaciones del Arcan Test en el análisis de materiales compuestos	25
2.4.3 Ventajas del Arcan Test en manufactura aditiva.....	26
2.5 Correlación Digital de Imágenes (DIC).....	26
2.5.1 La DIC como técnica de medición no destructiva.....	26
2.5.2 Aplicaciones en estudios de materiales	26
2.5.3 Implementación del DIC en MATLAB	27
2.6 Análisis ANOVA	27

2.7	Chasis de Dron	28
2.7.1	Definición y función del chasis de dron	28
2.7.2	Materiales Comunes en la Fabricación de Chasis de Dron	28
2.7.3	Propiedades mecánicas requeridas y desafíos	29
3	Revisión Bibliográfica.....	30
4	Metodología	33
4.1	Diseño digital de la probeta	33
4.2	Configuración del proceso de impresión	34
4.3	Fabricación de las probetas	38
4.3.1	Montaje y captura de imágenes	40
4.4	Utilización del software NCORR v1.2	42
4.4.1	Ajustes iniciales y proceso analítico en NCORR	42
4.5	Procesamiento y representación de resultados	45
4.6	Diseño y selección del chasis de dron para validación estructural.....	46
4.7	Análisis estadístico de los datos experimentales.....	49
4.7.1	Justificación del análisis estadístico.....	49
4.7.2	Definición y extracción de variables para el análisis estadístico	50
4.7.3	Evaluación de la repetibilidad intra-configuración.....	52
4.7.4	Evaluación de posibles valores atípicos y criterio de exclusión	54
4.7.5	Resultados del proceso de depuración y verificación estadística	55
4.7.6	Construcción de la base de datos consolidada para análisis factorial	56
4.7.7	Estrategia de análisis factorial e interacciones evaluadas	57
4.7.8	Modelo estadístico aplicado	59
4.7.9	Verificación de supuestos del modelo ANOVA	59
4.8	Resultados parciales.....	61
4.8.1	Análisis de la rigidez	61
4.8.2	Análisis de la carga axial	65

4.8.3	Discusión: Análisis del comportamiento mecánico global	68
4.8.4	Determinación de Propiedades Mecánicas para Simulación.....	75
5	Análisis y resultados	80
5.1	Análisis integrado y selección de la mejor configuración	80
5.1.1	Tabla resumen de resultados experimentales y de simulación	80
5.2	Análisis de resultados experimentales.....	82
5.3	Correlación con los resultados de simulación.....	82
5.4	Selección de la mejor configuración	83
5.5	Ranking de configuraciones	84
6	Conclusiones.....	85
6.1	Conclusiones Y Recomendaciones	88
6.1.1	Conclusiones sobre la rigidez	88
6.1.2	Conclusiones sobre la capacidad de carga axial.....	89
6.1.3	Conclusiones sobre los mecanismos de deformación y falla	90
6.1.4	Conclusiones sobre la repetibilidad del proceso de impresión	91
6.1.5	Conclusiones sobre la metodología de análisis.....	91
6.1.6	Recomendaciones.....	91
	Referencias Bibliográficas	94
	Apéndices	96

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Representación gráfica de los diferentes perfiles de impresión	24
Figura 2. Ensayo arcan de una probeta sometida a una carga	25
Figura 3. Representación gráfica de la deformación	27
Figura 4. Representación Probeta plano	33
Figura 5. Representación de fabricacion aditiva	34
Figura 6. Representación Patrón de relleno	36
Figura 7. Representación probeta en Software	37
Figura 8. Proceso de impresión	38
Figura 9. Probeta impresa en impresión aditiva	39
Figura 10. Aislamiento de la probeta contra la humedad	40
Figura 11. Representación gráfica manchado en probeta	41
Figura 12. Probeta 0°	41
Figura 13. Probeta 45°	41
Figura 14. Probeta 90°	41
Figura 15. Representación grabación de ensayo arcan	42
Figura 16. Representación gráfica de la deformación	43
Figura 17. Representación gráfica de la deformación	43
Figura 18. Panel de configuración de resolución y mallado en NCORR	44
Figura 19. Panel de configuración de campos de desplazamiento en NCORR-2	44
Figura 20. Panel de configuración de campos de desplazamiento en NCORR	45
Figura 21. Panel de configuración de resolución de campos de deformación en NCORR ..	45
Figura 22. Panel de configuración de resolución de campos de deformación en Programa .	46
Figura 23. Modelo ensamblado del dron utilizado como referencia para el diseño.	47
Figura 24. Chasis estructural extraído del modelo del dron.....	48

Figura 25. Chasis estructural extraído del modelo del dron.....	48
Figura 26. curva de carga vs porcentaje de relleno	70
Figura 27. curva de carga vs ángulo de carga.....	72
Figura 28. Chasis en simulación	83
Figura 29. Configuración de densidad de relleno.....	97
Figura 30. Configuración de dirección de relleno	97
Figura 31. Ensayo mecánico Eyy-0	98
Figura 32. Ensayo mecánico Eyy-45°	99
Figura 33. Ensayo mecánico Eyy-90°	100
Figura 34. Ensayo mecánico V-0°	101
Figura 35. Ensayo mecánico V-45°	102
Figura 36. Ensayo mecánico V-90°	103
Figura 37. Tabla para interacción material–carga-0°	104
Figura 38. Tabla para interacción material–carga-45°	105
Figura 39. Tabla para interacción material–carga-90°	106
Figura 40. Tabla para interacción angulo–carga-22 %-FC	107
Figura 41. Tabla para interacción angulo–carga-30 %-FC	108
Figura 42. Tabla para interacción angulo–carga-44 %-FC	109
Figura 43. Tabla para interacción angulo–carga-100 %-FC	110
Figura 44. Tabla para interacción angulo–carga-100 %-PLA	111
Figura 45. Tabla para interacción angulo–configuración-20 %-nivel de carga	112
Figura 46. Tabla para interacción angulo–configuración-40 %-nivel de carga	113
Figura 47. Tabla para interacción angulo–configuración-60 %-nivel de carga	114
Figura 48. Tabla para interacción angulo–configuración-80 %-nivel de carga	115
Figura 49. Tabla para interacción angulo–configuración-100 %-nivel de carga	116
Figura 50. Curva de carga vs desplazamiento 0° - 45° - 90°	117
Figura 51. Curvas Esfuerzo vs. Deformación 0° - 45° - 90°	118

Figura 52. FC-PLA-22 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria	119
Figura 53. FC-PLA-30 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria	119
Figura 54. FC-PLA-44 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria	119
Figura 55. FC-PLA-100 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria.....	120
Figura 56. PLA-100 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria	120

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Propiedades típicas del material.....	35
Tabla 2. Resumen de las configuraciones experimentales evaluadas	49
Tabla 3. ANOVAs para rigidez - material x nivel de carga	62
Tabla 4. ANOVAs para rigidez - angulo × nivel de carga	63
Tabla 5. ANOVAs para rigidez - angulo × configuración.....	64
Tabla 6. ANOVAs para carga axial - material × nivel de carga.....	65
Tabla 7. ANOVAs para carga axial - ángulo × nivel de carga.....	66
Tabla 8. ANOVAs para carga axial - ángulo × configuración.....	68
Tabla 9. Propiedades mecánicas calculadas para cada eje experimental.....	76
Tabla 10. Propiedades mecánicas y densidad por configuración	81
Tabla 11. Indicadores de desempeño estructural por configuración	82
Tabla 12. Selección de configuración según desempeño estructural	84

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Configuraciones de impresión	97
Apéndice B. Ensayos mecánicos Eyy - V	98
Apéndice C. Tablas de resultados análisis Anova	104
Apéndice D. Curvas de resultados análisis Anova	117
Apéndice E. Resultados del análisis estructural del chasis del dron en SolidWorks	119

Resumen

Título: Análisis Mecánico De Piezas Fabricadas Con Manufactura Aditiva Con Refuerzo De Fibra De Carbono A Diferentes Concentraciones Y Ángulos De Impresión, A Partir Del Método Arcan Test Con Seguimiento De Imagen En 2d*

Autor: Julian David Vega Lizarazo, Manuel Alejandro Melo y Daniel Mateo Rodriguez Lopez

Palabras Clave: Impresora 3D, Refuerzo de fibra, materiales de refuerzo, concentraciones de impresión, filamentos reforzados, deformación, materiales, impresión 3D.

Descripción:

Este proyecto de grado aborda un estudio crítico sobre el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva, un campo innovador que, pese a sus avances en geometrías complejas, enfrenta desafíos significativos en la integridad estructural de materiales compuestos. La investigación se centra en piezas compuestas de filamentos híbridos con fibra de carbono y PLA, evaluando cómo las diferentes concentraciones de fibra y las direcciones de impresión afectan su respuesta mecánica bajo diversas condiciones de carga. El objetivo principal es evaluar el comportamiento mecánico de estos materiales, analizando los campos de esfuerzo y deformación para determinar su respuesta.

Para lograrlo, se emplea una metodología robusta que incluye el ensayo ARCAN, un método experimental ideal para evaluar materiales bajo estados complejos de esfuerzo mixto, como tensión axial y corte puro. Este ensayo se complementa con un sistema de correlación digital de imágenes bidimensional (DIC-2D), implementado en MATLAB. Esta técnica óptica no destructiva permite medir con alta precisión los desplazamientos y deformaciones en la superficie de las probetas. Las piezas se imprimen y prueban bajo orientaciones de carga de 0° , 45° y 90° , considerando cuatro fracciones volumétricas de fibra de carbono (22 %, 30 %, 44 % y 100 %) con una configuración de relleno rectilíneo alineado.

Adicionalmente, se realizará un análisis de varianza (ANOVA) para identificar las combinaciones críticas de estas variables que optimicen el esfuerzo último del material, proporcionando una comprensión profunda de las interacciones. Las propiedades mecánicas obtenidas se validarán posteriormente en un modelo funcional de un chasis de dron, una aplicación de alta demanda estructural donde la relación resistencia-peso es esencial. Este trabajo busca generar guías de diseño más precisas para la manufactura aditiva de materiales compuestos, mejorando la durabilidad y funcionalidad en diversas aplicaciones industriales.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director William Pinto Hernández.

Abstract

Title: Mechanical Analysis of Parts Manufactured with Additive Manufacturing with Carbon Fiber Reinforcement at Different Concentrations and Printing Angles, Based on the Arcan Test Method with 2D Image Tracking*

Author: Julian David Vega Lizarazo, Manuel Alejandro Melo y Daniel Mateo Rodriguez Lopez.

Keywords: 3D Printer, Fiber Reinforcement, Reinforcement Materials, Printing Concentrations, Reinforced Filaments, Deformation, Materials, 3D Printing.

Description:

This thesis project addresses a critical study on the mechanical behavior of parts manufactured through additive manufacturing, an innovative field that, despite its advances in complex geometries, faces significant challenges in the structural integrity of composite materials. The research focuses on parts made of hybrid filaments with carbon fiber and PLA, evaluating how different fiber concentrations and printing directions affect their mechanical response under various loading conditions. The main objective is to evaluate the mechanical behavior of these materials, analyzing stress and strain fields to determine their response.

To achieve this, a robust methodology is employed, including the ARCAN test, an experimental method ideally suited for evaluating materials under complex mixed stress states, such as axial tension and pure shear. This test is complemented by a two-dimensional digital image correlation system (DIC-2D) implemented in MATLAB. This non-destructive optical technique allows highly precise measurements of displacements and strains on the specimen surface. The parts are printed and tested under load orientations of 0° , 45° , and 90° , considering four carbon fiber volume fractions (22 %, 30 %, 44 %, and 100 %) with an aligned rectilinear infill configuration.

Additionally, an analysis of variance (ANOVA) will be carried out to identify the critical combinations of these variables that optimize the ultimate strength of the material, providing a deeper understanding of the interactions. The obtained mechanical properties will later be validated in a functional model of a drone chassis, a highly demanding structural application where the strength-to-weight ratio is essential. This work seeks to generate more accurate design guidelines for the additive manufacturing of composite materials, improving durability and functionality in various industrial applications.

*Bachelor Thesis.

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director William Pinto Hernández.

Introducción

La manufactura aditiva (MA), comúnmente conocida como impresión 3D, representa una tecnología innovadora que ha transformado la fabricación de piezas, permitiendo la creación de geometrías complejas y personalizadas en una amplia gama de industrias. Este proceso consiste en construir objetos tridimensionales a través de la deposición de material capa por capa, basándose en modelos digitales. Desde la invención de la primera impresora 3D en 1984, esta tecnología ha evolucionado rápidamente, convirtiéndose en una herramienta esencial en sectores como el automotriz, aeroespacial, medicina y electrónica. La MA ha demostrado su versatilidad al posibilitar la fabricación de componentes ligeros y resistentes para la industria automotriz y la creación de prótesis y modelos anatómicos personalizados en el ámbito médico. Entre las tecnologías de impresión 3D más empleadas se encuentran la extrusión fundida (FDM), la sinterización selectiva por láser (SLS) y la estereolitografía (SLA), cada una con aplicaciones específicas según el material y la precisión requerida (Han y Lee, 2020).

Un área de interés significativo en la manufactura aditiva es el desarrollo y aplicación de materiales compuestos, los cuales se forman por la combinación de dos o más fases distintas para potenciar sus propiedades mecánicas y físicas. Particularmente, el uso de fibra de carbono como refuerzo en una matriz polimérica ha ganado considerable popularidad. Esta combinación se valora por su excepcional relación ligereza-resistencia y su capacidad para aumentar la rigidez de las piezas sin un incremento sustancial de peso. La fibra de carbono se distingue por su alta resistencia a la tracción, rigidez, baja densidad, y resistencia a la fatiga y corrosión, propiedades que la hacen ideal para aplicaciones de alto rendimiento. En el presente proyecto, el material compuesto se fabrica con un filamento que contiene 15 % de fibra de carbono y 85 % de PLA (ácido poliláctico) como material de análisis, buscando aprovechar la sinergia de estas propiedades para la creación de componentes avanzados. La forma en que la fibra de carbono se mezcla con el polímero (fibra larga, corta, micro o nanopartícula) tiene un impacto directo en las propiedades finales del material

(Yang et al., 2026).

La importancia de este estudio radica en la necesidad de abordar los desafíos asociados con la integración de la manufactura aditiva y los materiales compuestos para maximizar su potencial en aplicaciones de ingeniería. Se espera que los hallazgos de esta investigación contribuyan de manera significativa al desarrollo de guías de diseño más precisas para la manufactura aditiva de materiales compuestos. Al mejorar la comprensión del comportamiento mecánico bajo diversas condiciones de esfuerzo, este trabajo permitirá optimizar los procesos de fabricación de piezas 3D, garantizando una mayor resistencia, durabilidad y funcionalidad en componentes para aplicaciones industriales críticas, como la industria aeroespacial, automotriz y de drones. Se busca no solo ampliar el conocimiento científico en este campo, sino también ofrecer herramientas prácticas para ingenieros y diseñadores.

A partir del planteamiento del problema, se establece la siguiente hipótesis de investigación: el incremento en la fracción volumétrica de fibra de carbono y una adecuada orientación de impresión alineada con la dirección de carga generan un aumento significativo en la rigidez y resistencia mecánica de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva. Asimismo, se espera que configuraciones con orientaciones intermedias presenten comportamientos anisotrópicos que afectan su desempeño estructural bajo estados de esfuerzo mixto.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva con refuerzo de fibra de carbono y recubrimiento de PLA, a partir del análisis de los campos de esfuerzo y deformación obtenidos mediante el ensayo ARCAN y empleando un sistema de correlación de imagen bidimensional (DIC-2D) implementado en MATLAB, considerando diferentes condiciones de impresión y orientaciones de carga con el fin de determinar su comportamiento mecánico.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar los campos de distribución de Desplazamiento y deformación en piezas impresas mediante manufactura aditiva con fibra de carbono como refuerzo y PLA, bajo distintas orientaciones de carga (0° , 45° , 90°) según el ensayo ARCAN, empleando un sistema de correlación digital de imágenes bidimensional (DIC-2D) implementado en MATLAB.

Identificar mediante un análisis ANOVA las combinaciones críticas de variables, como la orientación de la carga (0° , 45° , 90°), la concentración de refuerzo con cuatro fracciones volumétricas (22 %, 30 %, 44 % y 100 %), y la configuración de relleno (líneas) que permita obtener la mejor combinación para el esfuerzo último.

Validación de las propiedades mecánicas (esfuerzo último) adquiridas en condiciones de esfuerzo mixto a partir del ensayo Arcan, realizando una comparativa en un modelo funcional de un chasis de dron en los cuales se presentan diferentes combinaciones de esfuerzos.

2 Marco Teórico

2.1 Manufactura Aditiva (Impresión 3D)

2.1.1 *Evolución y principios de la manufactura aditiva*

La Manufactura Aditiva (MA), comúnmente conocida como impresión 3D, es un proceso que permite la creación de objetos tridimensionales mediante la deposición de material capa por capa, basándose en modelos digitales. Esta tecnología ha experimentado una rápida evolución desde la creación de la primera impresora 3D en 1984 por 3D Systems Corporation, consolidándose como una herramienta fundamental en diversos sectores como el automotriz, aeroespacial, médico y electrónico.

2.1.2 *Tipos de tecnologías de impresión 3D*

Entre las tecnologías más comunes utilizadas en la manufactura aditiva se encuentran el método de extrusión fundida (FDM), sinterización selectiva por láser (SLS), y estereolitografía (SLA). Cada una de estas tecnologías tiene aplicaciones específicas dependiendo del tipo de material y precisión requerida (Christoph et al., 2016).

2.1.3 *Versatilidad de la manufactura aditiva*

La manufactura aditiva se ha demostrado como una tecnología versátil, capaz de crear geometrías complejas que serían imposibles de lograr con métodos de fabricación convencionales. En la industria automotriz, facilita la producción de piezas ligeras y resistentes, mientras que en el sector médico permite la creación de prótesis y modelos anatómicos personalizados (Cortázar, 2018).

2.2 Materiales Compuestos en la Manufactura Aditiva

2.2.1 Generación de materiales compuestos en MA

Los materiales compuestos se forman por la combinación de dos o más fases distintas, con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Dentro de la manufactura aditiva, existen procesos que posibilitan el uso de diferentes materiales, como la fibra de carbono y el PLA, para generar un material compuesto. La incorporación de refuerzo de fibra de carbono en este contexto ofrece una combinación de ligereza y alta resistencia(Stupenengo, 2011).

2.2.2 Uso de fibras de refuerzo en la impresión 3D

El empleo de fibras de refuerzo, como la fibra de carbono, en combinación con la manufactura aditiva, ha ganado popularidad debido a su capacidad para incrementar la resistencia y rigidez de las piezas sin añadir un peso significativo. Estas fibras refuerzan la matriz polimérica, permitiendo la creación de piezas con propiedades mecánicas mejoradas, lo que es particularmente útil en aplicaciones con altas demandas estructurales, como en la industria aeroespacial(Wang et al., 2026).

2.2.3 Ventajas y desafíos de los materiales compuestos con fibra de carbono

El uso de fibra de carbono como refuerzo en manufactura aditiva ofrece ventajas como su alta relación resistencia-peso y la mejora en la estabilidad dimensional bajo carga. No obstante, presenta desafíos asociados a la distribución homogénea y orientación de las fibras, así como a la interacción matriz-refuerzo, que puede afectar el desempeño mecánico si no se controla adecuadamente(Soutis, 2005).

2.3 Fibra de Carbono como Material de Refuerzo

2.3.1 Propiedades mecánicas de la fibra de carbono

La fibra de carbono es ampliamente utilizada como material de refuerzo debido a sus propiedades mecánicas superiores, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de alto desempeño. Entre sus principales características destacan su alta resistencia a la tracción, elevada rigidez específica y baja densidad, lo que permite obtener estructuras ligeras con gran capacidad portante. Adicionalmente, presenta una alta resistencia a la fatiga y a la corrosión, lo que contribuye a prolongar su vida útil incluso en condiciones de servicio exigentes (Soutis, 2005).

2.3.2 Efecto de la concentración de fibra de carbono en materiales compuestos

La concentración de fibra de carbono en los materiales compuestos influye directamente en sus propiedades mecánicas. Las fibras de carbono, mezcladas con el polímero en formatos como fibra larga, fibra corta, micro y nanopartícula, aportan mayor resistencia mecánica, a la temperatura, e incluso mejoran las propiedades eléctricas que el polímero por sí solo no posee. A medida que aumenta la cantidad de fibra en la matriz, se observa un incremento en la rigidez y resistencia a la tracción. Sin embargo, un exceso de fibra puede generar problemas de fragilidad y dificultar el proceso de impresión debido a una mala interacción entre la fibra y la matriz (Soutis, 2005).

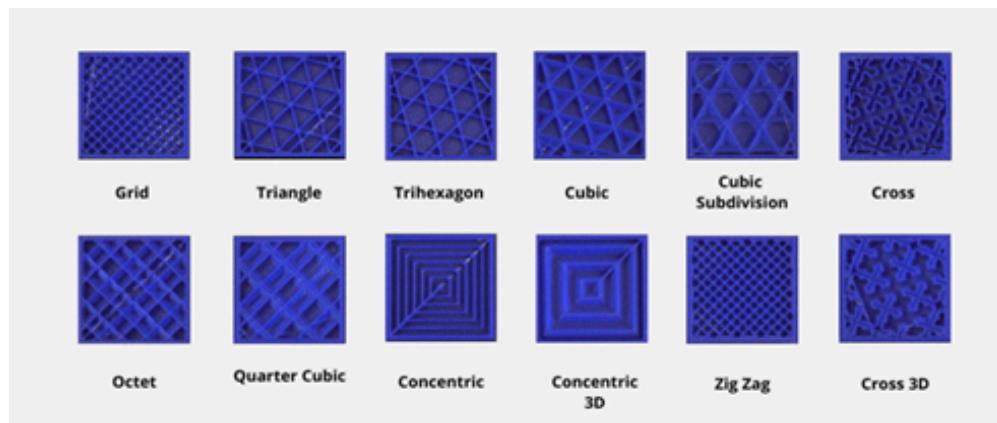
2.3.3 Configuraciones de relleno y sus efectos

La orientación de las fibras de los filamentos dentro de la matriz es crucial para el rendimiento del material compuesto. Los patrones de los perfiles de relleno, especialmente con respecto al eje X de la impresora, son configuraciones utilizadas para maximizar la resistencia en direcciones específicas según la aplicación requerida, considerando que estas fibras son más resistentes

a la tensión. Una combinación adecuada de estas orientaciones puede optimizar las propiedades del material bajo cargas complejas, como las que se presentan en el ensayo Arcan. La Figura 1 ilustra estas diferentes configuraciones de patrones más comunes en la impresión 3D, cada patrón presenta diferentes variables como el consumo de filamento, dirección de las fibras y geometrías complejas adaptadas para diferentes aplicaciones que se requieran en la aplicación de la pieza impresa (Technologies, sf).

Figura 1

Representación gráfica de los diferentes perfiles de impresión



Nota. Extraído de Technologies, sf.

