

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE POLÍMEROS COMPUESTOS

Estudio numérico de la resistencia al impacto de compuestos de polímeros pa6 reforzados
individualmente con fibras continuas a temperatura ambiente.

Juan Diego Barajas Rangel, Luis Felipe Aranibar González

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Manuel del Jesús Martínez

PhD en Mecánica Computacional

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres, Henry y Gloria, y a mi hermano Daniel, quienes siempre han estado a mi lado, brindándome su apoyo y confianza. Gracias por motivarme a seguir adelante y por mostrarme lo que realmente importa.

A Claudeth, mi novia, por estar conmigo en cada etapa de este proceso. Tu apoyo constante ha sido fundamental para lograr este objetivo.

Mis amigos y familiares, quienes siempre han estado presentes, aportando su aliento y apoyo. Gracias por su confianza y por ser parte de este camino.

Juan Diego Barajas Rangel

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía constante, por darme la fuerza en los momentos difíciles y por acompañarme silenciosamente en cada paso de este camino.

A mis padres, por su amor incondicional y su ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

A mi mamá, en especial, Eres mi mayor inspiración, mi apoyo constante y la razón por la que nunca me permití rendirme. Este logro también es tuyo, porque sin ti, no habría sido posible.

A mis tíos, por ser más que familia: por ser pilares en mi formación, por sus palabras sabias, por su cariño sincero y por estar presentes en cada momento importante, incluso en silencio, con una mirada oportuna. Su apoyo ha sido una fuente de fuerza que siempre guardaré en el corazón.

Gracias a todos por ser mi base, mi refugio y mi motor. Esta tesis es también un reflejo del amor y el compromiso que he recibido de ustedes.

Luis Felipe Aranibar González

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad de formarnos como Ingenieros Mecánicos, proporcionándonos los conocimientos y las herramientas necesarias para enfrentar los retos profesionales y académicos que se presentan en el mundo de la ingeniería.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ser el pilar fundamental en nuestra formación, donde cada etapa del proceso educativo ha contribuido al desarrollo integral de nuestras competencias técnicas y humanas.

Deseamos agradecer profundamente a nuestro director, Manuel del Jesús Martínez, PhD en Mecánica Computacional, por su invaluable apoyo, orientación y paciencia. Su experiencia y sabiduría fueron esenciales para la culminación exitosa de este proyecto. Su guía nos permitió enfrentar los desafíos de este trabajo con confianza y determinación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Planteamiento del Problema	18
2. Justificación del Problema	19
3. Objetivos	21
3.1 Objetivo General	21
3.2 Objetivo Específicos	21
4. Metodología	22
5. Configuración del material compuesto.	23
5.1. Configuración de la Matriz	26
5.1.1. Selección Material de la Matriz	26
5.1.1.1 Factores de influencia y su ponderación para la selección de material.	27
5.1.1.1.1 Resistencia al impacto.	27
5.1.1.1.2 Rigidez	27
5.1.1.1.3 Resistencia a la tracción	28
5.1.1.1.4 Costo del material.....	28
5.1.1.1.5 Facilidad de impresión.	28
5.1.1.1.6 Resistencia química.....	28
5.1.2 Selección de Alternativas	29
5.1.3 Patrón de relleno de la matriz.....	30
5.1.4 Determinación teórica de las dimensiones del patrón	34
5.2 Configuración de las fibras de refuerzo.	35