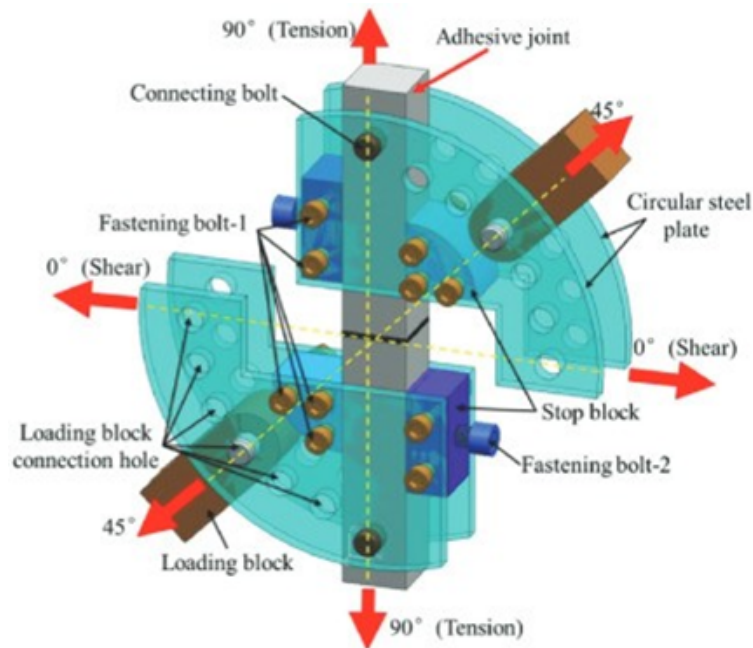
2.4 Método Arcan Test

2.4.1 Fundamentos del Arcan Test

El Arcan Test es un método experimental diseñado para evaluar el comportamiento mecánico de materiales bajo estados complejos de esfuerzo, incluyendo la tensión axial y el corte puro. Este método utiliza una geometría de muestra específica que es sometida a cargas en diferentes ángulos para inducir diversas combinaciones de esfuerzos. La Figura 2 muestra una probeta sometida a carga en un ensayo Arcan (Benali et al., 2023).

Figura 2

Ensayo arcan de una probeta sometida a una carga



Nota. Extraído de Cognard et al., 2010.

2.4.2 Aplicaciones del Arcan Test en el análisis de materiales compuestos

El Arcan Test es ampliamente utilizado en el estudio de materiales compuestos debido a su capacidad para representar cargas reales en condiciones de esfuerzo mixto que estos materiales enfrentan en aplicaciones (Benali et al., 2023). Es particularmente útil para:

- Determinar el comportamiento de los materiales bajo condiciones combinadas de tensión y corte.
- Evaluar la resistencia a la delaminación.
- Analizar la rigidez y la capacidad de los materiales compuestos para resistir esfuerzos combinados. Esto es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en aplicaciones críticas como las de la industria aeroespacial y automotriz.

2.4.3 Ventajas del Arcan Test en manufactura aditiva

Una de las principales ventajas del Arcan Test para piezas fabricadas mediante manufactura aditiva es su capacidad para obtener información que permite calibrar modelos de estas piezas y evaluar condiciones de combinación de esfuerzo. Esto contribuye a mejorar los procesos de impresión 3D mediante el análisis del comportamiento de los materiales en condiciones de alto esfuerzo.

2.5 Correlación Digital de Imágenes (DIC)

2.5.1 La DIC como técnica de medición no destructiva

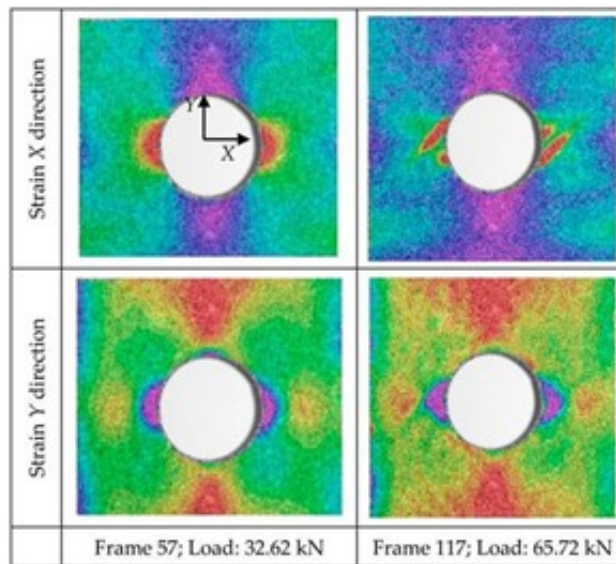
La Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica no destructiva utilizada para medir desplazamientos y deformaciones en materiales. Su funcionamiento se basa en la comparación de imágenes digitales tomadas antes y después de la deformación de una muestra, identificando patrones de movimiento para cuantificar los cambios en la superficie del material. La Figura 3 es un ejemplo de representación gráfica de la deformación de una pieza con seguimiento DIC (Hassan, 2021).

2.5.2 Aplicaciones en estudios de materiales

Esta técnica es ampliamente utilizada en estudios de materiales donde la precisión en la medición de deformaciones es crítica, como en la investigación de materiales compuestos y metales. La DIC permite obtener datos precisos sobre la distribución de esfuerzos en la superficie del material (Feito et al., 2020).

Figura 3

Representación gráfica de la deformación



Nota. Extraído de Feito et al., 2020.

2.5.3 Implementación del DIC en MATLAB

El uso de MATLAB para la implementación de DIC ha ganado popularidad debido a la flexibilidad del software para personalizar algoritmos y realizar análisis complejos. Mediante programación, se pueden establecer secuencias que permiten el procesamiento de imágenes y la obtención de mapas de deformación, los cuales se utilizan posteriormente en estudios de integridad estructural (Blaber y Antoniou, sf).

2.6 Análisis ANOVA

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una técnica estadística empleada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de múltiples grupos. En el contexto de materiales compuestos, el ANOVA es útil para evaluar cómo diferentes factores, como la orientación de las fibras o las condiciones de fabricación, afectan las propiedades mecánicas del material .

Se utiliza para estudiar la interacción entre múltiples variables, por ejemplo, la relación entre la proporción de fibra y la matriz, o el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas. Los resultados del ANOVA proporcionan información valiosa sobre los factores que influyen significativamente en las propiedades del material, permitiendo optimizar el proceso de fabricación para mejorar el rendimiento, la resistencia y la durabilidad de los materiales compuestos (Rodríguez et al., 2020).

2.7 Chasis de Dron

2.7.1 Definición y función del chasis de dron

El chasis de un dron es la estructura fundamental que sirve como soporte para los componentes principales de un vehículo aéreo no tripulado (VANT), tales como motores, hélices, batería y sistemas de control y navegación. Además de proporcionar un medio de fijación, el chasis debe garantizar la integridad estructural del dron durante el vuelo, resistiendo las fuerzas generadas por aceleraciones, vibraciones y esfuerzos mecánicos. El diseño del chasis debe equilibrar la resistencia de los materiales con la ligereza para optimizar el rendimiento y la autonomía del aparato, ya que un exceso de peso puede afectar negativamente la eficiencia de vuelo y la duración de la batería.

2.7.2 Materiales Comunes en la Fabricación de Chasis de Dron

Tradicionalmente, los chasis de dron se han fabricado con materiales plásticos como el ABS y el policarbonato, y en algunos casos, metales como el aluminio. Sin embargo, la adopción de materiales compuestos ha permitido el avance hacia diseños de chasis más robustos y ligeros. Los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono son especialmente efectivos debido a su alta relación resistencia-peso, lo que resulta en estructuras más fuertes y ligeras. La fabricación

de estos chasis mediante manufactura aditiva ha ganado popularidad por su capacidad para crear geometrías complejas y personalizadas, optimizando el diseño estructural sin las restricciones de los métodos convencionales.

2.7.3 Propiedades mecánicas requeridas y desafíos

Aunque la manufactura aditiva permite avances significativos en la personalización y optimización de chasis de dron, presenta desafíos como:

- La distribución no uniforme de las fibras durante la impresión, lo que puede generar puntos débiles.
- La orientación de las capas durante la impresión afecta significativamente las propiedades mecánicas de las piezas, exigiendo un control preciso de los parámetros.

A pesar de estos desafíos, herramientas como el ensayo ARCAN y el sistema de correlación digital de imágenes (DIC-2D) son esenciales para obtener datos precisos sobre el comportamiento de los materiales compuestos en condiciones de esfuerzo mixto, mejorando así los diseños de chasis de dron.

3 Revisión Bibliográfica

- Según García, 2023, la investigación desarrolló un dron de bajo coste mediante impresión 3D FDM en el FabLab de la Universidad de Valladolid. Se utilizó el software CATIA para el modelado del chasis (frame), evolucionando el diseño desde una estructura simple en X hasta una versión final optimizada con placas auxiliares para fijar la electrónica. La fabricación se realizó en una impresora Ultimaker S3 usando PLA (ácido poliláctico) para las piezas estructurales, con un grosor de 3 mm (30 capas) y un relleno triangular al 85 % para maximizar la resistencia sin fragilidad. Además, se empleó TPU (poliuretano termoplástico) para las protecciones de aterrizaje por su capacidad de absorber impactos. El dron integra componentes específicos: motores sin escobillas Racestars BR2205 de alto KV, hélices de policarbonato de 5 pulgadas, y un controlador de vuelo MambaSys F405 MK2. El sistema de vídeo incluye una cámara Caddx Ant FPV y un transmisor VTX EWRF de 5.8GHz. La configuración se realizó íntegramente con el software Betaflight, ajustando puertos, modos de vuelo y el protocolo Raceband para la transmisión de vídeo. García descubrió que una estructura simple en "X" no era suficiente, evolucionando hacia un chasis con placas de refuerzo para soportar los momentos de torsión de los motores. Este hallazgo ayudó a entender que la fibra de carbono aumenta la rigidez, pero si la configuración de capas no es la correcta, la probeta fallará por delaminación, lo cual es uno de los factores a tener en cuenta en el diseño de la probeta.
- Según ROMERO, 2025, este Trabajo investiga la caracterización mecánica y la detección de defectos en biocomposites (matriz polimérica con fibras naturales) fabricados mediante impresión 3D. La investigación utiliza la Correlación Digital de Imágenes (DIC) en 2D para analizar el comportamiento bajo tracción, lo que permite calcular con precisión el Módulo de Young y la resistencia del material. A diferencia de los métodos tradicionales, este enfoque incluye un análisis estocástico mediante funciones de densidad de probabilidad (PDFs) para

gestionar la variabilidad propia de las fibras naturales y el proceso de fabricación. Además de la caracterización mecánica, el estudio integra la termografía infrarroja como método de ensayo no destructivo para la detección de defectología interna, comparando diversas técnicas de procesamiento de señal como la Termografía de Fase Pulsada (PPT) y la Reconstrucción Térmica de Señal (TSR). Los resultados demuestran que la integración de DIC y termografía permite no solo cuantificar las propiedades elásticas, sino también identificar discontinuidades estructurales que comprometen la integridad de las piezas. Estos hallazgos aportan una base técnica para, ya que establece la metodología para la caracterización mecánica de materiales con refuerzo. El estudio determinó la elección del programa Ncorr y además ayudó la elección de la aplicación debido a que la Correlación Digital de Imágenes (DIC) en 2D es superior a los métodos tradicionales (como el uso de extensómetros físicos) para capturar la heterogeneidad en la deformación de probetas fabricadas por manufactura aditiva, lo cual es crítico al introducir refuerzos como la fibra de carbono, que generan anisotropía.

- Según Cieza, 2020, este trabajo de investigación de Diego Vera Cieza aborda de forma exhaustiva los fundamentos y la implementación de la Correlación de Imágenes Digitales (DIC) como una técnica de metrología óptica no invasiva. El texto detalla el proceso crítico de preparación de las probetas, enfatizando la creación del patrón de motas (speckle pattern) mediante el uso de pintura en aerosol (negro sobre blanco) para garantizar el contraste necesario que el software requiere para el seguimiento de sub-imágenes. Explica cómo la técnica transforma coordenadas de píxeles en desplazamientos físicos, permitiendo obtener mapas de deformación a toda escala sin contacto físico, lo que evita interferencias mecánicas en los resultados. Este trabajo es un aporte metodológico esencial por tres razones: primero, justifica el uso de DIC frente a extensómetros tradicionales en materiales anisotrópicos (como los reforzados con carbono), donde la deformación no es uniforme. Segundo, el texto analiza aplicaciones en ensayos biaxiales y de corte, lo cual es directamente aplicable al dispositivo Arcan, permitiéndote mapear con precisión la zona de entalla donde se concentran las tensiones.

- Según Swathi et al., 2026, este artículo técnico investiga la optimización de parámetros en la fabricación por estereolitografía (SLA) de compuestos de fotopolímeros reforzados con nitruro de boro (BN). El contenido se centra en evaluar cómo la composición del material (0% a 1,5% de BN), el ángulo de construcción (0°, 45°, 90°), el tiempo de post-curado y la velocidad de elevación afectan la resistencia a la tracción. Utilizando una matriz ortogonal L9 de Taguchi, los autores identifican que la concentración de refuerzo es el factor más influyente, seguida del ángulo de construcción. Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se analiza la dispersión del refuerzo y la morfología de la fractura, determinando que un exceso de refuerzo puede generar aglomeraciones que actúan como puntos de fallo. Este trabajo aporta una base sobre para entender ya aplicar una metodología estadística rigurosa mediante el uso del Análisis de Varianza (ANOVA). Explica como el ANOVA permite cuantificar el porcentaje de contribución de cada variable sobre la respuesta mecánica, lo cual es crucial para discernir si las variaciones en los resultados del Arcan Test se deben realmente a la concentración de carbono o si la interacción entre el ángulo de impresión y el esfuerzo cortante tiene un peso estadístico mayor.

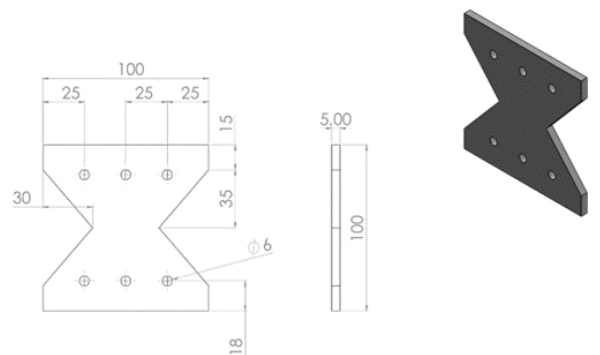
4 Metodología

4.1 Diseño digital de la probeta

El diseño geométrico de las probetas empleadas en este estudio fue desarrollado previamente en un entorno CAD, específicamente en SolidWorks, para posteriormente realizar el plano de la probeta. En el plano técnico se presenta en la figura 4, en el cual se establecen las cotas generales necesarias para su fabricación y posterior ensayo mecánico mediante el dispositivo Arcan.

Figura 4

Representación Probeta plano



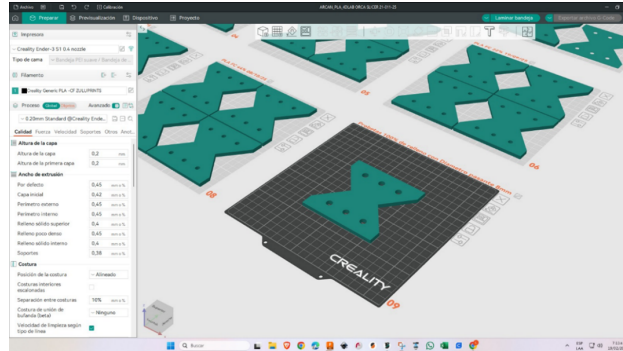
Las dimensiones de la probeta fueron definidas en milímetros conforme a los requerimientos geométricos del ensayo bajo la norma ASTM D7078, que define un método de ensayo para determinar las propiedades de corte (shear) en materiales compuestos reforzados con fibra mediante una probeta con entallas en forma de V. El diseño contempla una zona central de sección reducida que permite concentrar los esfuerzos durante la aplicación de carga, compuesta por dos entallas en forma de V opuestas, garantizando que la falla del material ocurra en la región de interés durante el ensayo (ASTM, 2025).

Una vez finalizado el proceso de modelado, y la realización del plano, la probeta fue exportada al formato STL (Standard Tessellation Language), el cual permite su procesamiento en el software de laminado (slicer) para la generación del código G necesario para la fabricación

mediante manufactura aditiva, la probeta mostrada en este formato se muestra en la figura 5:

Figura 5

Representación de fabricación aditiva



4.2 Configuración del proceso de impresión

La fabricación de las probetas se llevó a cabo mediante tecnología de modelado conocida como FDM(Fused Deposition Modeling), también conocida como FFF(Fused Filament Fabrication). En este proceso, un filamento termoplástico se funde en un extrusor caliente y se deposita capa por capa hasta formar el objeto tridimensional. La fabricación de las probetas se realizó utilizando una impresora Creality Ender-3 S1, equipo ampliamente utilizado en procesos de prototipado debido a su precisión y confiabilidad en la deposición de material.

El material empleado para el proceso de impresión de las probetas y como ya se ha mencionado, es un filamento de la empresa Zuluprints, compuesto por 85 % de ácido poliláctico (PLA) y 15 % de fibra de carbono (CF).

El material protagonista para este proyecto es el filamento de fibra de carbono para impresión en 3D, la elección de este material fue designada para analizar el comportamiento de este teniéndolo como un refuerzo que aportara propiedades mecánicas a las probetas impresas. Las propiedades mecánicas, elásticas y plásticas de la tabla 1, estas especificaciones son dadas por Zuluprints la empresa encargada de la fabricación y distribución del filamento.

Tabla 1*Propiedades típicas del material*

Propiedad	Norma de prueba	Valor
Densidad (g/cm ³)	ASTM D-792	1.21
Índice de fluidez (MFI) (170°C, 2160 g)	ASTM D-1238	8 g/10min
Punto de fusión (°C)	DSC	170–190
Temperatura de ablandamiento Vicat A/120 (°C)	ASTM D-648	65
Resistencia a la tracción (MPa)	ASTM D-638	58
Alargamiento a la rotura (%)	ASTM D-638	3
Módulo de flexión (Kj/m)	ASTM D-256	6.5
Resistencia al impacto Notched (%)	ASTM D-955	0.3–0.5
Tasa de absorción de agua (%)	ASTM D-570	< 1

Nota. Los datos anteriores son valores típicos y no deben interpretarse como indicadores técnicos para juzgar la calidad.

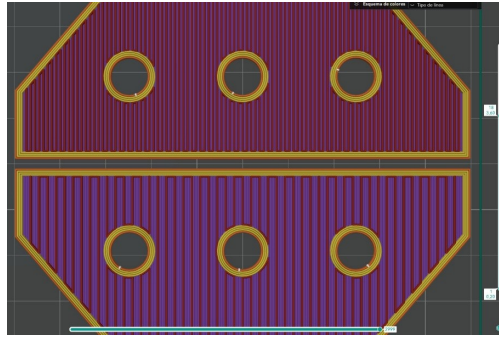
El software de la impresora Creality Ender-3 S1, cuenta con una sección de preparación, en la que se pueden variar los parámetros acorde a las necesidades que se tengan para cumplir con el producto final. Es necesario aclarar, que no todas las variaciones que se pueden utilizar fueron realizadas.

En la sección de fuerza, aparecen varias opciones de configuración. De las que se realizó alguna modificación está el patrón de relleno de la cubierta superior e inferior, que corresponde a una línea continua, esto se realizó con el propósito de que las fibras favorecieran la rotura, además se utilizaron cuatro capas de cubierta, tanto para la superior como para la inferior. La densidad de relleno es el valor que se varía entre 22 %, 30 %, 44 %, y 100 %, es decir, que es el valor que se varió para poder obtener las diferentes fracciones volumétricas. El patrón de relleno, capas de la cubierta superior e inferior, y la densidad de relleno en la figura 29 se observa cómo se variaron y en la

figura 6 se muestra como se ve el patrón de relleno de las cubiertas.

Figura 6

Representación Patrón de relleno

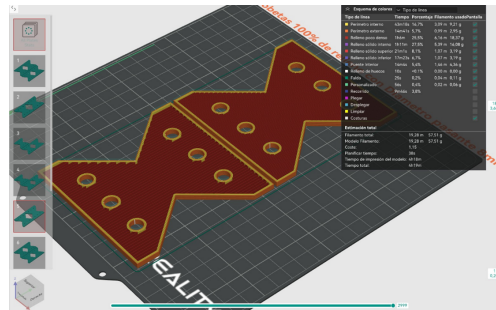


Para la dirección de relleno de baja densidad, que corresponde a la orientación del infill interno del relleno cuando este se realiza de forma parcial, que es el caso para la densidad de relleno de 22 %, 30 % y 44 %, se utilizó una configuración de 90°. Para la dirección de relleno sólido (orientación de las líneas), que es el caso cuando la densidad de relleno es del 100 %, también se utilizó una configuración de 90°. Es decir, que, para todas las densidades de relleno, se utilizó una dirección de relleno de 90, esto se muestra en la figura 30 .

En la imagen 7, se aprecia un resumen de las configuraciones anteriormente mencionadas. Esta imagen aclara por medio de una gama de colores el tipo de línea (perímetro interno, perímetro externo, relleno sólido interno, etc), se muestra además el tiempo aproximado de impresión para cada línea, porcentaje y la cantidad en metros de filamento utilizado. En la parte inferior del recuadro muestra el tiempo total de impresión.

En la tabla 2, se muestra las configuraciones anteriormente mencionadas, a modo de resumen y tener mayor claridad:

De acuerdo con las recomendaciones generales del fabricante de la impresora Creality y del fabricante del material Zuluprints, la velocidad estándar de impresión para PLA oscila entre 40 y 60 mm/s, mientras que la velocidad de la primera capa debe reducirse aproximadamente al

Figura 7*Representación probeta en Software*

50 % de este valor para asegurar una adecuada adhesión a la cama de impresión. En concordancia con estas directrices, se establece que la primera capa debe imprimirse a velocidades entre 15 y 25 mm/s, incluyendo tanto perímetros como relleno, con un número de capas lentas entre 2 y 3. Esta reducción adicional se justifica por la menor capacidad de adhesión del PLA con fibra de carbono frente al PLA puro.

En cuanto a las capas subsiguientes, se recomienda una diferenciación de velocidades según la función estructural de cada trayectoria. Los perímetros externos deben mantenerse entre 25 y 30 mm/s para garantizar calidad superficial, mientras que los perímetros internos pueden incrementarse a valores entre 35 y 45 mm/s. Para geometrías pequeñas, que aplica a las dimensiones de la probeta, se sugiere limitar la velocidad a un rango de 20 a 25 mm/s, evitando defectos por vibración o sobreextrusión.

Respecto al relleno, el material permite velocidades mayores en zonas no visibles, alcanzando entre 45 y 60 mm/s en rellenos poco densos. Sin embargo, los rellenos sólidos internos deben mantenerse entre 40 y 50 mm/s, y los rellenos superiores entre 25 y 35 mm/s para asegurar un buen acabado superficial. Asimismo, los soportes pueden imprimirse a velocidades de 40 a 50 mm/s, reduciendo a 25–35 mm/s en la interfaz de contacto con la pieza.

Finalmente, es importante considerar que fabricantes de filamentos compuestos, como Zuluprints, recomiendan generalmente reducir entre un 10 % y un 20 % las velocidades estándar del

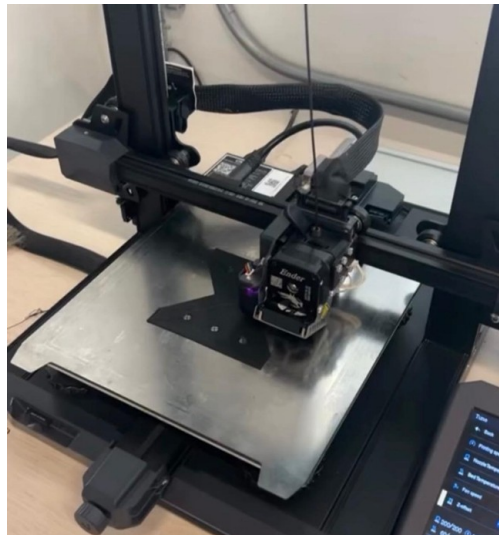
PLA, debido a la abrasividad del material y su menor fluidez.

4.3 Fabricación de las probetas

Primero, se ubicó el filamento de la marca Zuluprints en un deshumidificador, esto con el fin de eliminar la humedad que haya podido adquirir el filamento mientras era transportado, y mientras se destapo de su envoltorio para verificar la calidad de este, esto se realizó con todos los filamentos. Con el filamento ya en las condiciones óptimas para ser utilizado, se realizó el montaje de este en la impresora, y se ubicó un extremo del filamento en la boquilla de entrada. Luego se realizó la nivelación de la cama de impresión que es necesario para poder ajustar la distancia entre la boquilla y la superficie donde se soporta la probeta, conocida como cama de impresión. En las impresiones tipo FDM, es fundamental realizar este procedimiento, porque la primera capa debe depositarse correctamente en la cama para que la pieza se adhiera a la cama y la impresión no falle.

Figura 8

Proceso de impresión



Una vez terminada la impresión, cada probeta fue retirada con precaución de la superficie donde esta se soporta y se realiza una revisión visual (encontrar algún defecto de impresión) y

limpieza de los excesos que quedan en los perímetros de las probetas. Luego, con el uso de un pie de rey se realizó verificación de las dimensiones de las probetas, esto con el propósito de verificar que las medidas si correspondan a las de los planos. Para repetir el proceso de impresión, se limpia la superficie de impresión, se verifica que no quede exceso de material, y se procede nuevamente con las demás impresiones. El resultado de impresión, luego de su verificación visual y limpieza de excesos se muestra en la figura 9.

Figura 9

Probeta impresa en impresión aditiva



Finalmente, cada probeta es almacenada en bolsas herméticas y etiquetada, para así de esta manera evitar que adquieran humedad del ambiente, lo cual, al momento de realizar los ensayos podría afectar el comportamiento y desempeño de las probetas, por consiguiente, los resultados y conclusiones del estudio. A continuación, se muestra en la figura 10 una probeta dentro de su bolsa hermética con su etiquetado:

Figura 10

Aislamiento de la probeta contra la humedad

**4.3.1 Montaje y captura de imágenes**

El primer paso consistió en el manchado de las probetas mediante la aplicación de un patrón aleatorio de pintura blanca en la zona de interés. Este procedimiento es fundamental en la técnica de correlación digital de imágenes (DIC), ya que permite generar una textura superficial identificable.

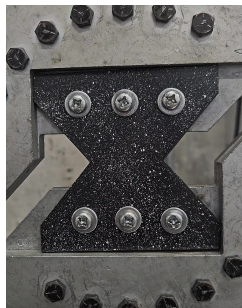
El software NCORR compara subconjuntos de píxeles entre una imagen de referencia y las deformadas, por lo que cada región debe presentar una distribución única de intensidades de gris, lograda mediante un patrón aleatorio de alto contraste. En ausencia de este, se generan errores en la estimación de desplazamientos y deformaciones. Asimismo, el patrón permite un seguimiento robusto ante deformaciones complejas. Por ello, su calidad influye directamente en la precisión de los resultados, siendo necesario que presente una distribución aleatoria, buen contraste y adecuada densidad, evitando zonas uniformes ((Blaber y Antoniou, sf). En la figura 11 se muestra el patrón aplicado en una de las probetas..

Figura 11

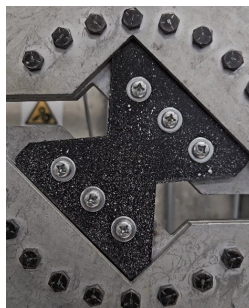
Representación gráfica manchado en probeta



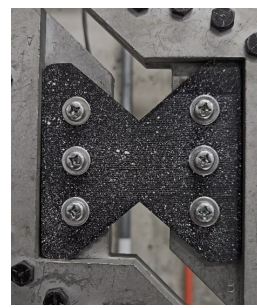
Posteriormente, se continua con el montaje de las probetas en las mordazas en la máquina de ensayos universales de la Universidad Industrial de Santander, el modelo corresponde a una Landmark MTS. Se debe apretar las seis tuercas hasta el punto de que las probetas no se muevan, así se podrá garantizar que no se presente un movimiento relativo entre las probetas y las mordazas. El montaje se realiza según el ángulo de carga al que se le vaya a realizar el ensayo, por lo cual, según este ángulo de carga, las mordazas se van girando y se ubican en la maquina universal. El montaje de los tres tipos de ángulos de carga se presenta a continuación en las figuras 12,13 y 14.

**Figura 12**

Probeta 0°

**Figura 13**

Probeta 45°

**Figura 14**

Probeta 90°

Con el montaje ya realizado, se posiciona un celular Samsung S23+ por medio de un trípode que permitió asegurar que el celular se mantuviera estable durante todo el tiempo de grabación. Las grabaciones se realizaron a una resolución de UHD – 60 FPS, el montaje del trípode con el

celular, en el momento de grabación de una de las probetas se presenta en la figura 15.

Figura 15

Representación grabación de ensayo arcan



La máquina universal aumenta progresivamente la carga hasta que la probeta alcance su esfuerzo último y se presente la primera rotura. Finalizada todas las roturas de las probetas con sus respectivas grabaciones, la máquina de ensayo universal suministra una gráfica para cada ensayo. La gráfica corresponde a carga axial vs tiempo.

4.4 Utilización del software NCORR v1.2

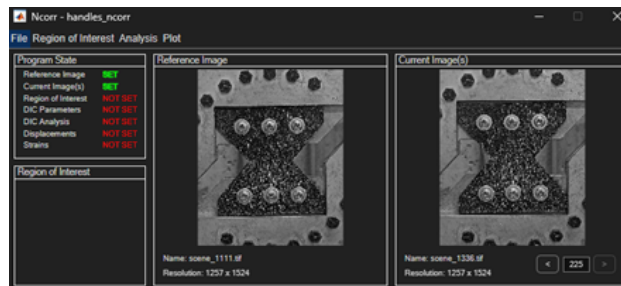
4.4.1 Ajustes iniciales y proceso analítico en NCORR

Luego de la obtención de las grabaciones obtenidas de los ensayos realizados en la MTS (Landmark MTS) se extrajeron de cada grabación una tasa aproximada de 150 a 250 imágenes. con base a estas se realizó el proceso analítico de las deformaciones.

A continuación, se ilustra la interfaz del programa NCORR en las primeras instancias de trabajo, acompañado de un grupo de frames del ensayo realizado.

Figura 16

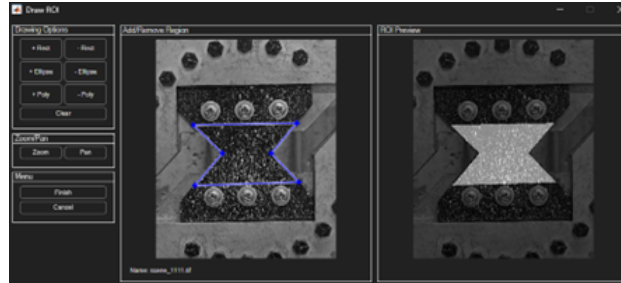
Representación gráfica de la deformación



Se define cual será el área de interés de la probeta a considerar, esta área está definida en el programa como región de interés (ROI) el cual enmarca el área de enfoque en las imágenes a trabajar, como se presenta en la figura.

Figura 17

Representación gráfica de la deformación



Se configura los ajustes de los parámetros de la correlación de imágenes digital (DIC Parameters) como se observa en la figura:

El radio del subconjunto establece el tamaño del área empleada para correlacionar cada punto de la imagen, mientras que la separación entre subconjuntos determina la resolución espacial del análisis. Por otra parte, para hacer control de la precisión en el seguimiento de los desplazamientos se busca un número de iteraciones y el criterio de convergencia, así se distribuye diferentes semillas sobre el área de interés (ROI), a este se le conoce como el método de interpolación (ver

Figura 18 y 19).

Figura 18

Panel de configuración de resolución y mallado en NCORR

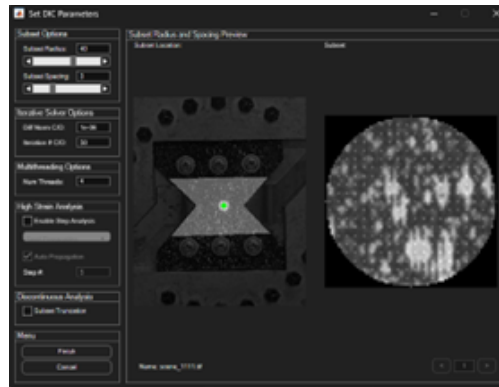
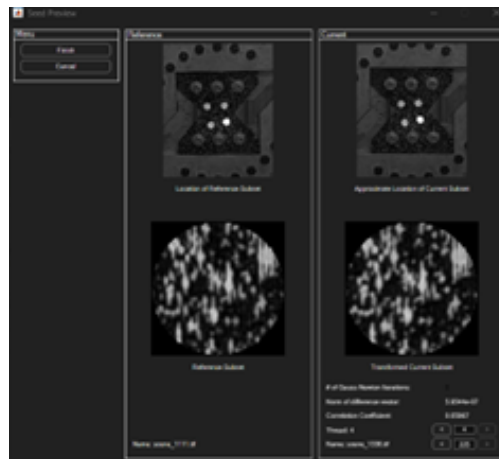


Figura 19

Panel de configuración de campos de desplazamiento en NCORR-2



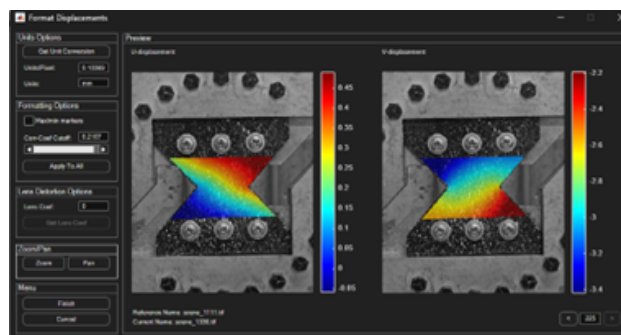
Terminado el proceso analítico en el NCORR, se calculo las deformaciones que sufrió el material de la probeta además de los desplazamientos en cada frames.

4.5 Procesamiento y representación de resultados

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento en NCORR incluyen los campos de desplazamiento, que representan los movimientos locales sobre la superficie de la probeta (ver Figura 20).

Figura 20

Panel de configuración de campos de desplazamiento en NCORR



Los campos de deformación, los cuales permiten analizar la respuesta mecánica del material durante el proceso, lo que determina los desplazamientos en las direcciones x e y, lo que permitió evaluar su impacto en el modelo de relajación (ver Figura 21 y 22).

Figura 21

Panel de configuración de resolución de campos de deformación en NCORR

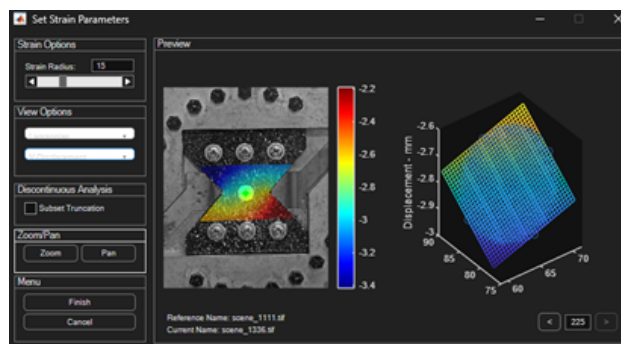
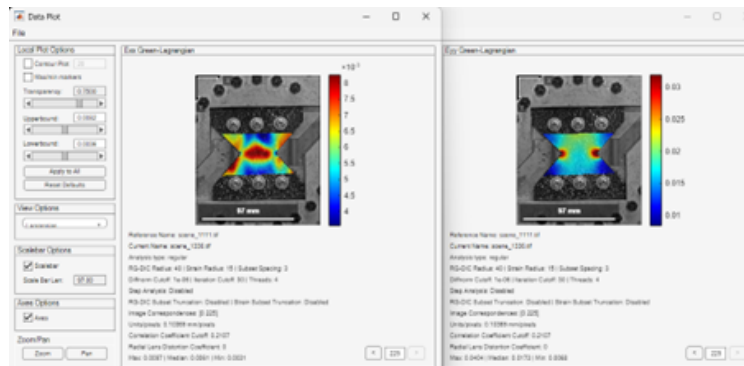


Figura 22

Panel de configuración de resolución de campos de deformación en Programa



A partir del procesamiento realizado en el software NCORR v1.2, se llevó a cabo el análisis completo de las 75 probetas ensayadas, garantizando un tratamiento uniforme de los datos obtenidos en cada uno de los casos. De este conjunto, se extrajeron los campos de deformación en la componente (E_{YY}), así como los campos de desplazamiento en la dirección vertical, representados en el programa mediante la variable (V).

Los resultados evidenciaron que, independientemente de las condiciones específicas de cada ensayo, las probetas presentan un comportamiento consistente tanto en la distribución de deformaciones como en los desplazamientos generados, lo cual valida la repetibilidad experimental y la confiabilidad del procedimiento implementado. A modo de representación, en las Figuras 31, 32 y 33 se ilustra la distribución de deformaciones (E_{YY}), mientras que en las Figuras 34, 35 y 36 se muestra el campo de desplazamientos verticales, permitiendo una comparación clara del comportamiento mecánico observado.

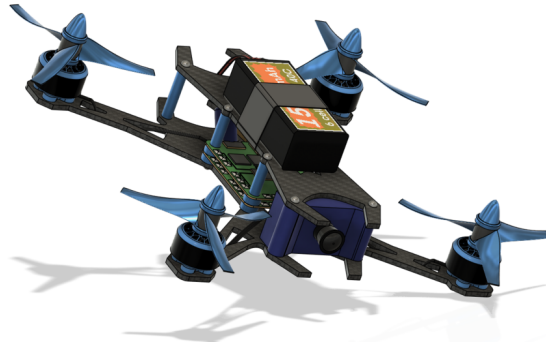
4.6 Diseño y selección del chasis de dron para validación estructural

Como parte del proceso de validación de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente mediante el ensayo Arcan y el análisis por correlación digital de imágenes (DIC-2D)

implementado en el software NCORR, se planteó el diseño de un modelo funcional de aplicación real. En este caso, se seleccionó un chasis de dron como estructura representativa debido a su alta exigencia en términos de relación resistencia-peso y comportamiento bajo cargas combinadas.

Figura 23

Modelo ensamblado del dron utilizado como referencia para el diseño.



Nota. Extraído de Bandari, 2025a.

Para el desarrollo de esta etapa, se realizó inicialmente la selección de un modelo base de dron tipo cuadricóptero, el cual presenta una configuración estructural ampliamente utilizada en aplicaciones reales. A partir de este modelo, se procedió a la identificación y extracción del componente estructural principal correspondiente al chasis, el cual constituye el elemento encargado de soportar las cargas provenientes de los motores, la electrónica y las condiciones dinámicas de operación.

Figura 24

Chasis estructural extraído del modelo del dron

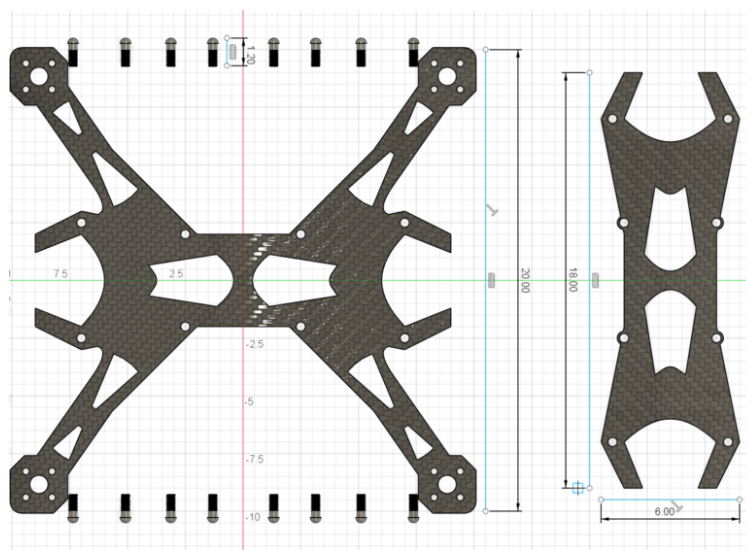


Nota. Extraído de Bandari, 2025b.

El chasis seleccionado fue modelado y analizado en el software CAD SolidWorks, donde se reconstruyó su geometría a partir de un diseño base, permitiendo su posterior adecuación para simulaciones estructurales. Este proceso incluyó la simplificación geométrica del modelo, la definición de espesores, uniones y zonas críticas de carga, con el fin de garantizar condiciones adecuadas para el análisis por elementos finitos.

Figura 25

Chasis estructural extraído del modelo del dron



Nota. Extraído de Bandari, 2025c.

La Figura 23 presenta el modelo general del dron ensamblado, mientras que la Figura 25 muestra el chasis estructural aislado utilizado para el análisis.

Este procedimiento permitió establecer un puente entre los resultados experimentales obtenidos a escala de probeta y su aplicación en un componente estructural real, facilitando la validación del comportamiento mecánico del material compuesto en condiciones de servicio.

4.7 Análisis estadístico de los datos experimentales

Previamente al desarrollo de los análisis estadísticos, la Tabla 2 presenta un resumen de las configuraciones experimentales evaluadas, incluyendo materiales, porcentajes de relleno, ángulos de carga y el número de probetas ensayadas por configuración.

Tabla 2

Resumen de las configuraciones experimentales evaluadas

Material	% Relleno	Ángulos de carga	Probetas por configuración	Total
FC-PLA	22 %	0°, 45°, 90°	5	15
FC-PLA	30 %	0°, 45°, 90°	5	15
FC-PLA	44 %	0°, 45°, 90°	5	15
FC-PLA	100 %	0°, 45°, 90°	5	15
PLA	100 %	0°, 45°, 90°	5	15
TOTAL				75

Nota. El total de 75 probetas corresponde a la muestra inicial antes del proceso de depuración de valores atípicos descrito en la sección 4.7.4.

4.7.1 Justificación del análisis estadístico

Durante el desarrollo experimental se analizaron las propiedades mecánicas de probetas fabricadas mediante manufactura aditiva, evaluando la influencia del material, el porcentaje de

relleno y el ángulo de carga sobre la rigidez y la carga máxima.

Si bien el análisis descriptivo permitió identificar tendencias generales, este no es suficiente para determinar si las diferencias entre configuraciones son estadísticamente significativas o producto de la variabilidad inherente al proceso de impresión y ensayo.

Por ello, fue necesario implementar un método estadístico inferencial que permitiera:

- Determinar si existen diferencias significativas entre distintas configuraciones experimentales (material, porcentaje de relleno y ángulo de carga).
- Evaluar la magnitud de la variabilidad dentro de cada grupo de probetas sometidas a la misma configuración.
- Analizar la repetibilidad del proceso de impresión 3D, verificando si probetas fabricadas bajo condiciones idénticas presentan comportamientos mecánicos estadísticamente consistentes.

El análisis de varianza (ANOVA) fue seleccionado como herramienta estadística principal debido a su capacidad para comparar múltiples grupos simultáneamente y discriminar si las diferencias entre medias son estadísticamente significativas en función de la variabilidad intra-grupo y entre-grupos. De esta manera, el ANOVA permitió responder de forma objetiva a las preguntas de investigación relacionadas con la confiabilidad de las impresiones 3D, la influencia del porcentaje de relleno, el efecto del ángulo de carga y la comparación entre materiales.

4.7.2 Definición y extracción de variables para el análisis estadístico

Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico global de las probetas, se implementó una estrategia de normalización basada en la carga máxima de cada ensayo, definida como el 100 % de carga relativa. A partir de este valor se establecieron niveles de análisis del 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %.

80 % y 100 %, se realizó de dicha manera también debido a que el número de puntos extraídos eran demasiado grandes y muy variados por ensayo lo que dificulta el cálculo de las muestras. Para cada probeta, se identificaron en la base de datos experimental los registros correspondientes a dichos niveles. Con el propósito de reducir sesgos asociados a fluctuaciones locales o heterogeneidades del material, no se consideró un único valor por porcentaje; en su lugar, se extrajeron cinco registros representativos para cada nivel:

- Para los niveles del 20 %, 40 %, 60 % y 80 % se seleccionaron dos valores inmediatamente inferiores, dos valores inmediatamente superiores y el valor más cercano al porcentaje objetivo.
- Para el nivel del 100 % de carga máxima, se seleccionaron cinco valores previos al punto de falla, correspondientes a los registros inmediatamente inferiores al máximo alcanzado.

A partir de los puntos muestreados, se definieron las dos variables respuesta del estudio:

- Carga (N): Valor de fuerza registrado directamente por la celda de carga en cada punto de interés.
- Rigidez (N/mm): Definida operativamente como la pendiente de la curva carga-desplazamiento en el entorno de cada punto muestreado. Para su cálculo se empleó la relación incremental:

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta \delta} = \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{\delta_{i+1} - \delta_{i-1}} \quad (1)$$

donde P representa la carga y δ el desplazamiento, considerando los registros inmediatamente anterior y posterior al punto de interés. Este enfoque permite caracterizar la capacidad resistente instantánea del material en cada etapa del ensayo, capturando su evolución desde el régimen elástico inicial hasta la proximidad de la falla.

Este procedimiento permitió construir una matriz de datos balanceada, en la cual cada nivel porcentual de carga estuvo representado por cinco observaciones por probeta, garantizando mayor estabilidad estadística y reduciendo la influencia de valores atípicos puntuales.

La metodología adoptada permitió evaluar el comportamiento mecánico relativo de las probetas a lo largo de distintas etapas del proceso de carga, proporcionando una aproximación representativa del desempeño estructural desde el régimen inicial hasta la proximidad de la falla.

4.7.3 Evaluación de la repetibilidad intra-configuración

Con el fin de analizar la confiabilidad del proceso de impresión 3D y determinar si probetas fabricadas bajo condiciones idénticas presentan comportamientos mecánicos estadísticamente equivalentes, se realizó un análisis de varianza dentro de cada configuración experimental. Para cada combinación de material, porcentaje de relleno y ángulo de carga, se organizaron los datos normalizados de carga correspondientes a niveles relativos del 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de la carga máxima individual.

Posteriormente, se calculó el comportamiento promedio del conjunto de cinco probetas pertenecientes a la misma configuración. A partir de dicho promedio, se determinaron métricas estadísticas que cuantifican la desviación individual de cada probeta respecto al comportamiento medio del grupo. Las métricas empleadas fueron:

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE)
- Error absoluto medio (MAE)
- Coeficiente de determinación (R^2)
- Coeficiente de variación (CV)

Estas métricas permitieron evaluar cuantitativamente el grado de dispersión y ajuste de cada ensayo en relación con el patrón promedio. Para la evaluación estadística de la repetibilidad se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Los resultados de este análisis se expresan mediante los siguientes estadísticos:

- Estadístico F: compara la varianza entre grupos (probetas) con la varianza dentro de cada grupo (error). Un valor de F alto sugiere que las diferencias entre probetas son mayores de lo esperado por el error aleatorio.
- p-valor: probabilidad de obtener un valor F tan extremo como el observado si no existieran diferencias reales entre las probetas. Se considera que existe diferencia estadísticamente significativa cuando $p < 0.05$.
- η^2 (eta cuadrado parcial): tamaño del efecto, que mide la proporción de la varianza total de la variable respuesta explicada por el factor (probeta). Valores de $\eta^2 > 0,14$ se consideran efectos grandes.

Para cada métrica se aplicó un análisis de varianza de una vía, considerando como factor el número de prueba dentro de la misma configuración. La hipótesis nula establecida fue que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las probetas fabricadas bajo condiciones idénticas.