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE POLÍMEROS COMPUESTOS

	6
5.2.1 Selección fibras de refuerzo	35
5.2.2 Características de las fibras seleccionadas	36
5.2.2.1 Fibra de carbono.....	36
5.2.2.2 Fibra de kevlar.....	36
5.2.2.3 Fibra de vidrio.	36
5.2.3 Parámetros de impresión	36
5.2.4 Cálculo del volumen de fibra	38
5.3 Configuración ensayo según la norma ASTM y medidas de la probeta.....	38
6. Propiedades efectivas del compuesto.....	41
6.1 Distribución de capas en el material compuesto	42
6.2. Fracciones volumétricas de los componentes.....	44
6.3 Propiedades mecánicas del onyx sólido y con infill triangular	47
6.4 Propiedades mecánicas de las fibras de refuerzo	50
6.5 Propiedades mecánicas efectivas del compuesto	54
7. Modelado Computacional	57
7.1 Ansys Composite PrepPost.....	57
7.2 Construcción de la Geometría	64
7.3 Análisis de dinámica explícita.....	66
7.4 Mallado	73
7.5 Elementos del Análisis dinámico	78
8. Validación de Resultados.....	81
9. Conclusiones	86
10. Trabajos Futuros	89

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE POLÍMEROS
COMPUESTOS

	7
Referencias Bibliográficas.....	92
Apéndices	99

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1. Metodología para el análisis de resistencia al impacto en compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas.....	22
Tabla 2. Propiedades mecánicas importantes de las diferentes alternativas.....	28
Tabla 3. Matriz de decisión para la selección de alternativas.....	29
Tabla 4. Parámetros de impresión para la matriz de infill triangular	33
Tabla 5. Unidad de patrón de celda para un relleno triangular y sus expresiones de área.34	Tabla
Tabla 6. Parámetros de impresión para las fibras de refuerzo.	37
Tabla 7. Distribución de capas que conforman la sección interna de la probeta.....	44
Tabla 8. Valores fracciones volumétricas de la probeta.....	47
Tabla 9. Propiedades mecánicas del onyx sólido y onyx con relleno triangular.....	50
Tabla 10. Propiedades mecánicas ortotrópicas de las fibras de refuerzo utilizadas en el compuesto.....	53
Tabla 11. Propiedades elásticas efectivas del material compuesto según el tipo de fibra de refuerzo.	56
Tabla 12. Límite uniaxial elástico a la tracción para los materiales.....	56
Tabla 13. Propiedades del material compuesto con los diferentes materiales de refuerzo obtenidas por ACP.....	61
Tabla 14. Propiedades del Onyx solido de acuerdo con la simulación ACP.....	63
Tabla 15. Propiedades del Acero AISI 1030.	69
Tabla 16. Valores para los mallados en las diferentes iteraciones	81
Tabla 17. Valores de energía para las iteraciones con valores calculados	81

Tabla 18. Grado de convergencia entre iteraciones con valores calculados.....	82
Tabla 19. Valores de energía para las iteraciones con valores de ACP.....	83
Tabla 20. Grado de convergencia entre iteraciones con valores de ACP	84
Tabla 21. Comparación entre valores encontrados y valores esperados.....	85

Lista de Figuras

	Pág
Figura 1. Dimensiones probeta de acuerdo con la normativa ASTM A-370.....	24
Figura 2. Diferentes tipos de orientación.	25
Figura 3. Distribución del patrón de relleno para la matriz.....	33
Figura 4. Disposición de las fibras de refuerzo.	37
Figura 5. Dimensiones probeta de acuerdo con la normativa ASTM A370.....	39
Figura 6. Modelo detallado y explosionado de la probeta.	43
Figura 7. Capa base del elemento interno de la probeta al que se le aplicó ACP.....	57
Figura 8. Creación de las 100 capas en ACP para el centro de la probeta.	58
Figura 9. Resultado final de las 100 capas desarrolladas en ACP para el centro de la probeta.	59
Figura 10. Configuración del análisis de material apilado para el centro de la probeta	59
Figura 11. Matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez para la configuración con fibra de carbono.....	60
Figura 12. Capa base del borde de la probeta a la que se aplicó ACP	61
Figura 13. Resultado final de las 100 capas desarrolladas en ACP para el borde de la probeta.....	62
Figura 14. Matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez para el borde de la probeta.	62
Figura 15. Cabeza del martillo en SolidWorks.	64
Figura 16. Probeta 1 en SolidWorks.	65
Figura 17. Probeta 2 en SolidWorks (ACP).	66