Los análisis fueron realizados tanto sobre los datos originales como sobre los datos previamente normalizados, con el propósito de evaluar la estabilidad de los resultados frente a cambios de escala.

Los resultados mostraron que, en la mayoría de los casos, el estadístico F calculado fue inferior al valor crítico correspondiente, indicando ausencia de diferencias significativas entre las pruebas y, por tanto, una repetibilidad aceptable del proceso de impresión 3D

4.7.4 Evaluación de posibles valores atípicos y criterio de exclusión

A pesar de que los análisis de varianza realizados dentro de cada configuración experimental no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de los casos, se identificaron visualmente algunas curvas que presentaban desviaciones apreciables respecto al comportamiento promedio del grupo. Dado que la inspección visual no constituye un criterio estadístico suficiente para la exclusión de datos experimentales, se implementó un procedimiento adicional de detección de valores atípicos con el propósito de determinar objetivamente si alguna probeta presentaba un comportamiento anómalo que pudiera influir de manera desproporcionada en el cálculo de los promedios y métricas globales. Para cada configuración experimental se aplicaron tres criterios independientes de detección de outliers:

- Rango intercuartílico (IQR)

Se calculó el rango intercuartílico para las métricas estadísticas obtenidas en cada configuración. Una probeta fue considerada potencialmente atípica si su valor se encontraba fuera del intervalo:

$$Q_1 - (1) * IQR \text{ a } Q_3 + (0,6) * IQR \quad (2)$$

este criterio permite identificar valores extremos basados en la dispersión central de los datos.

- Puntuación estandarizada (Z-score)

Se determinó la puntuación estandarizada de cada probeta respecto a la media del grupo. Valores absolutos superiores a un umbral predefinido (usualmente 2 o 3) fueron considerados indicativos de comportamiento atípico.

Este método evalúa cuántas desviaciones estándar se encuentra una observación respecto al promedio.

- Distancia Euclidiana entre curvas

Con el fin de evaluar diferencias globales en el comportamiento carga–desplazamiento, se calculó la distancia Euclidiana entre pares de probetas pertenecientes a la misma configuración experimental, utilizando la norma L2:

$$Distancia = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

donde x_i y y_i representan los valores de dos curvas comparadas en los mismos niveles relativos de carga. Este criterio permitió cuantificar la diferencia global entre curvas, evitando un análisis basado únicamente en puntos específicos.

Para garantizar objetividad, se definió que una probeta sería excluida únicamente si cumplía al menos dos de los tres criterios de detección de valores atípicos. Bajo este enfoque, se identificaron y eliminaron las probetas que presentaban comportamientos anómalos, asociados a posibles defectos de impresión o irregularidades geométricas.

Tras la depuración, se recalcularon las métricas estadísticas, verificando la coherencia de los resultados y confirmando la consistencia del proceso de manufactura bajo las condiciones evaluadas.

4.7.5 Resultados del proceso de depuración y verificación estadística

La aplicación de los tres criterios de detección de valores atípicos permitió identificar probetas cuyo comportamiento difería de manera consistente respecto al patrón promedio de su configuración experimental.

En total, fueron excluidas doce probetas distribuidas en las siguientes configuraciones:

- PLA 100 % – (0°-prueba 5)

- FC-PLA 22 % – (0° - prueba 3), (45° - prueba 4), (90° - prueba 2)
- FC-PLA 30 % – (0°-prueba 3), (45°-prueba 1), (90°-prueba 1)
- FC-PLA 44 % – (0°-prueba 4), (90°-prueba 2)
- FC-PLA 100 % – (0°-prueba 5), (45°-prueba 5), (90°-prueba 4)

La exclusión se realizó únicamente en aquellos casos en los que una probeta cumplía al menos dos de los tres criterios establecidos, garantizando así objetividad en el proceso de depuración.

Posteriormente, se re calcularon las métricas estadísticas y se repitieron los análisis de varianza intra-configuración. En todos los casos, el estadístico F calculado resultó inferior al valor crítico correspondiente al nivel de significancia adoptado, lo que indicó ausencia de diferencias estadística mente significativas entre las probetas restantes dentro de cada configuración. Adicionalmente, se re aplicaron los criterios de detección de valores atípicos sobre los conjuntos de datos depurados con el fin de verificar la estabilidad del procedimiento. En esta segunda evaluación no se identificaron nuevas probetas candidatas a exclusión, lo que confirma la consistencia del proceso de depuración y la estabilidad estadística del conjunto final de datos.

Estos resultados permiten concluir que, tras la eliminación de comportamientos atípicos claramente identificados, el proceso de impresión 3D presenta una repetibilidad aceptable bajo las condiciones experimentales evaluadas.

4.7.6 Construcción de la base de datos consolidada para análisis factorial

Una vez verificada la repetibilidad intra-configuración y depurado el conjunto de datos, se construyó la base de datos consolidada para el análisis entre configuraciones experimentales. Para ello, se adoptaron los criterios de selección y representación definidos en la Sección 4.7.2,

de modo que cada probeta fue descrita mediante observaciones independientes, permitiendo la aplicación del análisis de varianza sin incurrir en pseudorreplicación.

La base se organizó en formato estructurado, donde cada fila corresponde a una probeta en un nivel específico de carga e incluye las siguientes variables:

- Material
- Porcentaje de relleno
- Ángulo de aplicación de la carga
- Nivel porcentual de carga relativa
- Identificador de probeta
- Valor promedio del nivel evaluado

Esta organización facilita la generación de subconjuntos de datos para el análisis de interacciones entre los factores experimentales.

4.7.7 Estrategia de análisis factorial e interacciones evaluadas

Dado que el objetivo del estudio es analizar la interacción entre los parámetros de impresión y ensayo a lo largo del proceso de carga, se adoptó una estrategia de análisis factorial basada en subconjuntos controlados.

En lugar de emplear un modelo multifactorial de tres vías, se realizaron análisis de varianza bifactoriales independientes, manteniendo constante un tercer factor en cada caso. Este enfoque permitió evaluar interacciones específicas con mayor claridad, evitar la complejidad de modelos

de orden superior con datos parcialmente des-balanceados y analizar el comportamiento mecánico desde distintas perspectivas.

Se definieron tres esquemas principales de análisis:

1. Interacción material – nivel de carga (ángulo fijo)

Para cada ángulo de aplicación de carga se evaluó la interacción entre el material y el nivel porcentual de carga relativa.

Este análisis permitió determinar si el comportamiento mecánico evoluciona de manera distinta entre materiales a medida que aumenta la sollicitación estructural, identificando posibles diferencias en rigidez progresiva, capacidad portante y respuesta cercana a la falla.

2. Interacción ángulo – nivel de carga (configuración fija)

Para cada combinación de material y porcentaje de relleno se analizó la interacción entre el ángulo de aplicación de carga y el nivel relativo de sollicitación.

Este enfoque permitió evaluar si la orientación de carga modifica la trayectoria mecánica de la probeta a lo largo del proceso de deformación, identificando posibles efectos de anisotropía estructural inducida por el proceso de manufactura aditiva.

3. Interacción ángulo – configuración (nivel de carga fijo)

Para cada nivel porcentual específico se evaluó la interacción entre el ángulo de carga y la configuración (material–porcentaje de relleno).

Este análisis permitió identificar en qué etapa del proceso de carga las diferencias entre configuraciones comienzan a manifestarse o intensificarse, distinguiendo comportamientos similares en régimen inicial de aquellos que divergen en proximidad a la falla.

4.7.8 *Modelo estadístico aplicado*

En cada esquema se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, valor comúnmente adoptado en estudios experimentales de ingeniería por ofrecer un balance adecuado entre el riesgo de error tipo I y la capacidad de detectar diferencias significativas.

En cada modelo se evaluaron el efecto principal de los factores A y B, así como su interacción ($A \times B$).

La hipótesis nula (H_0) establece que no existen diferencias significativas entre las medias de los niveles de los factores ni interacción entre ellos, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) plantea que al menos una media difiere o que existe interacción.

La decisión estadística se tomó comparando el estadístico F con su valor crítico y analizando los valores p asociados, determinando en cada caso si se rechaza o no H_0 .

4.7.9 *Verificación de supuestos del modelo ANOVA*

Previo a la interpretación de los resultados, se verificaron los supuestos fundamentales del modelo ANOVA:

- **Normalidad de los residuos:** Evaluada mediante la prueba de Shapiro–Wilk sobre los residuos estandarizados de cada modelo. En más del 95 % de los casos analizados, el estadístico W presentó valores con $p > 0,05$, lo que permite no rechazar la hipótesis nula de normalidad. Las desviaciones puntuales se consideran no críticas debido a la robustez del ANOVA frente a desviaciones moderadas
- **Homogeneidad de varianzas:** Verificada mediante la prueba de Levene para evaluar la

igualdad de varianzas entre grupos. En general, no se observaron diferencias significativas entre varianzas ($p > 0,05$). En los casos donde se detectó heterocedasticidad, se empleó la corrección de Welch.

- **Independencia de las observaciones:** Garantizada por el diseño experimental y el procedimiento de construcción de la base de datos descrito en 4.7.2, donde cada observación corresponde a una unidad experimental independiente.

El cumplimiento general de estos supuestos respalda la validez de las conclusiones derivadas de los análisis de varianza presentados a continuación.

- **Consideraciones sobre la potencia estadística del diseño experimental**

Si bien no se realizó un análisis formal de potencia estadística, es posible evaluar la suficiencia del diseño experimental a partir de los resultados obtenidos en los modelos ANOVA.

La potencia de una prueba depende principalmente del tamaño del efecto, el tamaño muestral y el nivel de significancia. En este estudio, los factores principales presentaron tamaños de efecto elevados, con valores de η^2 que, en la mayoría de los casos, superan ampliamente el umbral de efecto grande ($\eta^2 > 0,14$). Adicionalmente, los estadísticos F obtenidos fueron altos y los valores p asociados significativamente bajos ($p < 0,001$ en la mayoría de los análisis), lo que indica una clara diferenciación entre grupos experimentales.

En conjunto, estos resultados sugieren que el diseño experimental posee una alta capacidad para detectar efectos relevantes entre los factores evaluados. En consecuencia, la ausencia de significancia estadística en ciertos casos puede atribuirse, con alta probabilidad, a la baja magnitud de las diferencias, y no a limitaciones del tamaño muestral.

Esta interpretación se ve respaldada por la consistencia de los resultados a lo largo de las distintas configuraciones analizadas, lo que refuerza la confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

4.8 Resultados parciales

En esta sección se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las dos variables respuesta: rigidez (N/mm) y carga axial (N). Los análisis se realizaron siguiendo la estrategia de modelos bifactoriales descrita en la sección 4.7.7, con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Para cada modelo se evaluaron los efectos principales de los factores y su interacción.

Las tablas resumen incluyen los estadísticos definidos en la sección 4.7.3: F (adimensional), p -valor (probabilidad) y η^2 (tamaño del efecto, adimensional). Estos valores permiten determinar la significancia estadística y la magnitud de la influencia de cada factor. Para facilitar la lectura, las tablas se presentan de forma consolidada, mostrando únicamente estos estadísticos para los factores principales y la interacción. Las matrices de datos completas que sustentan estos análisis se encuentran en el anexo, en las figuras 37 hasta la 49.

4.8.1 Análisis de la rigidez

1. Interacción material – nivel de carga (ángulo fijo)

Para cada ángulo de aplicación de carga se evaluó la interacción entre el material (configuración de material y % de relleno) y el nivel porcentual de carga, con la rigidez como variable dependiente. La Tabla 3 resume los resultados de los modelos ANOVA para los tres ángulos.

Interpretación de resultados ANOVA:

- **Efecto del material:** Es el factor dominante en todos los ángulos ($\eta^2 > 0,877$). A 0° , la jerarquía de rigidez es 100 %-FC > 100 %-PLA > 22 %-FC > 44 %-FC > 30 %-FC. A 45° , el 100 %-PLA pierde su segunda posición frente al 44 %-FC. A 90° , la adhesión entre capas se vuelve crítica, y los materiales con bajo relleno presentan los valores más bajos.

Tabla 3ANOVAs para rigidez - material \times nivel de carga

Ángulo	Factor	F (N)	p-value	p eta-sq
0°	Nivel de carga	5,983	0,000311	0,242
	Material/relleno	385,241	3,66E-49	0,954
	Interacción	4,757	1,62E-06	0,504
45°	Nivel de carga	30,081	1,36E-15	0,586
	Material/relleno	535,387	2,23E-59	0,962
	Interacción	9,950	1,68E-13	0,652
90°	Nivel de carga	19,634	2,73E-11	0,495
	Material/relleno	143,102	1,26E-35	0,877
	Interacción	7,382	3,36E-10	0,596

Nota. Interacción material \times nivel de carga

- **Efecto del nivel de carga:** Siempre significativo, con tamaño de efecto menor que el del material. Su impacto es más notable a 45° y 90° ($\eta^2 \approx 0,46-0,50$), reflejando mayor variabilidad de la rigidez en orientaciones desfavorables.
- **Interacción:** Significativa en todos los ángulos. El tamaño del efecto aumenta con el ángulo (η^2 de 0.478 a 0.596), indicando que la forma en que la rigidez evoluciona con la carga depende más del material en orientaciones desfavorables.

2. Interacción ángulo – nivel de carga (configuración fija)

Para cada combinación de material y porcentaje de relleno se evaluó la interacción entre el ángulo y el nivel de carga. La Tabla 4 resume los resultados principales.

Interpretación de resultados ANOVA:

- **Efecto del nivel de carga:** Aunque no se muestra en la tabla resumen para simplificar, el análisis completo indica que este factor es significativo en todas las configuraciones ($p < 0,05$). Su tamaño de efecto varía entre moderado ($\eta^2 \approx 0,28-0,51$) en los FC-PLA y grande ($\eta^2 \approx 0,89$) en el 100 %-PLA, reflejando la evolución de la rigidez a lo largo del ensayo.

Tabla 4ANOVAs para rigidez - ángulo \times nivel de carga

Configuración	Factor	F (N)	p-value	p eta-sq
22 %-FC	Nivel de carga	11,756	1,28E-06	0,511
	Ángulo	180,963	3,04E-22	0,889
	Interacción	1,263	0,28665	0,183
30 %-FC	Nivel de carga	8,242	4,48E-05	0,423
	Ángulo	375,485	8,45E-29	0,943
	Interacción	3,103	0,00710	0,356
44 %-FC	Nivel de carga	4,746	0,00252	0,275
	Ángulo	84,714	8,75E-17	0,772
	Interacción	1,822	0,09493	0,226
100 %-FC	Nivel de carga	9,602	1,06E-05	0,460
	Ángulo	857,654	1,48E-36	0,974
	Interacción	27,437	7,08E-15	0,830
100 %-PLA	Nivel de carga	108,196	2,18E-25	0,887
	Ángulo	2321,200	7,65E-54	0,988
	Interacción	55,667	1,30E-23	0,890

Nota. Interacción ángulo \times nivel de carga

- Efecto del ángulo:** Es el factor dominante en todas las configuraciones ($\eta^2 \geq 0,772$). Los materiales con fibra presentan una dependencia angular más marcada que el PLA puro, cuyo η^2 es prácticamente total (0.988).
- Interacción:** Solo es significativa en 30 %-FC, 100 %-FC y 100 %-PLA ($p < 0,05$). En 22 %-FC y 44 %-FC, la degradación de la rigidez es paralela entre los tres ángulos; la orientación solo afecta la magnitud. En los casos con interacción significativa, la trayectoria de la rigidez frente al aumento de carga difiere según el ángulo, revelando mecanismos de falla dependientes de la orientación.

3. Interacción ángulo – configuración (nivel fijo)

La Tabla 5 resume los resultados para la carga axial, evaluando la interacción ángulo \times configuración para cada nivel de carga.

Tabla 5ANOVAs para rigidez - ángulo \times configuración

Nivel de carga	Factor	F	p-value	p eta-sq
20 %	Configuración	54,007	3,51E-17	0,818
	Ángulo	93,623	2,71E-17	0,796
	Interacción	4,747	0,000248	0,442
40 %	Configuración	157,746	5,66E-27	0,929
	Ángulo	187,201	2,15E-23	0,886
	Interacción	10,581	2,07E-08	0,638
60 %	Configuración	281,158	1,18E-32	0,959
	Ángulo	439,674	1,37E-31	0,948
	Interacción	27,477	2,00E-15	0,821
80 %	Configuración	514,505	9,44E-39	0,977
	Ángulo	1020,147	4,73E-40	0,977
	Interacción	64,776	4,30E-23	0,915
100 %	Configuración	529,712	4,77E-39	0,978
	Ángulo	1131,866	4,12E-41	0,979
	Interacción	73,544	2,69E-24	0,925

Nota. Interacción ángulo \times configuración**Interpretación de resultados ANOVA:**

- **Efecto de la configuración:** Es un factor determinante desde el inicio del ensayo ($\eta^2 > 0,79$). Su influencia crece progresivamente hasta niveles prácticamente totales en la falla ($\eta^2 > 0,97$), lo que indica que la elección del material y el porcentaje de relleno es crítica para la rigidez en todas las etapas del ensayo.
- **Efecto del ángulo:** También es muy relevante desde el inicio ($\eta^2 > 0,77$) y su importancia aumenta hasta ser prácticamente total en la falla ($\eta^2 > 0,97$). Esto confirma la fuerte anisotropía del material en todo el rango de carga.
- **Interacción:** Es significativa en todos los niveles ($p < 0,001$) y su importancia (η^2) aumenta monótonamente desde 0.428 en el 20 % hasta 0.923 en el 100 %. Esto indica que las diferencias entre configuraciones se amplifican a medida que la probeta se

acerca a la falla, siendo el comportamiento en la rotura el que mejor discrimina entre materiales.

4.8.2 *Análisis de la carga axial*

De manera análoga al análisis de rigidez, se aplicaron los mismos modelos bifactoriales utilizando como variable dependiente la carga axial (N).

1. **Interacción material – nivel de carga (ángulo fijo)**

La Tabla 6 resume los resultados de los ANOVAs para la carga axial, evaluando la interacción material \times nivel de carga para cada ángulo.

Tabla 6

ANOVAs para carga axial - material \times nivel de carga

Ángulo	Factor	F (N)	p-value	p eta-sq
0°	Nivel de carga	2406,659	2,46E-78	0,992
	Material/relleno	1157,224	1,50E-66	0,984
	Interacción	62,681	1,00E-36	0,930
45°	Nivel de carga	909,781	7,25E-69	0,977
	Material/relleno	801,892	1,36E-66	0,974
	Interacción	94,202	5,24E-47	0,947
90°	Nivel de carga	14043,472	5,37E-113	0,999
	Material/relleno	19342,008	1,50E-118	0,999
	Interacción	2109,219	5,55E-98	0,998

Nota. Interacción material \times nivel de carga

Interpretación de resultados ANOVA:

- **Efecto del nivel de carga:** Como es esperado en un ensayo controlado por desplazamiento, es el factor dominante en todos los ángulos ($\eta^2 > 0,97$).

- **Efecto del material:** También tiene una influencia masiva. La jerarquía es 100 %-PLA > 100 %-FC > 44 %-FC \approx 30 %-FC > 22 %-FC. El PLA puro alcanza las cargas más altas en todas las orientaciones, duplicando al 100 %-FC a 45° y 90°.
- **Interacción:** Altamente significativa en todos los ángulos. El tamaño del efecto es muy elevado ($\eta^2 \geq 0,93$), indicando que la tasa de incremento de la carga depende del material, y esta diferencia se amplifica hacia la falla.

2. Interacción ángulo – nivel de carga (configuración fija)

La Tabla 7 resume resultados para la carga axial, evaluando la interacción ángulo \times nivel de carga para cada configuración.

Tabla 7

ANOVAs para carga axial - ángulo \times nivel de carga

Configuración	Factor	F (N)	p-value	p eta-sq
22 %-FC	Nivel de carga	985,859	3,51E-43	0,989
	Ángulo	824,218	3,55E-36	0,973
	Interacción	46,172	3,56E-19	0,891
30 %-FC	Nivel de carga	2041,337	3,11E-50	0,995
	Ángulo	1850,277	6,21E-44	0,988
	Interacción	100,285	4,34E-26	0,947
44 %-FC	Nivel de carga	3364,849	4,19E-60	0,996
	Ángulo	2660,125	1,68E-51	0,991
	Interacción	164,256	3,73E-33	0,963
100 %-FC	Nivel de carga	4391,955	1,09E-57	0,997
	Ángulo	2903,572	2,71E-48	0,992
	Interacción	165,321	9,67E-31	0,967
100 %-PLA	Nivel de carga	1190,235	1,09E-52	0,989
	Ángulo	107,777	9,40E-20	0,797
	Interacción	10,156	1,43E-08	0,596

Nota. Interacción ángulo \times nivel de carga

Interpretación de resultados ANOVA

- **Efecto del nivel de carga:** Aunque no se muestra en la tabla resumen, el análisis completo indica que este factor es dominante en todas las configuraciones ($\eta^2 > 0,98$, $p < 0,001$), como es esperado en un ensayo controlado por desplazamiento.
- **Efecto del ángulo:** En todos los FC-PLA la anisotropía es extremadamente alta ($\eta^2 \geq 0,97$), mientras que en el PLA puro es marcadamente menor ($\eta^2 = 0,797$). El PLA presenta un patrón único de resistencia: $0^\circ > 90^\circ > 45^\circ$.
- **Interacción:** Significativa en todas las configuraciones. En los FC-PLA el tamaño del efecto es muy grande ($\eta^2 \geq 0,89$), indicando que la diferencia entre ángulos se amplía con la carga. En el PLA, aunque la interacción es significativa, su tamaño es menor ($\eta^2 = 0,596$), reflejando trayectorias de crecimiento más similares entre ángulos.

3. Interacción ángulo – configuración (nivel fijo)

La Tabla 8 resume los resultados para la carga axial, evaluando la interacción ángulo \times configuración para cada nivel de carga.

Interpretación de resultados ANOVA:

- **Efecto de la configuración:** Es un factor determinante desde el inicio del ensayo ($\eta^2 > 0,98$). Su influencia se mantiene muy alta a lo largo de todo el ensayo, indicando que la capacidad de carga depende fuertemente del material y el porcentaje de relleno en todas las etapas.
- **Efecto del ángulo:** También es muy relevante ($\eta^2 > 0,94$) y se mantiene constante en el tiempo, confirmando que la anisotropía es una característica estructural que se manifiesta desde los primeros niveles de carga y persiste hasta la falla.
- **Interacción:** Es altamente significativa en todos los niveles ($p < 0,001$) y su tamaño de efecto es muy elevado ($\eta^2 > 0,93$). Esto indica que las diferencias en capacidad de carga entre materiales y la dependencia del ángulo se establecen desde etapas tempranas y se mantienen hasta la falla.

Tabla 8*ANOVAs para carga axial - ángulo × configuración*

Nivel de carga	Factor	F (N)	p-value	p eta-sq
20 %	Configuración	1014,836	1,04E-45	0,988
	Ángulo	438,487	1,45E-31	0,948
	Interacción	92,763	1,56E-26	0,939
40 %	Configuración	1139,885	6,61E-47	0,990
	Ángulo	504,312	5,97E-33	0,955
	Interacción	104,609	1,05E-27	0,946
60 %	Configuración	1032,802	6,87E-46	0,989
	Ángulo	455,794	6,02E-32	0,950
	Interacción	94,652	9,94E-27	0,940
80 %	Configuración	1157,445	4,60E-47	0,990
	Ángulo	509,903	4,63E-33	0,955
	Interacción	106,135	7,57E-28	0,946
100 %	Configuración	1060,169	3,69E-46	0,989
	Ángulo	483,354	1,58E-32	0,953
	Interacción	97,398	5,23E-27	0,942

Nota. Interacción ángulo × configuración

4.8.3 Discusión: Análisis del comportamiento mecánico global

Los análisis de varianza presentados en la sección anterior permitieron identificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la rigidez y la capacidad de carga de las probetas. Sin embargo, estos análisis no explican por sí mismos las causas fenomenológicas que originan dichas diferencias. En esta sección se aborda esta cuestión, analizando el comportamiento mecánico de las probetas a partir de las curvas de carga–desplazamiento y proponiendo mecanismos de deformación y falla coherentes con los resultados observados.

1. Influencia del porcentaje de relleno en el comportamiento mecánico

El porcentaje de relleno influye directamente en la respuesta mecánica de las probetas, particularmente en los materiales reforzados con fibra de carbono (FC-PLA). Los resultados

evidencian un comportamiento no lineal, donde la rigidez y la capacidad de carga no aumentan de forma proporcional con el contenido de material.

- **22 %-FC:** Este material presenta una rigidez relativamente alta (1179,54 N/mm a 0°), pero la menor capacidad de carga (1987,78 N). Esto se debe a la baja densidad de fibras, que genera concentraciones locales de tensión en la matriz. Como resultado, la falla ocurre de forma prematura y con comportamiento frágil, evidenciado por una respuesta con poca deformación plástica.
- **30 %-FC y 44 %-FC:** El aumento del relleno incrementa la capacidad de carga (2215,97 N y 2293,91 N a 0°), debido a una mejor transferencia de esfuerzos entre fibras y matriz. Además, la redistribución de tensiones reduce concentraciones críticas y permite mayor deformación antes de la falla. Sin embargo, la rigidez disminuye respecto al 22 %-FC (905,64 N/mm y 944,77 N/mm), lo que indica una mayor participación de la matriz, favoreciendo la tenacidad sobre la rigidez.
- **100 %-FC:** La estructura se aproxima a un sólido denso, con una distribución más uniforme de fibras y matriz. Esto permite una transferencia de esfuerzos más eficiente, resultando en la mayor rigidez (1954,94 N/mm) y capacidad de carga (2869,06 N) entre los FC-PLA. No obstante, el comportamiento sigue siendo frágil, con falla abrupta y limitada deformación plástica.
- **100 %-PLA:** Al no contener fibras, presenta un comportamiento homogéneo. Aunque su rigidez (1506,12 N/mm) es inferior al 100 %-FC, alcanza la mayor capacidad de carga (4468,92 N). Esto se debe a la ausencia de concentradores de tensión, lo que permite una deformación plástica más uniforme y una mejor redistribución de esfuerzos, resultando en un comportamiento más dúctil.

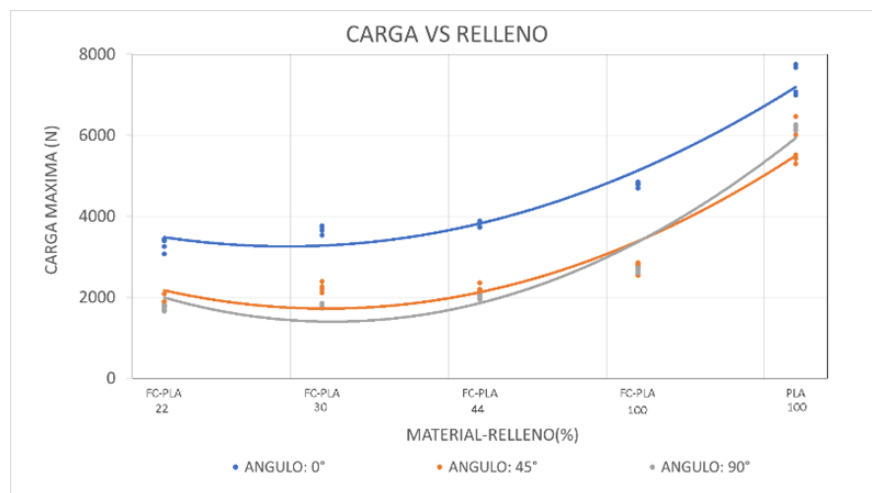
Análisis gráfico complementario

La Figura 26 presenta la evolución de la carga máxima en función del porcentaje de relleno para los tres ángulos evaluados. Se observa claramente la no linealidad de la relación:

- Para el ángulo de 0° , la carga aumenta de forma pronunciada al pasar de 44 % a 100 % de relleno, tanto en FC-PLA como en PLA. Sin embargo, el incremento de 22 % a 30 % y de 30 % a 44 % es mucho más modesto, lo que sugiere que, en FC-PLA, el beneficio del aumento de relleno solo es significativo cuando se alcanza la máxima densidad (100 %).
- Para los ángulos de 45° y 90° , la tendencia es similar, aunque con valores absolutos mucho menores. Es particularmente notable que, a 90° , las configuraciones de 22 %, 30 % y 44 % de FC-PLA presentan valores muy próximos entre sí, indicando que, en esta orientación desfavorable, el aumento de relleno no se traduce en una mejora sustancial de la capacidad de carga, probablemente porque el mecanismo de falla está dominado por la adhesión entre capas y no por la densidad del relleno.
- El 100 %-PLA destaca en todos los ángulos, pero especialmente a 0° , donde la diferencia con el 100 %-FC es máxima, confirmando que la ausencia de discontinuidades es más importante que la rigidez adicional que aporta la fibra.

Figura 26

curva de carga vs porcentaje de relleno



2. Influencia del ángulo de carga y la anisotropía

La anisotropía observada en todas las configuraciones se asocia directamente al proceso de impresión FDM, en el cual los filamentos se depositan con una orientación preferente. En consecuencia, la resistencia y rigidez son máximas cuando la carga se aplica en la dirección de los filamentos (0°), ya que los esfuerzos se transmiten a lo largo de las cadenas poliméricas y, en el caso del FC-PLA, también a través de las fibras de carbono.

Al desviarse de esta dirección, el comportamiento mecánico pasa a estar controlado por la adhesión entre capas. A 45° , la presencia de esfuerzos cortantes en las interfases reduce significativamente la capacidad resistente, especialmente en el FC-PLA, donde las fibras pueden actuar como concentradores de tensión y favorecer la delaminación. A 90° , la carga se transmite casi exclusivamente a través de la matriz y las uniones interlaminares, constituyendo la condición más desfavorable.

Sin embargo, en el 100 %-PLA se observa una mayor capacidad de carga a 90° respecto a 45° , lo que sugiere que la matriz polimérica, en ausencia de fibras, redistribuye mejor las tensiones bajo sollicitación transversal pura que en estados combinados de tracción y corte, más propensos a la falla prematura.

Análisis gráfico complementario

La Figura 27 muestra la variación de la carga máxima con el ángulo de carga para las diferentes configuraciones. Esta representación permite visualizar la anisotropía de forma directa:

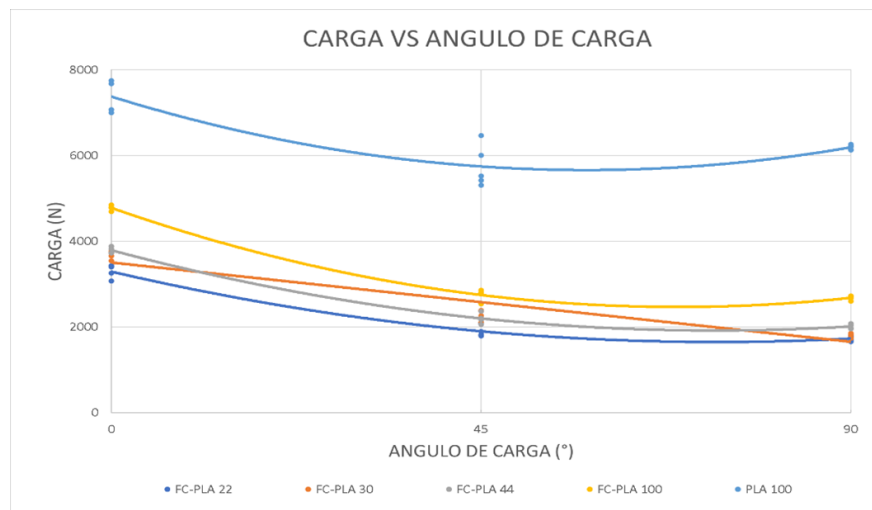
- Todos los materiales con fibra (FC-PLA) presentan una caída pronunciada de la carga al pasar de 0° a 45° , y una caída adicional, aunque menos pronunciada, de 45° a 90° . La forma de la curva es similar para todos los porcentajes de relleno, aunque con diferentes magnitudes.
- El 100 %-PLA presenta un comportamiento cualitativamente diferente: la caída de 0° a 45° es menos pronunciada que en los FC-PLA, y lo más notable, la carga a 90° es superior a la de 45° . Esta forma de \ddot{U} invertida ($0^\circ > 90^\circ > 45^\circ$) es única del PLA puro y confirma que el mecanismo de falla a 45° (con componente de corte) es más

desfavorable que a 90° (tracción pura perpendicular a las capas) cuando no hay fibras que actúen como concentradores de tensiones.

- La comparación visual refuerza la conclusión de que la fibra de carbono exagera la anisotropía, mientras que el PLA puro, al ser más homogéneo, presenta un comportamiento más isotrópico y, en ciertos aspectos, contraintuitivo.

Figura 27

curva de carga vs ángulo de carga



3. Comparación del comportamiento entre FC-PLA y PLA

La comparación entre ambos materiales revela un compromiso fundamental entre rigidez y tenacidad (o capacidad de carga última). El FC-PLA, gracias a la inclusión de fibras de carbono, es más rígido en todas las configuraciones. Sin embargo, esta rigidez tiene un costo: la introducción de discontinuidades (interfases fibra-matriz) que actúan como concentradores de tensiones y puntos débiles que limitan la carga máxima que el material puede soportar antes de fallar. La falla en el FC-PLA es más frágil y, en porcentajes de relleno intermedios, la matriz no es suficiente para redistribuir las tensiones de manera efectiva.

El PLA puro, por el contrario, es un material homogéneo y continuo. Al no tener fibras, no presenta las discontinuidades inherentes del compuesto. Esto le permite deformarse plás-

ticamente y redistribuir las tensiones de manera mucho más eficiente, alcanzando cargas últimas muy superiores, especialmente en la orientación favorable (0°). Su menor rigidez se compensa con una mayor tenacidad y capacidad de absorber energía antes de la rotura.

4. Síntesis: Mecanismos de deformación y falla propuestos

A la luz de los resultados, se proponen los siguientes mecanismos para explicar el comportamiento observado:

- **FC-PLA con bajo relleno (22 %):** Predomina la concentración de tensiones en fibras aisladas. La matriz tiene poca participación. La falla es frágil y prematura, iniciada por la rotura de la matriz en los puntos de concentración o por despegue fibra-matriz. La rigidez inicial es alta debido a la respuesta elástica de las fibras tensionadas.
- **FC-PLA con relleno intermedio (30 %, 44 %):** La matriz comienza a tener un papel activo en la redistribución de tensiones. Hay más fibras, pero también más matriz para transferir las cargas entre ellas. Esto permite alcanzar mayores cargas antes de la falla, con cierta deformación plástica. La rigidez puede ser ligeramente inferior a la del 22 % porque la matriz, más presente, se deforma más antes de que las fibras alcancen su máxima tensión.
- **FC-PLA con alto relleno (100 %):** El material se comporta como un compuesto homogéneo y denso. La transferencia de esfuerzos es óptima y la rigidez es máxima. La falla es frágil y se produce por la rotura de las fibras o de la matriz cuando se alcanza la tensión última del conjunto. No hay espacio para la redistribución plástica significativa.
- **PLA 100 %:** El material se comporta como un polímero homogéneo y dúctil. La deformación plástica de la matriz permite una excelente redistribución de tensiones, lo que retrasa la falla y permite alcanzar cargas muy elevadas. La anisotropía existe, pero es menos pronunciada que en los compuestos, y el modo de falla es más dúctil, especialmente en la orientación favorable.

Esta interpretación es coherente con las diferencias observadas en las curvas carga-desplazamiento (Figura 50) y con los resultados de los ANOVAs, proporcionando una explicación fenomenológica sólida para el comportamiento mecánico de las probetas.

Validación mediante curvas carga-desplazamiento

Las curvas carga-desplazamiento obtenidas de los ensayos (ver Figura 50) proporcionan una validación visual de los mecanismos propuestos:

- Para el 22 %-FC, la curva muestra una pendiente inicial pronunciada (alta rigidez inicial) pero una caída brusca y repentina cerca de la carga máxima, con muy poca deformación plástica. Esto es coherente con una falla frágil iniciada por concentración de tensiones en fibras aisladas, donde la matriz no tiene oportunidad de redistribuir esfuerzos.
- Para el 44 %-FC, la pendiente inicial es ligeramente menor, pero la curva se extiende más en deformación antes de la caída final, mostrando una zona no lineal más extensa. Esto refleja la participación activa de la matriz en la redistribución de tensiones y un modo de falla menos frágil, con mayor absorción de energía.
- Para el 100 %-PLA, la curva presenta una pendiente inicial alta, seguida de una extensa zona no lineal (plasticidad) y una caída gradual, característica de un material dúctil y homogéneo. La ausencia de caídas bruscas confirma que no hay concentradores de tensiones internos y que la matriz puede deformarse plásticamente de manera uniforme hasta la falla.

Estas diferencias en la forma de las curvas respaldan las hipótesis fenomenológicas y proporcionan una base visual para la comprensión de los mecanismos de falla.

4.8.4 *Determinación de Propiedades Mecánicas para Simulación*

Para la siguiente fase del proyecto, que consiste en la simulación por elementos finitos del chasis de un dron, se requieren propiedades mecánicas constitutivas del material que reflejen su comportamiento Ortotrópico.

A partir de los ensayos de tracción y del análisis de correlación de imágenes digitales (DIC 2D), se determinaron las siguientes propiedades para cada configuración, considerando un sistema de ejes ortotrópicos:

- Eje X: dirección paralela a la orientación de impresión (ángulo de carga 0°).
- Eje Y: dirección perpendicular a la orientación de impresión (ángulo de carga 90°).
- Eje Z: dirección transversal a la probeta (espesor). Dado que la estructura de deposición de las capas es idéntica en las direcciones Y y Z, se asumió un comportamiento equivalente (isotropía transversal), por lo que las propiedades en Z se consideran iguales a las determinadas en Y.

Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas en los ensayos (Figura 51) constituyen la base para el cálculo de estas propiedades. En dichas figuras se puede observar, a simple vista, el marcado efecto del material, el porcentaje de relleno y el ángulo de carga sobre el comportamiento mecánico. Las curvas del 100 %-PLA, por ejemplo, se extienden hasta deformaciones y esfuerzos mucho mayores que las del FC-PLA, evidenciando su mayor ductilidad y capacidad de carga última, a pesar de una pendiente inicial (rigidez) menor en algunos casos.

A partir de estas curvas y de los datos del DIC 2D, se calcularon las propiedades mecánicas para cada configuración. La Tabla 9 presenta un resumen de estos valores, que servirán como datos de entrada para el modelo de simulación.

Tabla 9*Propiedades mecánicas calculadas para cada eje experimental*

Configuración	Eje	σ_{ult} (MPa)	E (MPa)	ν (N/D)	τ (MPa)	G (MPa)	ρ (kg/m ³)
FC-PLA 22 %	X	31,633	769,840	-0,217	19,720	491,660	660,790
	Y	16,462	491,770	-0,199	4,400	307,150	
	Z	16,462	491,770	-0,199	4,400	307,150	
FC-PLA 30 %	X	31,115	551,170	-0,169	20,770	331,680	712,820
	Y	15,014	410,630	-0,474	9,350	390,290	
	Z	15,014	410,630	-0,474	9,350	390,290	
FC-PLA 44 %	X	29,199	500,150	-0,137	18,030	289,870	801,270
	Y	15,332	383,240	-0,406	8,920	322,410	
	Z	15,332	383,240	-0,406	8,920	322,410	
FC-PLA 100 %	X	23,932	855,330	-0,480	19,170	822,540	1082,229
	Y	13,653	395,320	-0,391	9,220	324,620	
	Z	13,653	395,320	-0,391	9,220	324,620	
PLA 100 %	X	37,412	585,110	-0,060	11,640	311,160	1175,890
	Y	31,588	320,300	-0,122	18,890	182,470	
	Z	31,588	320,300	-0,122	18,890	182,470	

Nota. Los valores se presentan como promedio de las 5 pruebas para cada configuración.

1. Metodología de cálculo de las propiedades

- **Esfuerzo último (σ_{ult}):** Se determinó como la máxima carga registrada durante el ensayo dividida por el área de la sección transversal inicial de la probeta.
- **Módulo de elasticidad (E):** Se calculó a partir de la pendiente de la curva esfuerzo–deformación en la región lineal elástica, utilizando los puntos cercanos al límite elástico (aproximadamente el 0.2 % de deformación).
- **Relación de Poisson (ν):** Se obtuvo mediante el análisis de correlación de imágenes digitales (DIC-2D). En la zona elástica, se midió la deformación transversal (ancho de la probeta) y la deformación axial, y se calculó

$$\nu = -\frac{\text{deformación transversal}}{\text{deformación axial}} \quad (4)$$

- **Módulo de corte (G):** Para un material ortotrópico con isotropía transversal (Y-Z), se calculó a partir del módulo de elasticidad y la relación de Poisson mediante la relación elástica fundamental:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

- **Esfuerzo cortante de falla (τ):** Dado que no se realizaron ensayos de corte puro, se estimó a partir de la deformación cortante máxima asumiendo pequeños ángulos. Utilizando la deformación axial y la relación de Poisson, se calculó la deformación cortante mediante consideraciones geométricas y se relacionó con el esfuerzo principal. Este valor representa una aproximación de la resistencia al corte del material en el plano de la capa.
- **Densidad (ρ):** Se determinó experimentalmente midiendo la masa de cada probeta con una balanza analítica y su volumen mediante el desplazamiento de agua o medición geométrica directa. El valor reportado corresponde al promedio de las probetas de cada configuración.

2. Análisis del esfuerzo último

El esfuerzo último, definido como la máxima capacidad de carga antes de la falla, presenta una tendencia consistente con la carga axial. En la dirección de impresión (0°), el 100 %-PLA alcanza el valor más alto (37.41 MPa), mientras que los FC-PLA muestran una disminución progresiva al aumentar el contenido de fibra (31.63 MPa para 22 %, 31.12 MPa para 30 %, 29.20 MPa para 44 % y 23.93 MPa para 100 %).

Este comportamiento se atribuye a que, aunque las fibras están alineadas con la carga, su elevada rigidez genera concentraciones de tensión en la matriz, favoreciendo la falla prematura. En contraste, el PLA puro permite una redistribución plástica más uniforme, lo que retrasa la falla y permite alcanzar mayores esfuerzos.

En la dirección perpendicular (90°), la tendencia se conserva, aunque con una reducción significativa en todos los materiales. Esta disminución es más pronunciada en los compuestos reforzados (por ejemplo, el 100 %-FC pasa de 23.93 a 13.65 MPa), lo que evidencia la debilidad de la adhesión interlaminar. Por su parte, el 100 %-PLA presenta una menor variación entre orientaciones (37.41 MPa a 0° frente a 31.59 MPa a 90°), confirmando un comportamiento más cercano a la isotropía.

3. Análisis del módulo de Young

El módulo de elasticidad presenta una tendencia inversa al esfuerzo último. En la dirección de impresión (0°), el material más rígido es el 100 %-FC (855.33 MPa), seguido por el 22 %-FC (769.84 MPa), el 100 %-PLA (585.11 MPa), el 30 %-FC (551.17 MPa) y el 44 %-FC (500.15 MPa). Resulta destacable que el 22 %-FC supere a configuraciones con mayor contenido de fibra, lo que sugiere que una baja densidad de refuerzo, sometida a alta tensión en una matriz poco continua, puede generar una respuesta elástica inicial elevada, aunque asociada a una falla prematura.

En la dirección perpendicular (90°), todos los módulos disminuyen significativamente, evidenciando la influencia de la adhesión interlaminar. En este caso, el 22 %-FC presenta el valor más alto (491.77 MPa), seguido por el 30 %-FC (410.63 MPa), el 100 %-FC (395.32 MPa), el 44 %-FC (383.24 MPa) y el 100 %-PLA (320.30 MPa). La dispersión observada en estos valores refleja la variabilidad asociada a la unión entre capas, especialmente en configuraciones con menor densidad de material.

4. Análisis del límite elástico y relación de Poisson

El límite elástico (σ_y) no se incluyó en la tabla por simplicidad, en su lugar se encuentra en la Tabla 10. La relación de Poisson (ν) presenta valores negativos en varias configuraciones, especialmente en el eje X del 22 %-FC (-0.217) y en el eje Y del 100 %-FC (-0.391). Estos valores negativos indican un comportamiento auxético (expansión lateral bajo tracción), que puede deberse a la microestructura de las fibras y a la forma en que se reorientan bajo carga.

En el PLA, las relaciones de Poisson son cercanas a cero o ligeramente negativas, lo que sugiere un comportamiento más convencional.

5. Análisis del comportamiento transversal (Ejes Y y Z)

Para los ejes Y y Z, se asumió isotropía transversal debido a la simetría de la estructura de impresión en el plano de las capas. Los valores reportados para Y se aplican también a Z. En configuraciones como 30 %-FC y 44 %-FC, algunos valores están pendientes de verificación por problemas en la medición con DIC-2D. No obstante, los valores disponibles muestran que la resistencia y rigidez en estas direcciones son sustancialmente menores que en el eje X, lo que debe ser considerado cuidadosamente en el diseño de piezas que puedan estar sometidas a cargas en múltiples direcciones.

6. Implicaciones para la simulación

Los valores de la Tabla 9 sirven como base para definir el modelo de material ortotrópico en la simulación. Para el análisis del chasis del dron, se asignarán las propiedades según la orientación de carga en cada elemento estructural. La selección final del material y del porcentaje de relleno se realizará considerando el balance entre rigidez, resistencia y peso, junto con las conclusiones previas sobre la repetibilidad y confiabilidad del proceso de impresión.

5 Análisis y resultados

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos, se presenta un análisis general del comportamiento mecánico de las configuraciones evaluadas. De manera global, se observa que las configuraciones con mayor fracción volumétrica de fibra de carbono presentan incrementos en rigidez y capacidad de carga, mientras que la orientación de impresión influye de manera significativa en la distribución de esfuerzos y mecanismos de falla.

Los resultados experimentales muestran una clara dependencia entre la orientación de carga (0° , 45° y 90°) y la respuesta mecánica del material, evidenciando un comportamiento anisotrópico característico de la manufactura aditiva. Este comportamiento es validado mediante el análisis estadístico ANOVA, el cual confirma la significancia de las variables estudiadas y sus interacciones.

5.1 Análisis integrado y selección de la mejor configuración

5.1.1 *Tabla resumen de resultados experimentales y de simulación*

La **Tabla 10** Y **Tabla 11** recopila las propiedades experimentales obtenidas mediante ensayos de tracción y correlación de imágenes (Ncorr), así como los resultados de simulación en SolidWorks mostrados en la figura 52, 53, 54, 55 y 56. Se incluyen el módulo elástico en la dirección de impresión (E_x) y en las direcciones transversales ($E_y = E_z$), los límites elásticos correspondientes, la densidad, y los indicadores de simulación: desplazamiento máximo, masa y relación desplazamiento/masa (rigidez específica). Según Reverte et al., 2020 en su estudio la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante Fused Filament Fabrication (FFF) con PLA reforzado con fibra de carbono corta está intrínsecamente limitada por la adhesión interlaminar y la porosidad resultante del proceso. En este estudio, se reportan valores de resistencia a la tracción de aproximadamente 18.2 MPa para orientaciones verticales y rangos que no superan los 50 MPa en configuraciones

optimizada.