Figura 18. Ensamblaje completo en SolidWorks.	66
Figura 19. Análisis de dinámica explícita aplicado a dos configuraciones diferentes.....	67
Figura 20. Inserción de las propiedades de los materiales calculadas en el ANSYS.....	67
Figura 21. Inserción de las propiedades de los materiales determinadas por ACP en el ANSYS.....	68
Figura 22. Asignación de material al martillo.	69
Figura 23. Asignación de material a la probeta.	70
Figura 24. Asignación de material al borde de la probeta por ACP	71
Figura 25. Asignación del tipo de contacto en primer análisis dinámico.....	72
Figura 26. Asignación del tipo de contacto en segundo análisis dinámico.	72
Figura 27. Mallado multizona	74
Figura 28. Mallado por tamaño del cuerpo.	74
Figura 29. Mallado por esfera de influencia.....	75
Figura 30. Mallado en todo el ensamble	75
Figura 31. Detalle del mallado en la probeta.	75
Figura 32. Calidad del mallado.	76
Figura 33. Velocidad de trabajo.....	78
Figura 34. Soportes fijos del análisis.....	79
Figura 35. Tipo y tiempo para el análisis dinámico.	80
Figura 36. Tipo de solución requerida.....	80

Glosario

ACP (ANSYS Composite PrepPost): Módulo de ANSYS para diseño y análisis de materiales compuestos multicapa.

Anisotropía: Propiedad de un material cuyas características varían según la dirección.

ANSYS Workbench: Software de simulación para predecir el comportamiento de productos.

Charpy (Ensayo de Impacto Charpy): Prueba para medir la tenacidad al impacto de un material.

CFR (Refuerzo de Fibra Continua): Proceso de fabricación aditiva que incorpora fibras continuas para mejorar propiedades mecánicas.

Compuestos de Polímeros: Materiales de matriz polimérica y refuerzo, con propiedades mejoradas.

Convergencia: En simulaciones numéricas, resultados estables de iteraciones sucesivas.

Densidad de Relleno: Porcentaje de material para rellenar el volumen interno de una pieza impresa en 3D.

Energía Absorbida: Cantidad de energía que un material puede disipar antes de fracturarse.

Explicit Dynamics: Método de simulación para analizar fenómenos dinámicos rápidos.

Fibra de Carbono: Material de refuerzo de alta resistencia, rigidez y bajo peso.

Fibra de Kevlar: Fibra sintética de aramida con excepcional resistencia a la tracción y al impacto.

Fibra de Vidrio: Material de refuerzo económico con buena resistencia química y mecánica.

Mallado: Proceso de discretizar una geometría en elementos finitos para análisis numérico.

Matriz (en Materiales Compuestos): Componente continuo que une y protege las fases de refuerzo.

MEF (Método de Elementos Finitos): Técnica numérica para resolver problemas de ingeniería discretizando un medio continuo.

Onyx: Polímero avanzado (PA6) reforzado con fibras cortas de carbono, usado como matriz en impresión 3D.

Ortotrópico: Material con propiedades mecánicas diferentes en tres direcciones perpendiculares.

PA6 (Poliamida 6): Polímero termoplástico con buenas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y tenacidad.

Patrón de Relleno Triangular: Diseño de estructura interna en piezas impresas en 3D para alta resistencia y estabilidad.

Porosidad: Proporción de cavidades o vacíos en un material, que afecta sus propiedades mecánicas.

Regla de Mezclas (ROM): Enfoque para predecir propiedades elásticas de materiales compuestos.

Rigidez Volumétrica Promedio (Método de): Herramienta analítica para predecir constantes elásticas de componentes impresos en 3D.

Tenacidad al Impacto: Capacidad de un material para absorber energía antes de llegar a fracturarse bajo impacto.