La concordancia de resultados con este estudio radica en la naturaleza del refuerzo, que diferencia de los compuestos de fibra continua, el filamento utilizado en esta investigación contiene fibra de carbono corta (picada). Como señala Reverte et al., 2020, las fibras cortas no logran una transferencia de carga tan eficiente, y su principal función es aumentar la rigidez (módulo elástico) más que la resistencia máxima a la tracción, la cual sigue dependiendo mayoritariamente de la matriz polimérica. Además la rotura de las probetas por la prueba Arcan introduce estados de esfuerzos combinados (corte y tracción). Por otro lado, adicionalmente, se observa que la incorporación del 15 % de fibra de carbono altera el modo de falla del espécimen, transitando de un comportamiento tenaz a uno predominantemente frágil. Esta reducción en la ductilidad, sumada a los valores de resistencia obtenidos (25-30 MPa), confirma que las fibras cortas actúan como agentes de refuerzo en la rigidez estructural, pero introducen discontinuidades en la matriz que limitan la transferencia de carga máxima antes de la falla interlaminar, un fenómeno ampliamente documentado en sus ensayos de caracterización.

Tabla 10

Propiedades mecánicas y densidad por configuración

Configuración	Ex (MPa)	Ey-Ez (MPa)	σ_{yx} (MPa)	σ_{yyz} (MPa)	ρ (Kg/m³)
FC-PLA 22 %	769,836	491,773	25,886	5,917	660,787
FC-PLA 30 %	551,169	410,634	30,472	6,758	712,818
FC-PLA 44 %	500,147	383,239	28,232	7,632	801,270
FC-PLA 100 %	855,329	395,320	13,630	8,187	1082,340
PLA 100 %	585,111	320,299	21,045	31,15	1175,889

Nota. Propiedades mecánicas y densidad obtenidas para cada configuración.

- Relación calculada con el límite elástico más bajo de la dirección involucrada en la sollicitación principal.
- El FC-PLA 100 % presenta una tensión de Von Mises que supera su límite elástico en X

Tabla 11*Indicadores de desempeño estructural por configuración*

Configuración	Desplazamiento (mm)	Masa (Kg)	Despl./masa	Tensión/límite
FC-PLA 22 %	34,858	0,023	1566,651	2,716
FC-PLA 30 %	30,871	0,024	1286,291	2,771
FC-PLA 44 %	35,447	0,027	1314,312	2,318
FC-PLA 100 %	41,114	0,036	1128,575	2,075
PLA 100 %	50,914	0,036	1286,032	0,456

Nota. Indicadores de desplazamiento y relación esfuerzo-desempeño por configuración.

(13,6 MPa) y ampliamente en Y/Z, por lo que se considera no aceptable.

5.2 Análisis de resultados experimentales

Los ensayos de tracción evidencian una marcada dependencia de las propiedades mecánicas con el porcentaje de relleno. El FC-PLA 100 % presenta el mayor módulo en dirección de impresión (855 MPa), pero su bajo límite elástico (13,6 MPa) y alta densidad limitan su desempeño estructural. Por el contrario, el FC-PLA 30 % ofrece el comportamiento más equilibrado: módulo en X intermedio (551 MPa), módulos transversales superiores a los del PLA puro y al 44 %, mayor límite elástico en X (30,5 MPa) y densidad moderada, lo que sugiere una relación rigidez/peso favorable. Además, el ANOVA indica que, solo en esta configuración, el nivel de carga no afecta significativamente la rigidez ($p > 0,05$), reflejando una respuesta lineal y predecible, deseable en aplicaciones estructurales.

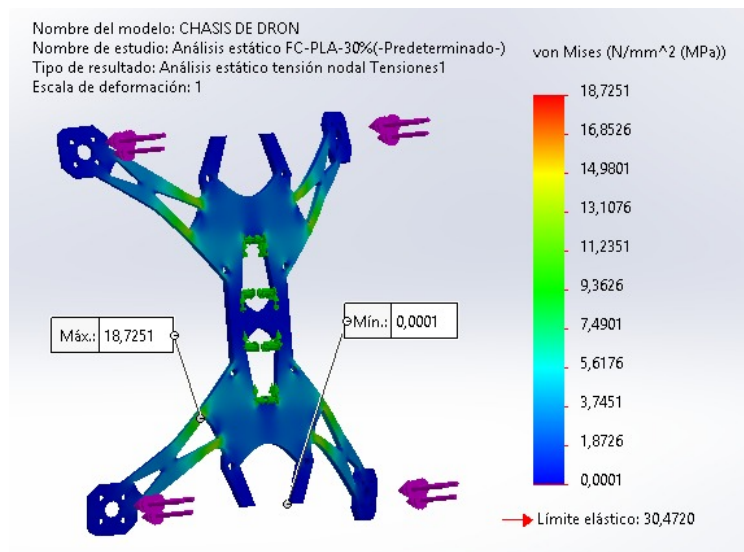
5.3 Correlación con los resultados de simulación

La simulación en SolidWorks con propiedades ortotrópicas experimentales reproduce las tendencias observadas. El FC-PLA 30 % presenta el menor desplazamiento (30,87 mm), eviden-

ciendo una mayor rigidez efectiva del chasis por su equilibrio de propiedades mecánicas, independientemente del módulo en X (el FC-PLA 22 %, con E_x superior, muestra mayor desplazamiento). En eficiencia estructural, su relación desplazamiento/masa (1286 mm/kg) lo posiciona como la mejor alternativa, comparable al PLA puro pero con un 39 % menos de desplazamiento absoluto; su masa supera en solo 1,75 g a la del FC-PLA 22 %, mientras que su rigidez mejora un 11,4 %.

Figura 28

Chasis en simulación



5.4 Selección de la mejor configuración

Con base en resultados experimentales y validación por simulación, la configuración FC-PLA con 30 % de relleno es la más adecuada. Presenta el mayor límite elástico en dirección principal (30,5 MPa), módulos transversales de 410 MPa y densidad moderada, logrando una relación rigidez/peso equilibrada. El ANOVA indica que su rigidez no depende del nivel de carga ($p > 0,05$), reflejando un comportamiento lineal y predecible. Estructuralmente, ofrece el menor desplazamiento (30,87 mm) y la mejor relación desplazamiento/masa, con tensiones de Von Mises (18,7 MPa) por debajo de los límites admisibles, garantizando un margen de seguridad adecuado. Así, el FC-PLA con 30 % de relleno proporciona el mejor balance entre rigidez, peso y seguridad para el

chasis de dron (Ver figuras 28 y 53).

5.5 Ranking de configuraciones

Con base en criterios de seguridad estructural, propiedades mecánicas, simulación y resultados ANOVA, se establece el siguiente orden jerárquico de las configuraciones:

Tabla 12

Selección de configuración según desempeño estructural

Posición	Configuración	Justificación
1	FC-PLA 30 %	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor rigidez (menor desplazamiento: 30,87 mm). - Mejor relación desplazamiento/masa (1286 mm/kg). - Límite elástico en X más alto (30,5 MPa) y módulos transversales equilibrados. - Comportamiento lineal y predecible (ANOVA sin diferencias significativas por nivel de carga).
2	FC-PLA 22 %	<ul style="list-style-type: none"> - Muy baja masa (22,25 g) y mejor relación desplazamiento/masa (1567 mm/kg). - Rigidez moderada (desplazamiento 34,86 mm). - Aceptable para aplicaciones con cargas predominantemente axiales.
3	FC-PLA 44 %	<ul style="list-style-type: none"> - Propiedades intermedias entre el 22 % y el 30 %. - Masa mayor (26,97 g) y desplazamiento similar al 22 % (35,45 mm). - Comportamiento estructural aceptable, menos eficiente.
4	PLA 100 %	<ul style="list-style-type: none"> - Material de referencia sin fibra de carbono. - Mayor desplazamiento (50,91 mm) y masa (39,59 g). - Seguro, pero poco eficiente en aplicaciones de rigidez.
5	FC-PLA 100 %	<ul style="list-style-type: none"> - Descartado por razones de seguridad: tensión de Von Mises (16,99 MPa) supera el límite elástico en las direcciones transversales (8,2 MPa y en X (13,6 MPa). - Aunque presenta alto módulo en X, su fragilidad y bajo límite elástico lo hacen inviable para la aplicación.

Nota. Clasificación de configuraciones basada en rigidez, masa y criterios de seguridad estructural.

6 Conclusiones

- Se logró determinar de manera satisfactoria los campos de distribución y deformación en las probetas fabricadas mediante manufactura aditiva con refuerzo de fibra de carbono y matriz de PLA, sometidas a distintas orientaciones de carga (0° , 45° y 90°) a través del ensayo Arcan y el uso de la técnica de correlación digital de imágenes bidimensional (DIC-2D). A su vez el procesamiento de las 75 probetas mediante el software NCORR v1.2 permitió obtener de forma consistente los campos de deformación en la componente (E_{YY}) en las figuras 31, 32 y 33. Además, de los desplazamientos verticales representados por la variable (V) en las figuras 34, 35 y 36, garantizando un análisis homogéneo y confiable de los datos experimentales.

Los resultados evidenciaron que las distribuciones de deformación y desplazamiento presentan patrones coherentes y repetibles entre las diferentes configuraciones ensayadas, lo cual valida la robustez del procedimiento experimental y la precisión del sistema DIC implementado en MATLAB. Asimismo, se observó que, aunque las orientaciones de carga influyen en la magnitud y localización de los campos obtenidos, el comportamiento global de las probetas mantiene una tendencia consistente, permitiendo caracterizar adecuadamente la respuesta mecánica del material bajo estados de esfuerzo mixto.

En este sentido, la integración del ensayo Arcan con la técnica DIC-2D se consolidó como una metodología efectiva para la evaluación detallada del comportamiento mecánico en materiales compuestos fabricados por impresión 3D, proporcionando información espacialmente distribuida que supera las limitaciones de métodos convencionales. Por tanto, se cumple el objetivo planteado, estableciendo una base sólida para la comprensión de los mecanismos de deformación y desplazamiento en este tipo de materiales, así como para su correlación con los resultados experimentales obtenidos.

- A partir del análisis precedente, el análisis de varianza (ANOVA) bifactorial aplicado permi-

tió identificar que los factores material (concentración de refuerzo) y ángulo de carga tienen efectos estadísticamente significativos ($p < 0.001$) sobre la rigidez y la carga axial en todos los niveles de carga evaluados (20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %). Los tamaños del efecto (η^2) superaron 0.87 en la mayoría de los casos, indicando una influencia muy fuerte. Esto implica que la respuesta mecánica de los especímenes no es aleatoria ni depende de variables externas no controladas, sino que puede ser predicha y optimizada manipulando directamente la orientación del refuerzo y su densidad. En términos prácticos, el diseño de piezas bajo este método de manufactura debe priorizar la alineación de las fibras con los ejes de carga principales para garantizar la integridad estructural bajo cargas críticas.

Se determinó que la interacción entre el ángulo de carga y la configuración de línea continua es significativa en todos los niveles de carga ($p < 0.001$), con un tamaño del efecto que aumenta desde $\eta^2 = 0,428$ (20 % de carga) hasta $\eta^2 = 0,925$ (100 % de carga). Esto demuestra que las diferencias entre las fracciones volumétricas y los patrones de relleno se amplifican a medida que la probeta se acerca a la falla, siendo el comportamiento en la rotura el que mejor discrimina entre la eficiencia de los materiales compuestos frente a los polímeros base. Además que los tamaños del efecto ($\eta^2 > 0,87$) indican que la magnitud de la carga depende de la capacidad de las fibras para absorber esfuerzos; esto se debe a que el patrón de relleno en línea continua permite que el refuerzo de carbono actúe como un elemento estructural ininterrumpido, optimizando la transferencia de tensiones a lo largo de toda la longitud de la probeta.

Esto nos da como base una combinación crítica que maximiza el esfuerzo último (carga axial) resultó ser PLA 100 % con orientación de carga 0° , alcanzando 4468.92 N y un esfuerzo último de 37.41 MPa (Tabla 9). Sin embargo, considerando el balance entre rigidez, peso y seguridad para aplicaciones estructurales como el chasis de dron, la mejor combinación identificada mediante el ranking multicriterio (Tabla 12) es FC-PLA 30 % de fracción volumétrica con orientación de carga 0° , ya que presentó el menor desplazamiento en simulación (30.87 mm), la mejor relación desplazamiento/masa (1286 mm/kg) y un límite

elástico en dirección del eje X de 30.5 MPa.

El ANOVA también reveló que el PLA puro presenta un patrón único de resistencia ($0^\circ > 90^\circ > 45^\circ$), mientras que todos los FC-PLA siguen el orden $0^\circ > 45^\circ > 90^\circ$, confirmando que la fibra de carbono incrementa la anisotropía y que la adhesión interlaminar es crítica en orientaciones desfavorables.

- Las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (Tabla 9) fueron implementadas como material ortotrópico en simulaciones por elementos finitos (SolidWorks) de un chasis de dron sometido a condiciones de carga representativas (Figuras 35 a 39). Las simulaciones reprodujeron las tendencias observadas experimentalmente, validando que los datos del ensayo Arcan son adecuados para predecir el comportamiento estructural en componentes reales con estados de esfuerzo combinados.

La comparativa entre configuraciones en el modelo del chasis mostró que el FC-PLA 30 % presenta el menor desplazamiento máximo (30.87 mm) y una tensión de Von Mises máxima de 18.7 MPa, que se encuentra por debajo de su límite elástico (30.5 MPa en X y 6.76 MPa en YZ), garantizando un margen de seguridad adecuado. En contraste, la configuración FC-PLA 100 % fue descartada porque la tensión de Von Mises (16.99 MPa) supera su límite elástico transversal (8.2 MPa), evidenciando fragilidad.

El PLA 100 %, aunque presentó la mayor capacidad de carga en los ensayos Arcan, mostró en la simulación del chasis un desplazamiento máximo de 50.91 mm (65 % mayor que el FC-PLA 30 %), lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones donde se requiere alta rigidez estructural.

Se valida, por tanto, que la metodología combinada (ensayo Arcan + DIC-2D + simulación) permite predecir de manera confiable el desempeño de piezas fabricadas con manufactura aditiva bajo condiciones de servicio reales, cumpliendo con un modelo funcional de un chasis de dron.

6.1 Conclusiones Y Recomendaciones

Los resultados obtenidos permiten concluir que el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva con refuerzo de fibra de carbono está fuertemente influenciado por la fracción volumétrica de refuerzo y la orientación de impresión. Se evidencia un comportamiento anisotrópico, donde las configuraciones alineadas con la dirección de carga presentan mayores valores de rigidez y resistencia, mientras que orientaciones intermedias generan respuestas mecánicas combinadas bajo estados de esfuerzo mixto.

El análisis experimental, complementado con técnicas de correlación digital de imágenes y análisis estadístico, permitió identificar relaciones claras entre variables de fabricación y desempeño estructural, validando la hipótesis planteada y estableciendo criterios técnicos para la optimización del diseño en manufactura aditiva.

6.1.1 Conclusiones sobre la rigidez

1. El factor material es el principal determinante de la rigidez en todos los ángulos de carga evaluados, con tamaños de efecto que superan consistentemente 0.87. La jerarquía observada es: 100 %-FC > 100 %-PLA > 44 %-FC \approx 22 %-FC > 30 %-FC. Esto confirma que la inclusión de fibra de carbono aumenta significativamente la rigidez del material, especialmente cuando el porcentaje de relleno es máximo (100 %).
2. La anisotropía es inherente a todos los materiales impresos, manifestándose desde las primeras etapas de carga. La rigidez es siempre mayor cuando la carga se aplica paralelamente a la dirección de impresión (0°), y disminuye drásticamente en las orientaciones de 45° y 90° . Este comportamiento es más pronunciado en los materiales con fibra de carbono que en el PLA puro, donde la anisotropía es comparativamente menor.
3. La evolución de la rigidez a lo largo del ensayo depende del material y del ángulo de carga.

Los materiales con alto contenido de fibra (100 %-FC) mantienen e incluso incrementan su rigidez hasta etapas avanzadas del ensayo, mientras que las configuraciones con bajo relleno (22 %, 30 %, 44 %) muestran una degradación progresiva y más temprana. La interacción significativa en todos los niveles de carga confirma que las diferencias entre configuraciones se amplifican a medida que la probeta se acerca a la falla.

4. El comportamiento en la zona cercana a la falla (80 %-100 %) es el que mejor discrimina entre configuraciones, siendo el 100 %-FC el material que mantiene la mayor rigidez residual, seguido por el 100 %-PLA. Las configuraciones de bajo relleno presentan una caída drástica de rigidez a 90°, evidenciando una falla prácticamente completa de la adhesión entre capas.

6.1.2 Conclusiones sobre la capacidad de carga axial

1. El material con mayor capacidad de carga en todos los ángulos es el 100 %-PLA, superando ampliamente al 100 %-FC y al resto de configuraciones. Este hallazgo contrasta con lo observado para la rigidez: aunque el FC-PLA es más rígido, el PLA puro alcanza cargas últimas muy superiores. Esto se explica por la ausencia de discontinuidades en el PLA, que permiten una redistribución más efectiva de las tensiones antes de la falla.
2. La anisotropía en la capacidad de carga es menos pronunciada en el PLA puro (η^2 Ángulo = 0.797) que en los materiales con fibra (η^2 Ángulo >0.97). Además, el PLA presenta un patrón único de resistencia: 0° >90° >45°, mientras que en los FC-PLA el orden es siempre 0° >45° >90°. Esto sugiere que, en ausencia de fibras, la matriz polimérica puede redistribuir mejor las tensiones en una configuración de carga puramente transversal (90°) que en una con componente de corte (45°).
3. La jerarquía de materiales se establece desde el inicio del ensayo y se mantiene hasta la falla: 100 %-PLA >100 %-FC >44 %-FC \approx 30 %-FC >22 %-FC. Las diferencias se amplifican progresivamente con la carga, siendo máximas en el momento de la rotura.

4. Las configuraciones de bajo relleno (22 %, 30 % y 44 % en FC-PLA) tienen un desempeño muy limitado, especialmente en orientaciones desfavorables. A 90°, su capacidad de carga en la falla es una fracción muy pequeña de la del 100 %-PLA, evidenciando que la adhesión entre capas es insuficiente cuando el relleno es bajo.

6.1.3 Conclusiones sobre los mecanismos de deformación y falla

A partir de la discusión fenomenológica, se confirman los siguientes mecanismos:

1. FC-PLA con bajo relleno (22 %): Predomina la concentración de tensiones en fibras aisladas. La matriz tiene poca participación, la falla es frágil y prematura, y la rigidez inicial es alta debido a la respuesta elástica de las fibras tensionadas puntualmente.
2. FC-PLA con relleno intermedio (30 %, 44 %): La matriz comienza a tener un papel activo en la redistribución de tensiones. Hay más fibras, pero también más matriz para transferir las cargas entre ellas. Esto permite alcanzar mayores cargas antes de la falla, con cierta deformación plástica.
3. FC-PLA con alto relleno (100 %): El material se comporta como un compuesto homogéneo y denso. La transferencia de esfuerzos es óptima y la rigidez es máxima. La falla es frágil y se produce por la rotura de las fibras o de la matriz cuando se alcanza la tensión última del conjunto.
4. PLA 100 %: El material se comporta como un polímero homogéneo y dúctil. La deformación plástica de la matriz permite una excelente redistribución de tensiones, lo que retrasa la falla y permite alcanzar cargas muy elevadas.

6.1.4 Conclusiones sobre la repetibilidad del proceso de impresión

1. El proceso de impresión 3D presenta una repetibilidad estadísticamente aceptable, ya que en la mayoría de los casos el estadístico F calculado fue inferior al valor crítico, tanto para datos originales como normalizados.
2. La exclusión de doce probetas atípicas, identificadas mediante el cumplimiento de al menos dos de los tres criterios establecidos (IQR, Z-score y distancia euclidiana), permitió depurar la base de datos sin comprometer la representatividad de las configuraciones. Tras la depuración, se confirmó la homogeneidad de los nuevos conjuntos de datos.

6.1.5 Conclusiones sobre la metodología de análisis

1. La estrategia de análisis factorial por subconjuntos controlados demostró ser adecuada para identificar la existencia de diferencias significativas, determinar desde qué tramos de carga comienzan a manifestarse dichas diferencias y evaluar cómo varía la respuesta mecánica a lo largo del ensayo.
2. El uso del tamaño del efecto (η^2) complementó eficazmente la información del valor p, permitiendo cuantificar la magnitud de las diferencias y no solo su significancia estadística.
3. La extracción de datos por niveles de carga relativa (20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %) y el muestreo de cinco registros por nivel permitieron construir una matriz de datos balanceada que captura la evolución del comportamiento mecánico a lo largo de todo el ensayo, reduciendo la influencia de valores atípicos puntuales.

6.1.6 Recomendaciones

Para futuras investigaciones:

1. Ampliar el diseño experimental: Incluir todos los porcentajes de relleno para ambos materiales (PLA y FC-PLA) para permitir un análisis factorial completo de tres vías. Aumentar el tamaño muestral a 8-10 probetas por configuración para análisis de repetibilidad más robustos.
2. Explorar otros patrones de relleno: Investigar el efecto de diferentes patrones de relleno (grid, triangular, honeycomb, giroideo) sobre las propiedades mecánicas, manteniendo constantes los porcentajes de relleno.
3. Caracterización microestructural: Incorporar técnicas de microscopía (SEM, TEM) y análisis de imagen para correlacionar el comportamiento mecánico con la microestructura real (distribución de fibras, porosidad, adhesión entre capas) y validar las hipótesis fenomenológicas propuestas.
4. Ampliar el rango de ensayos mecánicos: Realizar ensayos de compresión, flexión, impacto y fatiga para obtener una caracterización mecánica más completa, especialmente relevante para aplicaciones de ingeniería donde las piezas están sometidas a cargas variables en el tiempo.
5. Control ambiental: Realizar los ensayos en condiciones ambientales controladas (temperatura y humedad) y evaluar el efecto del envejecimiento y la absorción de humedad en las propiedades mecánicas.

Para aplicaciones prácticas:

1. Selección de material según la aplicación: Si el requisito principal es la rigidez (deformaciones mínimas), el FC-PLA con 100 % de relleno es la mejor opción. Si el requisito principal es la capacidad de carga última (resistencia a la rotura), el PLA con 100 % de relleno es superior.

2. Consideración de la orientación de impresión: Dado que la anisotropía es significativa en todos los materiales, las piezas deben diseñarse de manera que la dirección principal de carga coincida con la dirección de impresión (0°) siempre que sea posible. En aplicaciones donde la carga tenga múltiples direcciones, el PLA puro ofrece un comportamiento más isotrópico y predecible.
3. Evitar porcentajes de relleno intermedios en FC-PLA: Las configuraciones de 30 % y 44 % de relleno en FC-PLA no ofrecen ventajas significativas frente al 22 % en términos de rigidez, y su capacidad de carga es solo moderadamente superior. Para aplicaciones con FC-PLA, se recomienda optar por el 100 % de relleno si se busca maximizar el desempeño mecánico.
4. Validación de la repetibilidad: La repetibilidad aceptable del proceso de impresión 3D, validada estadísticamente, respalda la confiabilidad de esta tecnología para la fabricación de piezas con requisitos mecánicos, siempre que se mantengan controlados los parámetros de impresión.

Desde una perspectiva aplicada, se recomienda considerar la orientación de impresión y la fracción volumétrica de refuerzo como variables críticas en el diseño de componentes estructurales fabricados mediante manufactura aditiva. En particular, configuraciones alineadas con la dirección de carga deben priorizarse en aplicaciones donde la rigidez y la resistencia sean determinantes.