Resumen

Título: Estudio numérico de la resistencia al impacto de compuestos de polímeros pa6 reforzados individualmente con fibras continuas a temperatura ambiente *

Autores: Juan Diego Barajas Rangel, Luis Felipe Aranibar González. **

Palabras Clave: Modelado numérico, Resistencia al impacto, polímeros compuestos, análisis de elementos finitos (FEA)

Descripción:

Este estudio presenta un análisis numérico de la resistencia al impacto de materiales compuestos de PA6 (Onyx) reforzados con fibras continuas (carbono, Kevlar y vidrio), fabricados mediante manufactura aditiva. El objetivo principal es evaluar y comparar dos metodologías distintas para determinar las propiedades mecánicas efectivas utilizadas en una simulación de impacto Charpy. El primer enfoque se basa en modelos analíticos. Implica el cálculo de las fracciones volumétricas de las partes constitutivas de la probeta: paredes sólidas, capas internas sólidas, un relleno triangular con un 20% de densidad y el refuerzo de fibra continua. Las propiedades del relleno celular se estimaron mediante el modelo de Gibson-Ashby, y las propiedades ortotrópicas efectivas finales se obtuvieron a través de un método de homogeneización por promedio de rigidez volumétrica.

La segunda metodología emplea un enfoque computacional utilizando el módulo ANSYS Composite PrepPost (ACP) para generar un segundo conjunto de propiedades mecánicas efectivas, el modelo se dividió en sus paredes externas y un núcleo interno, que combina la matriz y el refuerzo de fibra.

Posteriormente, ambos conjuntos de propiedades (las derivadas de los modelos matemáticos y las obtenidas mediante ACP se utilizan para realizar una simulación dinámica del ensayo de impacto Charpy en ANSYS.

El método analítico de propiedades calculadas mostró mayor fiabilidad que ACP. Se identificaron limitaciones en el modelado numérico para simular fenómenos de falla complejos como la delaminación y la ruptura, especialmente en materiales frágiles como la fibra de carbono, lo que llevó a sobreestimaciones significativas. Se enfatiza la importancia de la selección de materiales y la validación experimental para mejorar la precisión predictiva de las simulaciones futuras.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingeniería Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel del Jesús Martínez, PhD.

Abstract

Title: Numerical Study of the Impact Resistance of PA6 Polymer Composites Singly Reinforced with Continuous Fibers at Room Temperature*

Authors: Juan Diego Barajas Rangel, Luis Felipe Aranibar González. **

Keywords: Numerical modeling, Impact resistance, Polymer composites, Finite Element Analysis (FEA).

Description:

This study presents a numerical analysis of the impact resistance of PA6 (Onyx) composites reinforced with continuous fibers (carbon, Kevlar, and glass), fabricated using additive manufacturing. The main objective is to evaluate and compare two distinct methodologies for determining the effective mechanical properties used in a Charpy impact simulation.

The first approach is based on analytical models. It involves calculating the volumetric fractions of the specimen's constituent parts: solid walls, internal solid layers, a triangular infill with 20% density, and continuous fiber reinforcement. The properties of the cellular infill were estimated using the Gibson-Ashby model, and the final effective orthotropic properties were obtained through a volumetric stiffness averaging homogenization method.

The second methodology employs a computational approach using the ANSYS Composite PrepPost (ACP) module to generate a second set of effective mechanical properties. The model was divided into its external walls and an internal core, which combines the matrix and the fiber reinforcement.

Subsequently, both sets of properties (those derived from mathematical models and those obtained via ACP) are used to perform a dynamic simulation of the Charpy impact test in ANSYS.

The analytical method of calculated properties showed greater reliability than ACP. Limitations were identified in numerical modeling for simulating complex failure phenomena such as delamination and rupture, especially in brittle materials like carbon fiber, which led to significant overestimations. The importance of material selection and experimental validation is emphasized to improve the predictive accuracy of future simulations.

* Undergraduate thesis.

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering Project Director: Manuel del Jesús Martínez, PhD.