Adicionalmente, se sugiere ampliar este estudio mediante la incorporación de otros tipos de patrones de relleno, variaciones en la orientación del infill y el uso de diferentes materiales compuestos, con el fin de establecer modelos predictivos más robustos del comportamiento mecánico.

Finalmente, la implementación de estos resultados en aplicaciones reales, como el diseño de chasis de drones u otras estructuras livianas, permitiría validar el desempeño estructural bajo condiciones de servicio, contribuyendo al desarrollo de soluciones más eficientes en la industria.

Referencias

- ASTDM. (2025). Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method. *ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS*. https://store.astm.org/d7078_d7078m-20e01.html
- Bandari, Y. R. (2025a). *Drone (fpv-quadcopter)*. <https://grabcad.com/library/drone-fpv-quadcopter-1>
- Bandari, Y. R. (2025b). *Drone (fpv-quadcopter)*. <https://grabcad.com/library/drone-fpv-quadcopter-1>
- Bandari, Y. R. (2025c). *Drone frame (small 20x20cm)*. <https://grabcad.com/library/drone-fpv-quadcopter-1>
- Benali, A., Cellard, C., Sohier, L., Moretti, A., & Créac'hcadec, R. (2023). Modelling edge effects at the interface in bonded joints using gradient functions in the mechanical properties of the adhesive: Application of the method to the Arcan test loaded in tension and shear. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 120, 103294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103294>
- Blaber, J., & Antoniou, A. (sf). *Ncorr*. <https://www.ncorr.com/index.php/contact>
- Christoph, R., Muñoz, R., & Hernández, Á. (2016). Manufactura aditiva. *Centrals American Journal*, 1-13.
- Cieza, D. A. V. (2020). *La técnica de correlación de imágenes digitales aplicada a ensayos de materiales* [Tesis doctoral]. Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Cognard, J.-Y., Davies, P., & Sohier, L. (2010). *Advances in testing adhesively bonded composites*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845698058.3.437>
- Cortázar, J. S. (2018). *MANUFACTURA ADITIVA APLICADA A LA INDUSTRIA DE AUTOPARTES* [Tesis doctoral]. Universidad de los Andes.

- Feito, N., Calvo, J. V., Belda, R., & Giner, E. (2020). *An Experimental and Numerical Investigation to Characterize an Aerospace Composite Material with Open-Hole Using Non-Destructive Techniques*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4148>
- García, P. P. (2023). *Diseño y construcción de un pequeño vehículo no tripulado mediante impresión 3D FDM* [Tesis doctoral]. Universidad de Valladolid.
- Han, D., & Lee, H. (2020). *Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X25007675>
- Hassan, G. M. (2021). Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 137, 106394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106394>
- Reverte, J. M., Caminero, M. A., Chacon, J. M., Garcia, E., Nuñez, P. J., & Becar, J. P. (2020). Mechanical and Geometric Performance of PLA-Based Polymer Composites Processed by the Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Technique. *MDPI*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13081924>
- Rodríguez, J. G. D., González, I. M. C., & Domínguez, A. E. P. (2020). Implementación de la Técnica de Correlación de Imágenes Digitales con Software Libre. *Revista de investigación - administración e ingenierías*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15649/2346030X.875>
- ROMERO, V. S. (2025). *CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y DETECCIÓN DE DEFECTOLOGÍA INTERNA SOBRE BIOCOMPOSITES FABRICADOS EN IMPRESIÓN 3D A TRAVÉS DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D*. [Tesis doctoral]. Universidad de Salamanca.
- Soutis, C. (2005). Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 205, 143-151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.004>
- Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas*. Instituto Nacional de educación Tecnológica. <https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>
- Swathi, M., Girish, D., Dinesh, M., Keshavamurthy, R., Duhduh, A. A., & Rajhi, A. A. (2026). Process optimization of SLA-fabricated BN-reinforced photopolymer composites using

- ANOVA for improved tensile strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 41, 1076-1088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.048>
- Technologies, B. (sf). *Representación gráfica de los diferentes perfiles de impresión*. <https://support.bcn3d.com/es/knowledge/infill>
- Wang, J., Chen, Y., Shan, Z., Song, W., Fan, C., Zheng, J.-h., & Lu, F. (2026). Vacuum 3D printing of continuous carbon fiber-reinforced PEEK composites: Mechanical performance and pore evolution mechanisms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 205, 109698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109698>
- Yang, Z., Wu, C., Wang, X., Hu, Z., Chen, W., Dong, W., Wang, S., & Li, X. (2026). *Screw extrusion-assisted additive manufacturing of high-strength 12K continuous carbon fiber-reinforced nylon composites*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X25007675?via%3Dihub>

Apéndices

Apéndice A

Configuraciones de impresión

Figura 29

Configuración de densidad de relleno

Calidad **Fuerza** Velocidad Soportes Otros Anotaciones

Perímetros

Bucles de perímetro 4

Perímetro adicional alternativo

Detección de perímetros delgados

Cubiertas Superiores/Inferiores

Patrón de relleno cubierta superior Línea Conti...

Capas de la cubierta superior 4 capas

Espesor mínimo de la cubierta superior 0,8 mm

Patrón de relleno de cubierta inferior Línea Conti...

Capas inferiores de cubierta 4 capas

Espesor de la cubierta inferior 0 mm

Relleno sólido superior/inferior/solapamiento de paredes 25 %

Relleno

Densidad de relleno de baja densidad 22 %

Figura 30

Configuración de dirección de relleno

Relleno

Densidad de relleno de baja densidad 22 %

Patrón de relleno de baja densidad Alineación ...

Longitud del anclaje de relleno de baja densidad 400% mm or %

Máxima longitud de relleno del anclaje 20 mm or %

Patrón de relleno sólido interno Alineación ...

Aplicar relleno de huecos Superficies s...

Filtrar pequeños huecos 0 mm

Superposición de relleno/perímetros 25 %

Avanzado

Dirección de relleno de baja densidad 90 °

Dirección del relleno sólido 90 °

Cambiar la dirección del relleno sólido

Ángulo del relleno en puente 0 °

Apéndice B

Ensayos mecánicos Eyy - V

Figura 31

Ensayo mecánico Eyy-0

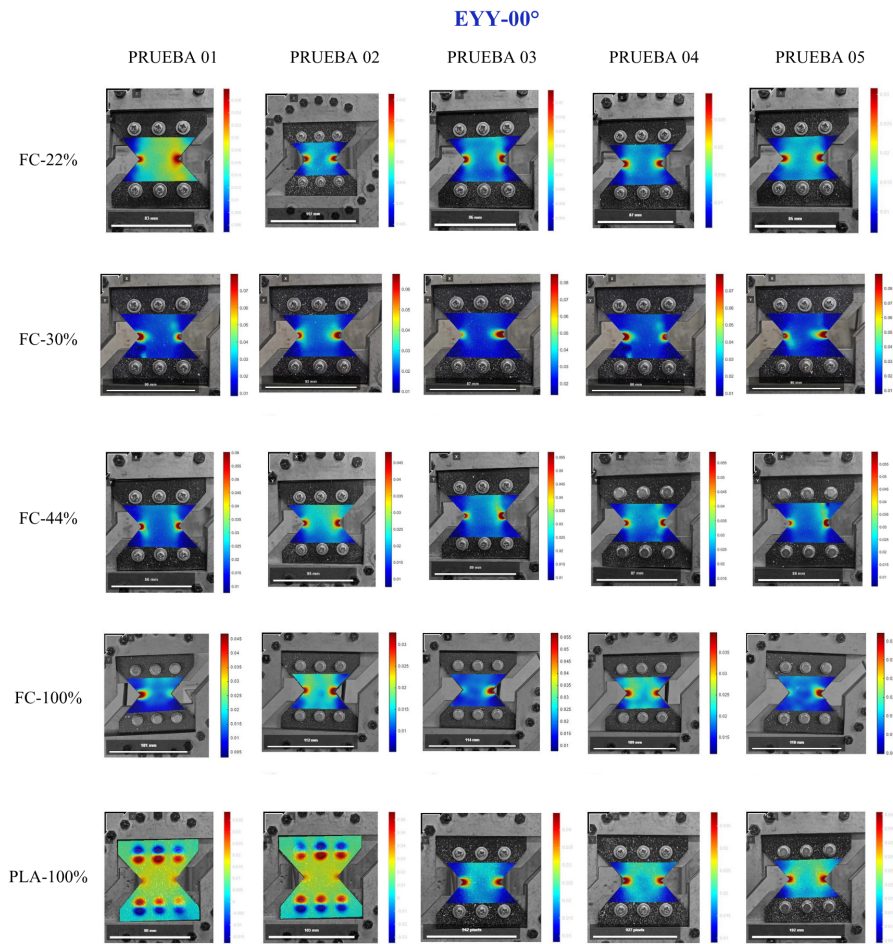


Figura 32

Ensayo mecánico Eyy-45°

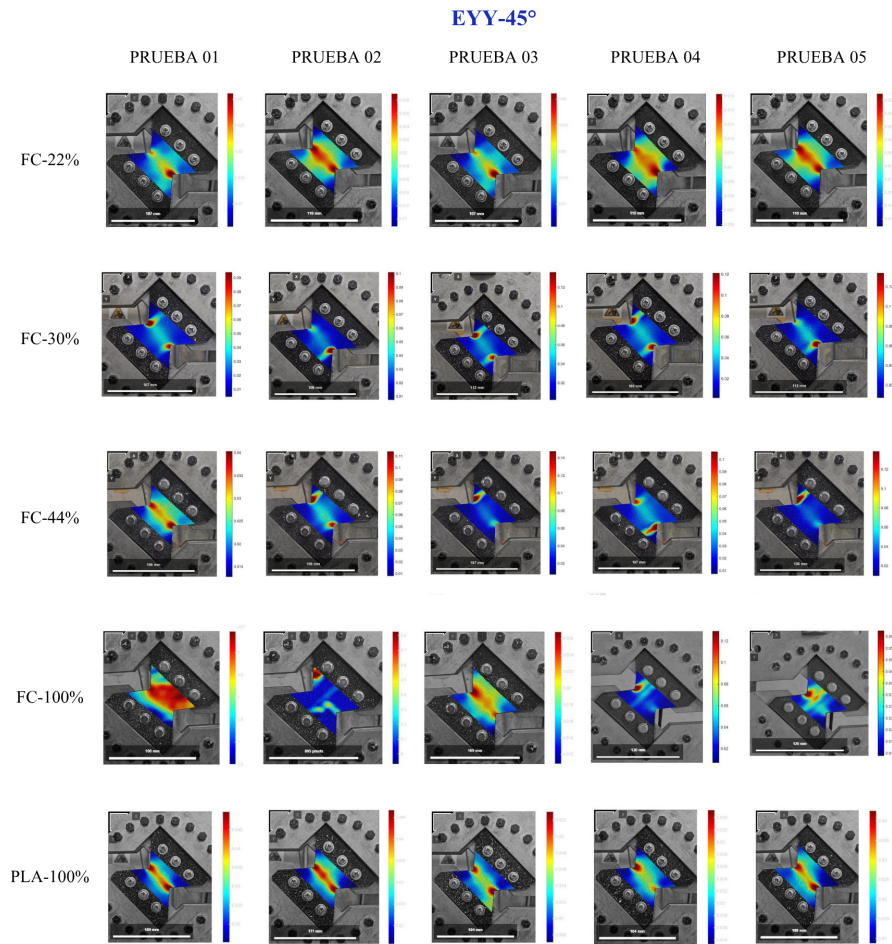


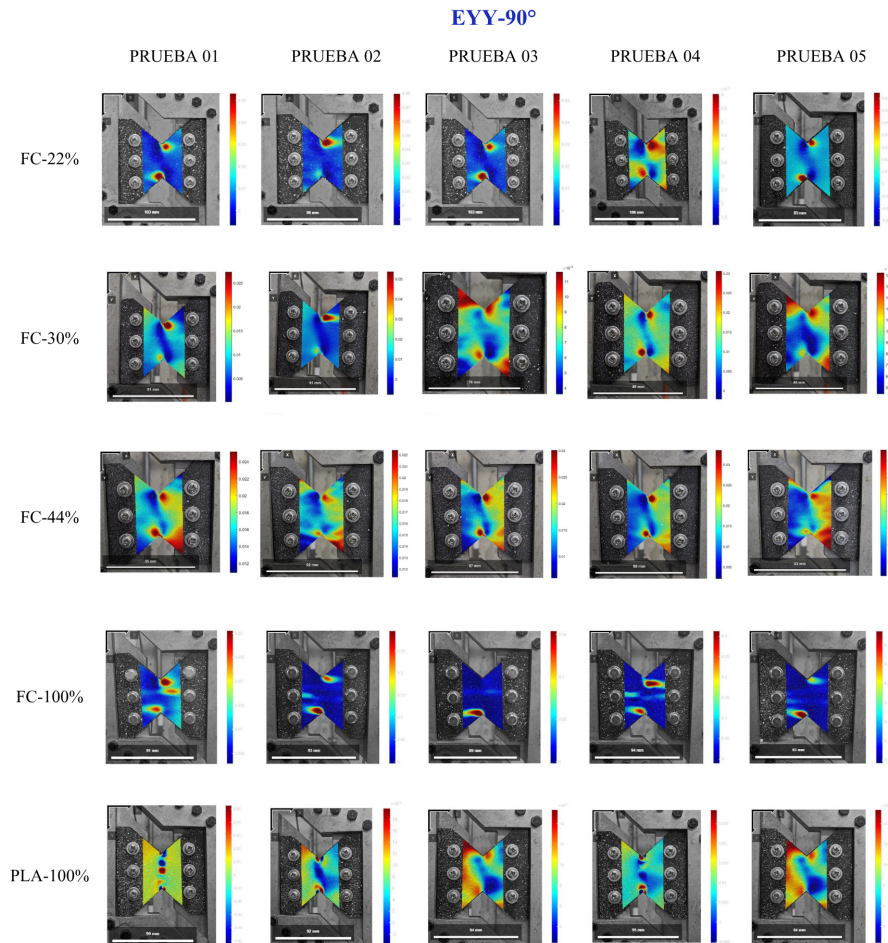
Figura 33*Ensayo mecánico E_{yy} -90°*

Figura 34

Ensayo mecánico V-0°

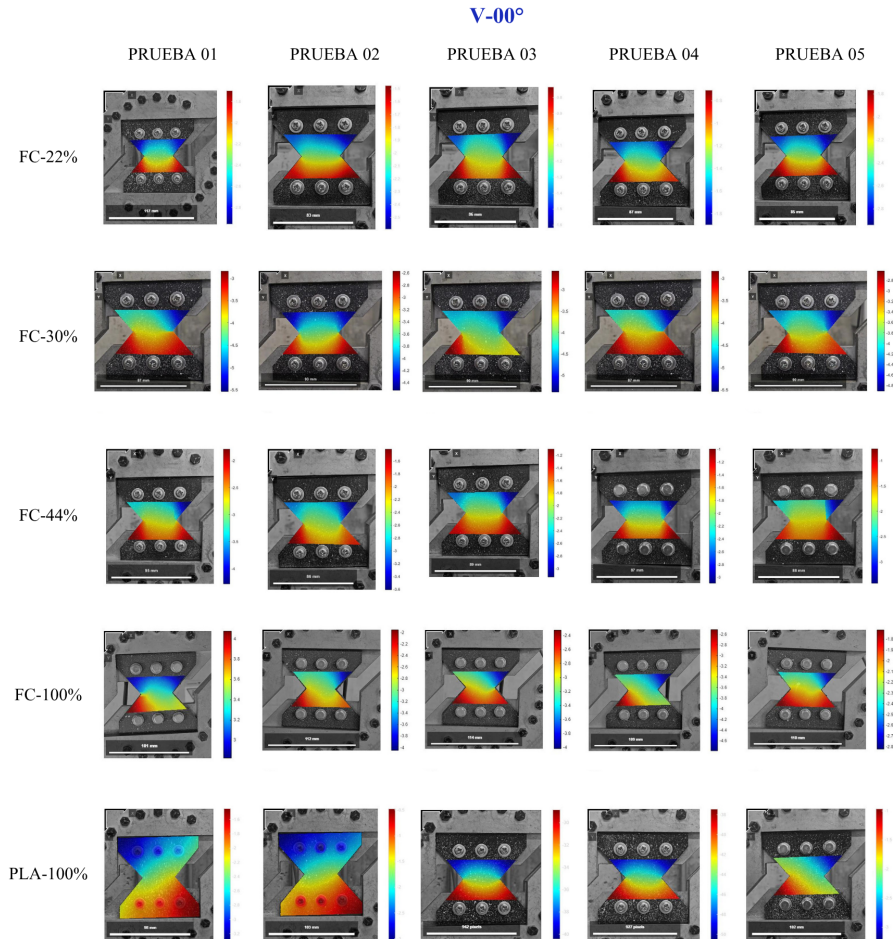


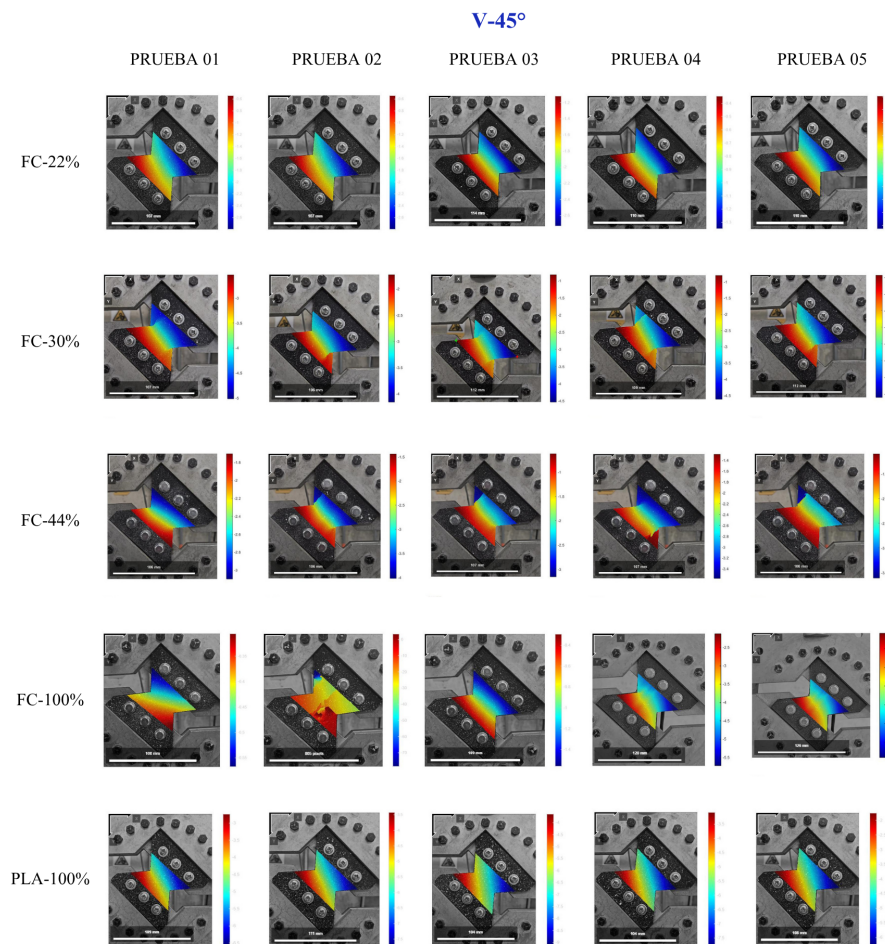
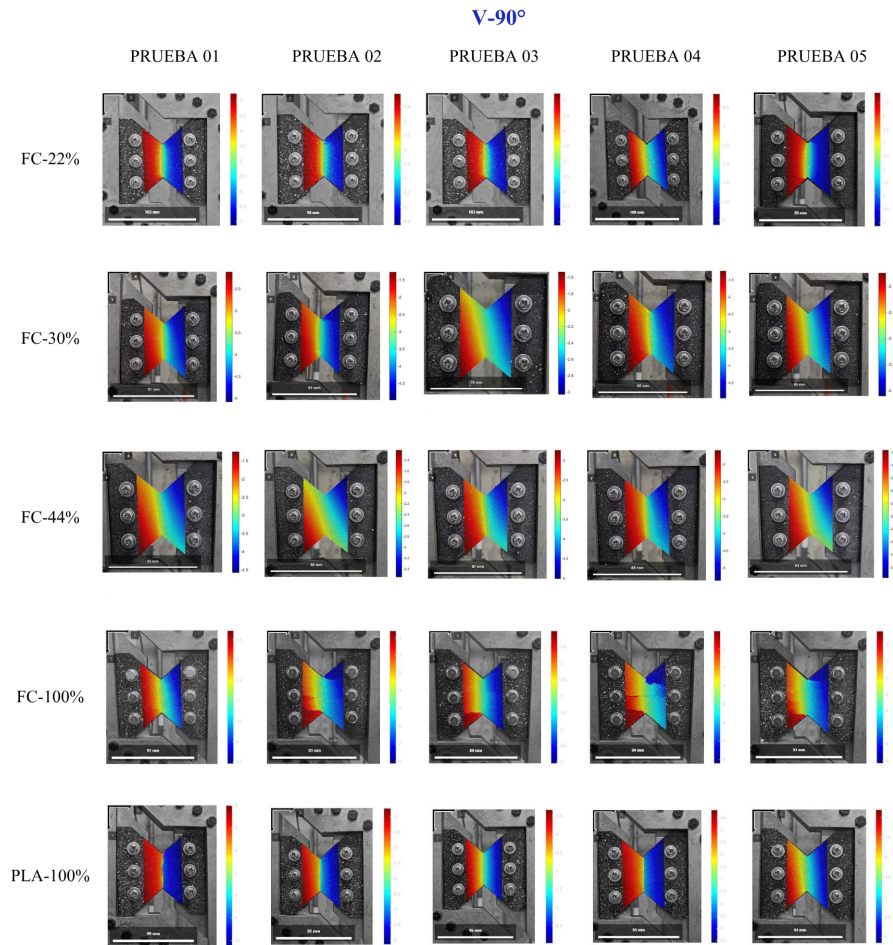
Figura 35*Ensayo mecánico V-45°*

Figura 36*Ensayo mecánico V-90°*

Apéndice C

Tablas de resultados análisis Anova

Figura 37

Tabla para interacción material–carga-0°

angulo de 0°					
carga	22%-FC	30%-FC	44%-FC	100%-FC	100%-PLA
20%	1296,032	741,156	597,224	1919,309	1234,055
20%	1120,138	1040,441	1045,202	1845,389	1277,063
20%			833,008	1667,055	1282,160
20%	1270,684	822,048		1935,906	1221,698
20%	1271,204	969,036	1083,143		
40%	1316,816	847,308	723,973	1902,952	1468,775
40%	1182,228	985,414	976,744	1878,115	1435,147
40%			817,550	1744,380	1396,864
40%	1257,006	847,441		1997,536	1410,247
40%	1243,809	959,186	1158,168		
60%	1264,376	923,174	794,778	1878,446	1518,704
60%	1175,148	1019,880	1029,022	1825,862	1504,642
60%			896,356	1823,663	1545,969
60%	1211,445	904,375		1871,249	1569,156
60%	1198,572	1023,535	1230,984		
80%	1194,918	939,131	835,644	2080,624	1597,551
80%	1134,613	993,994	1038,066	2038,745	1613,095
80%			940,627	2057,235	1645,562
80%	1192,935	925,102		2028,161	1677,295
80%	1151,734	1035,467	1189,714		
100%	1010,478	860,344	774,771	2205,441	1640,198
100%	1015,034	906,400	943,774	2100,021	1656,461
100%			893,465	2191,015	1696,768
100%	1104,508	820,851		2107,600	1730,928
100%	979,048	896,229	1093,171		

Figura 38*Tabla para interacción material–carga-45°*

angulo de 45°					
carga	22%-FC	30%-FC	44%-FC	100%-FC	100%-PLA
20%	761,309		706,455	1019,290	651,637
20%	646,800	482,771	932,888	987,564	548,563
20%	799,156965	436,962	848,794	1237,846	675,930
20%		611,799	713,284	1092,017	561,717
20%	668,594	425,128	583,989		596,761
40%	643,721		778,886	1415,215	796,938
40%	626,542	560,594	965,747	1368,695	683,706
40%	755,337	506,352	987,299	1616,739	833,850
40%		537,038	823,040	1473,235	762,627
40%	680,389	506,564	719,342		728,565
60%	579,464		791,465	1526,142	884,763
60%	589,714	546,806	851,751	1494,301	764,192
60%	693,941	520,658	981,882	1699,706	871,966
60%		526,166	876,546	1600,390	850,459
60%	638,471	512,667	791,149		788,563
80%	544,129		795,822	1486,936	901,907
80%	543,552	521,233	747,354	1465,756	789,504
80%	622,928	517,650	884,912	1473,502	813,238
80%		528,596	869,685	1493,206	852,264
80%	609,491	501,123	809,133		805,075
100%	471,277		604,412	1237,995	800,207
100%	505,924	480,299	583,198	1253,684	709,793
100%	556,551	463,684	702,253	1263,400	723,958
100%		457,202	721,509	1158,910	773,537
100%	550,829	406,660	716,522		739,861

Figura 39*Tabla para interacción material–carga-90°*

angulo de 90°					
carga	22%-FC	30%-FC	44%-FC	100%-FC	100%-PLA
20%	476,737		444,454	1045,474	624,878
20%		640,118		1248,761	701,925
20%	620,236	565,411	500,208	1162,516	677,286
20%	1093,327	592,927	602,478		640,991
20%	1131,926	531,188	643,526	1086,959	740,353
40%	546,124		480,541	1267,363	758,708
40%		583,257		1179,406	827,761
40%	515,516	599,710	560,871	1137,426	804,649
40%	916,106	534,371	556,782		778,981
40%	623,611	483,566	599,552	1173,108	867,739
60%	510,909		491,423	1005,704	824,143
60%		508,475		966,762	891,383
60%	459,372	504,154	530,203	1051,395	866,038
60%	618,001	507,563	538,390		837,652
60%	570,710	482,415	560,925	1024,335	932,766
80%	500,636		457,353	889,956	838,619
80%		500,870		896,248	914,577
80%	444,270	454,914	493,678	856,493	890,433
80%	563,932	506,029	513,633		848,425
80%	529,834	464,660	511,167	922,911	937,704
100%	381,421		266,099	836,320	813,968
100%		394,127		866,363	889,609
100%	334,981	335,702	309,450	799,387	856,172
100%	461,065	337,639	297,385		839,875
100%	296,812	302,328	220,559	786,095	900,579

Figura 40*Tabla para interacción ángulo-carga-22%-FC*

22%-FC			
carga	0°	45°	90°
20%	1296,032	761,309	476,737
20%	1120,138	646,800	
20%		799,157	620,236
20%	1270,684		1093,327
20%	1271,204	668,594	1131,926
40%	1316,816	643,721	546,124
40%	1182,228	626,542	
40%		755,337	515,516
40%	1257,006		916,106
40%	1243,809	680,389	623,611
60%	1264,376	579,464	510,909
60%	1175,148	589,714	
60%		693,941	459,372
60%	1211,445		618,001
60%	1198,572	638,471	570,710
80%	1194,918	544,129	500,636
80%	1134,613	543,552	
80%		622,928	444,270
80%	1192,935		563,932
80%	1151,734	609,491	529,834
100%	1010,478	471,277	381,421
100%	1015,034	505,924	
100%		556,551	334,981
100%	1104,508		461,065
100%	979,048	550,829	296,812

Figura 41*Tabla para interacción ángulo–carga-30%-FC*

30%-FC			
carga	0°	45°	90°
20%	741,156		
20%	1040,441	482,771	640,118
20%		436,962	565,411
20%	822,048	611,799	592,927
20%	969,036	425,128	531,188
40%	847,308		
40%	985,414	560,594	583,257
40%		506,352	599,710
40%	847,441	537,038	534,371
40%	959,186	506,564	483,566
60%	923,174		
60%	1019,880	546,806	508,475
60%		520,658	504,154
60%	904,375	526,166	507,563
60%	1023,535	512,667	482,415
80%	939,131		
80%	993,994	521,233	500,870
80%		517,650	454,914
80%	925,102	528,596	506,029
80%	1035,467	501,123	464,660
100%	860,344		
100%	906,400	480,299	394,127
100%		463,684	335,702
100%	820,851	457,202	337,639
100%	896,229	406,660	302,328

Figura 42*Tabla para interacción ángulo–carga-44 %-FC*

44%-FC			
carga	0°	45°	90°
20%	597,224	706,455	444,454
20%	1045,202	932,888	
20%	833,008	848,794	500,208
20%		713,284	602,478
20%	1083,143	583,989	643,526
40%	723,973	778,886	480,541
40%	976,744	965,747	
40%	817,550	987,299	560,871
40%		823,040	556,782
40%	1158,168	719,342	599,552
60%	794,778	791,465	491,423
60%	1029,022	851,751	
60%	896,356	981,882	530,203
60%		876,546	538,390
60%	1230,984	791,149	560,925
80%	835,644	795,822	457,353
80%	1038,066	747,354	
80%	940,627	884,912	493,678
80%		869,685	513,633
80%	1189,714	809,133	511,167
100%	774,771	604,412	266,099
100%	943,774	583,198	
100%	893,465	702,253	309,450
100%		721,509	297,385
100%	1093,171	716,522	220,559

Figura 43*Tabla para interacción ángulo-carga-100%-FC*

100%-FC			
carga	0°	45°	90°
20%	1919,309	1019,290	1045,474
20%	1845,389	987,564	1248,761
20%	1667,055	1237,846	1162,516
20%	1935,906	1092,017	
20%			1086,959
40%	1902,952	1415,215	1267,363
40%	1878,115	1368,695	1179,406
40%	1744,380	1616,739	1137,426
40%	1997,536	1473,235	
40%			1173,108
60%	1878,446	1526,142	1005,704
60%	1825,862	1494,301	966,762
60%	1823,663	1699,706	1051,395
60%	1871,249	1600,390	
60%			1024,335
80%	2080,624	1486,936	889,956
80%	2038,745	1465,756	896,248
80%	2057,235	1473,502	856,493
80%	2028,161	1493,206	
80%			922,911
100%	2205,441	1237,995	836,320
100%	2100,021	1253,684	866,363
100%	2191,015	1263,400	799,387
100%	2107,600	1158,910	
100%			786,095

Figura 44*Tabla para interacción ángulo-carga-100%-PLA*

100%-PLA			
carga	0°	45°	90°
20%	1234,055	651,637	624,878
20%	1277,063	548,563	701,925
20%	1282,160	675,930	677,286
20%	1221,698	561,717	640,991
20%		596,761	740,353
40%	1468,775	796,938	758,708
40%	1435,147	683,706	827,761
40%	1396,864	833,850	804,649
40%	1410,247	762,627	778,981
40%		728,565	867,739
60%	1518,704	884,763	824,143
60%	1504,642	764,192	891,383
60%	1545,969	871,966	866,038
60%	1569,156	850,459	837,652
60%		788,563	932,766
80%	1597,551	901,907	838,619
80%	1613,095	789,504	914,577
80%	1645,562	813,238	890,433
80%	1677,295	852,264	848,425
80%		805,075	937,704
100%	1640,198	800,207	813,968
100%	1656,461	709,793	889,609
100%	1696,768	723,958	856,172
100%	1730,928	773,537	839,875
100%		739,861	900,579

Figura 45*Tabla para interacción ángulo–configuración-20 %-nivel de carga*

nivel de carga 20%			
material-relleno	0°	45°	90°
22%-FC	1296,032	761,309	476,737
22%-FC	1120,138	646,800	
22%-FC		799,157	620,236
22%-FC	1270,684		1093,327
22%-FC	1271,204	668,594	1131,926
30%-FC	741,156		
30%-FC	1040,441	482,771	640,118
30%-FC		436,962	565,411
30%-FC	822,048	611,799	592,927
30%-FC	969,036	425,128	531,188
44%-FC	597,224	706,455	444,454
44%-FC	1045,202	932,888	
44%-FC	833,008	848,794	500,208
44%-FC		713,284	602,478
44%-FC	1083,143	583,989	643,526
100%-FC	1919,309	1019,290	1045,474
100%-FC	1845,389	987,564	1248,761
100%-FC	1667,055	1237,846	1162,516
100%-FC	1935,906	1092,017	
100%-FC			1086,959
100%-PLA	1234,055	651,637	624,878
100%-PLA	1277,063	548,563	701,925
100%-PLA	1282,160	675,930	677,286
100%-PLA	1221,698	561,717	640,991
100%-PLA		596,761	740,353

Figura 46*Tabla para interacción ángulo–configuración-40 %-nivel de carga*

nivel de carga 40%			
material-relleno	0°	45°	90°
22%-FC	1316,816	643,721	546,124
22%-FC	1182,228	626,542	
22%-FC		755,337	515,516
22%-FC	1257,006		916,106
22%-FC	1243,809	680,389	623,611
30%-FC	847,308		
30%-FC	985,414	560,594	583,257
30%-FC		506,352	599,710
30%-FC	847,441	537,038	534,371
30%-FC	959,186	506,564	483,566
44%-FC	723,973	778,886	480,541
44%-FC	976,744	965,747	
44%-FC	817,550	987,299	560,871
44%-FC		823,040	556,782
44%-FC	1158,168	719,342	599,552
100%-FC	1902,952	1415,215	1267,363
100%-FC	1878,115	1368,695	1179,406
100%-FC	1744,380	1616,739	1137,426
100%-FC	1997,536	1473,235	
100%-FC			1173,108
100%-PLA	1468,775	796,938	758,708
100%-PLA	1435,147	683,706	827,761
100%-PLA	1396,864	833,850	804,649
100%-PLA	1410,247	762,627	778,981
100%-PLA		728,565	867,739

Figura 47*Tabla para interacción ángulo–configuración-60 %-nivel de carga*

nivel de carga 60%			
material-relleno	0°	45°	90°
22%-FC	1264,376	579,464	510,909
22%-FC	1175,148	589,714	
22%-FC		693,941	459,372
22%-FC	1211,445		618,001
22%-FC	1198,572	638,471	570,710
30%-FC	923,174		
30%-FC	1019,880	546,806	508,475
30%-FC		520,658	504,154
30%-FC	904,375	526,166	507,563
30%-FC	1023,535	512,667	482,415
44%-FC	794,778	791,465	491,423
44%-FC	1029,022	851,751	
44%-FC	896,356	981,882	530,203
44%-FC		876,546	538,390
44%-FC	1230,984	791,149	560,925
100%-FC	1878,446	1526,142	1005,704
100%-FC	1825,862	1494,301	966,762
100%-FC	1823,663	1699,706	1051,395
100%-FC	1871,249	1600,390	
100%-FC			1024,335
100%-PLA	1518,704	884,763	824,143
100%-PLA	1504,642	764,192	891,383
100%-PLA	1545,969	871,966	866,038
100%-PLA	1569,156	850,459	837,652
100%-PLA		788,563	932,766

Figura 48*Tabla para interacción ángulo–configuración-80 %-nivel de carga*

nivel de carga 80%			
material-relleno	0°	45°	90°
22%-FC	1194,918	544,129	500,636
22%-FC	1134,613	543,552	
22%-FC		622,928	444,270
22%-FC	1192,935		563,932
22%-FC	1151,734	609,491	529,834
30%-FC	939,131		
30%-FC	993,994	521,233	500,870
30%-FC		517,650	454,914
30%-FC	925,102	528,596	506,029
30%-FC	1035,467	501,123	464,660
44%-FC	835,644	795,822	457,353
44%-FC	1038,066	747,354	
44%-FC	940,627	884,912	493,678
44%-FC		869,685	513,633
44%-FC	1189,714	809,133	511,167
100%-FC	2080,624	1486,936	889,956
100%-FC	2038,745	1465,756	896,248
100%-FC	2057,235	1473,502	856,493
100%-FC	2028,161	1493,206	
100%-FC			922,911
100%-PLA	1597,551	901,907	838,619
100%-PLA	1613,095	789,504	914,577
100%-PLA	1645,562	813,238	890,433
100%-PLA	1677,295	852,264	848,425
100%-PLA		805,075	937,704

Figura 49*Tabla para interacción ángulo–configuración-100 %-nivel de carga*

nivel de carga 100%			
material-relleno	0°	45°	90°
22%-FC	1010,478	471,277	381,421
22%-FC	1015,034	505,924	
22%-FC		556,551	334,981
22%-FC	1104,508		461,065
22%-FC	979,048	550,829	296,812
30%-FC	860,344		
30%-FC	906,400	480,299	394,127
30%-FC		463,684	335,702
30%-FC	820,851	457,202	337,639
30%-FC	896,229	406,660	302,328
44%-FC	774,771	604,412	266,099
44%-FC	943,774	583,198	
44%-FC	893,465	702,253	309,450
44%-FC		721,509	297,385
44%-FC	1093,171	716,522	220,559
100%-FC	2205,441	1237,995	836,320
100%-FC	2100,021	1253,684	866,363
100%-FC	2191,015	1263,400	799,387
100%-FC	2107,600	1158,910	
100%-FC			786,095
100%-PLA	1640,198	800,207	813,968
100%-PLA	1656,461	709,793	889,609
100%-PLA	1696,768	723,958	856,172
100%-PLA	1730,928	773,537	839,875
100%-PLA		739,861	900,579

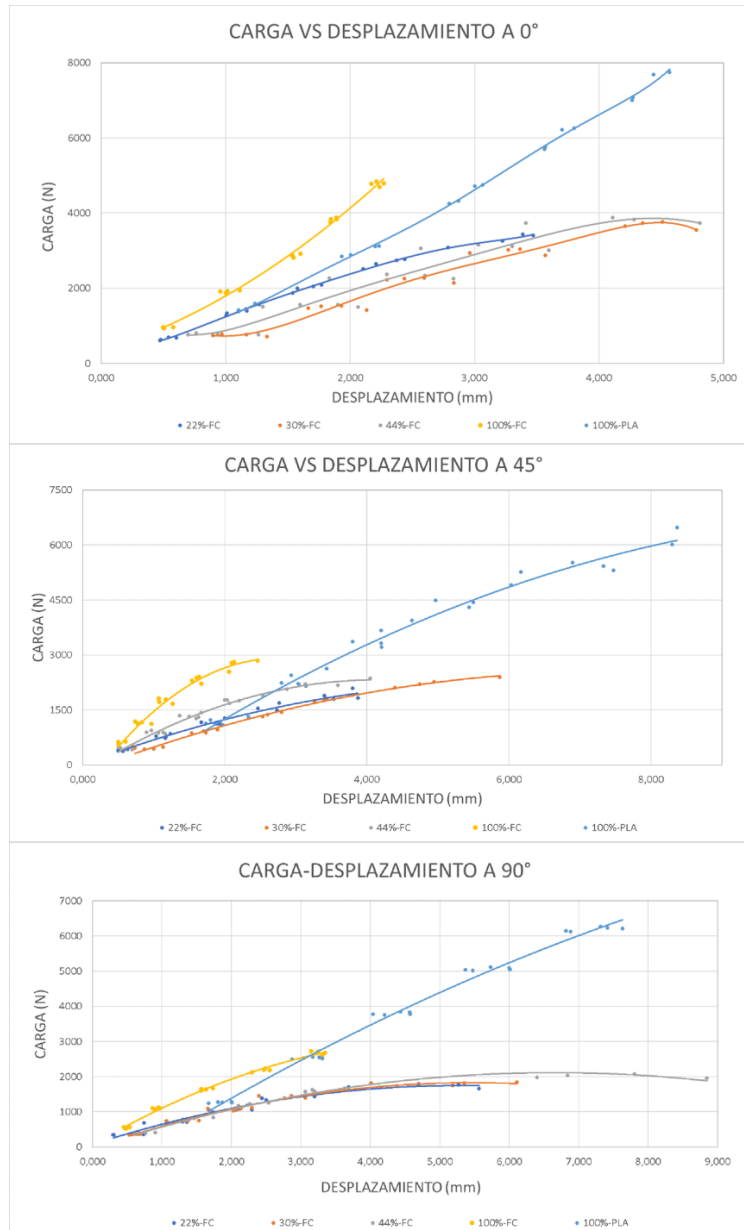
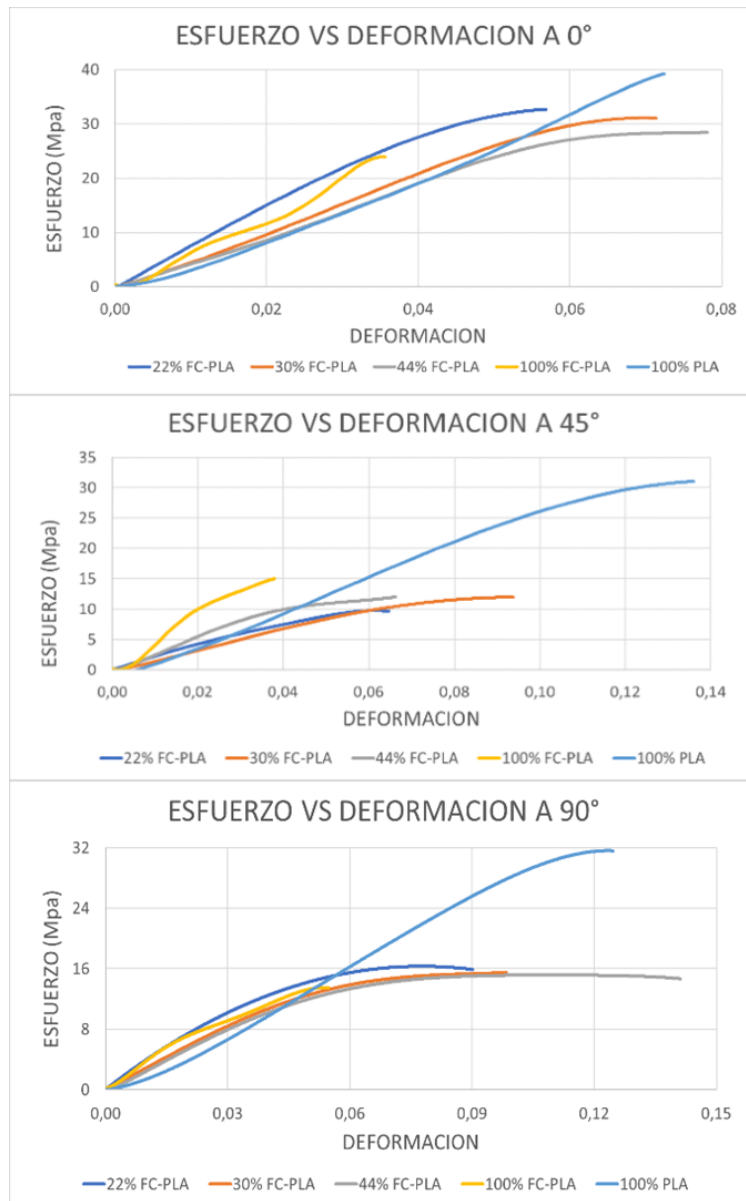
Apéndice D*Curvas de resultados análisis Anova***Figura 50***Curva de carga vs desplazamiento 0° - 45° - 90°*

Figura 51*Curvas Esfuerzo vs. Deformación 0° - 45° - 90°*

Apéndice E

Resultados del análisis estructural del chasis del dron en SolidWorks

Figura 52

FC-PLA-22 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria

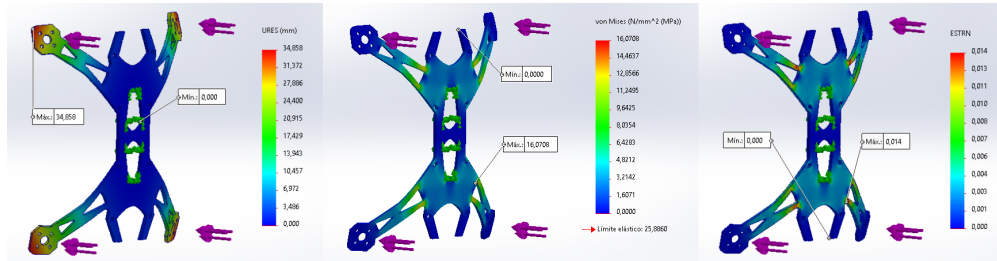


Figura 53

FC-PLA-30 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria

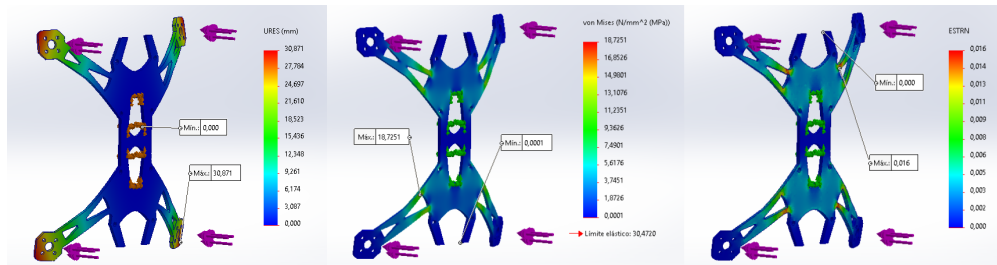


Figura 54

FC-PLA-44 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria

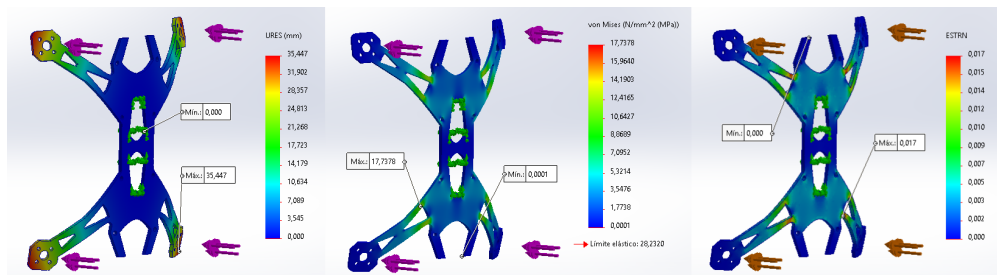


Figura 55

FC-PLA-100 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria

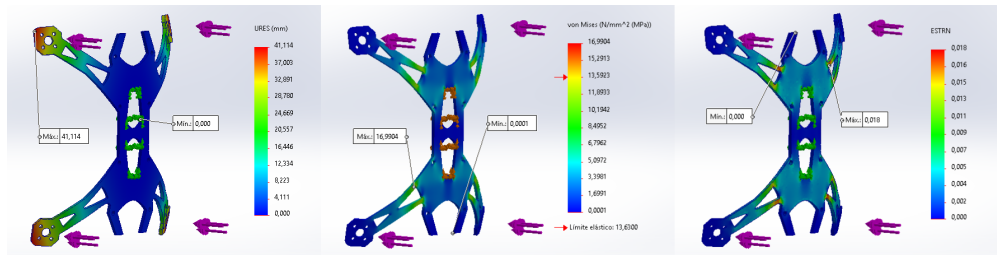


Figura 56

PLA-100 % - desplazamiento - Von Mises - deformación unitaria