Introducción

La fabricación aditiva ha transformado radicalmente las metodologías de diseño y producción de componentes en la ingeniería moderna. Dentro de este campo, los compuestos de polímero como la poliamida 6 (PA6) han ganado una amplia aceptación debido a sus favorables propiedades mecánicas y químicas. La versatilidad de estos materiales permite la creación de geometrías complejas y personalizadas, abriendo nuevas posibilidades en múltiples sectores industriales.

A pesar de su potencial, el comportamiento mecánico de estos compuestos poliméricos se ve significativamente influenciado por una variedad de factores, que incluyen las condiciones de impresión, la geometría de la pieza y los parámetros específicos del proceso, la comprensión, desarrollo y optimización tanto del material como del proceso de fabricación se ha basado de manera predominante en pruebas y experimentos físicos. Sin embargo, este enfoque experimental presenta limitaciones notables, especialmente en términos de costos, tiempo y los recursos sustanciales que demanda.

Una de las áreas críticas que ha sido insuficientemente estudiada es la tenacidad y el comportamiento frente a cargas de impacto. Si bien algunos estudios han explorado la influencia de los patrones y densidades de relleno, falta una evaluación detallada y profunda del rendimiento al impacto, un aspecto crucial para garantizar la fiabilidad y seguridad de los componentes en aplicaciones prácticas. Esta brecha en el conocimiento subraya la necesidad de buscar métodos de análisis más eficientes y precisos.

En consecuencia, la simulación numérica emerge como un mecanismo poderoso y una alternativa viable para superar las limitaciones de la experimentación física. El uso de técnicas

computacionales avanzadas, como el método de elementos finitos (MEF), permite crear modelos predictivos precisos que capturan el comportamiento mecánico de los materiales compuestos. Estos modelos no solo agilizan los ciclos de investigación y desarrollo, sino que también reducen significativamente los costos al disminuir la dependencia de ensayos físicos, permitiendo analizar de manera eficiente cómo factores como la orientación y la geometría de la pieza afectan la resistencia al impacto.

1. Planteamiento del Problema

Actualmente, los compuestos de polímero, como el PA6 (poliamida 6), se utilizan ampliamente en la fabricación aditiva o impresión 3D debido a sus propiedades mecánicas y químicas favorables. Estos materiales han revolucionado la manera en que se diseñan y producen componentes, ofreciendo una versatilidad que permite la creación de geometrías complejas y personalizadas. Sin embargo, el comportamiento de estos compuestos puede verse significativamente afectado por diversos factores, como las condiciones de impresión, la geometría de la pieza y los parámetros de procesamiento (Díaz-Rodríguez et al., 2021).

La fabricación aditiva de productos y compuestos poliméricos se basa principalmente en pruebas y experimentos que buscan investigar, desarrollar y comprender tanto el producto como el proceso y el sistema involucrado. Aunque algunos estudios previos han analizado experimentalmente cómo los patrones y densidades de relleno influyen en el desempeño mecánico de los compuestos poliméricos impresos en 3D, la evaluación detallada de la prueba de impacto en estos materiales ha sido insuficiente (Vaško et al., 2020). Esta falta de estudios profundos genera la necesidad imperiosa de investigar a fondo cómo se comporta la tenacidad frente al impacto de los materiales compuestos, un aspecto crítico para garantizar su rendimiento en aplicaciones prácticas.

Además, la gran flexibilidad de diseño que ofrecen los procesos de impresión 3D, junto con la variedad de fórmulas de los compuestos poliméricos, plantea la oportunidad de explorar el uso de herramientas de simulación numérica. Estas herramientas no solo permiten agilizar los tiempos de investigación y desarrollo, sino que también contribuyen a reducir costos asociados con la experimentación física. La simulación numérica se presenta como una alternativa viable

para modelar el comportamiento de los materiales, facilitando la identificación de configuraciones óptimas y propiedades mecánicas deseadas.

En este contexto, la presente investigación se propone utilizar técnicas de modelado numérico para analizar y evaluar la tenacidad frente al impacto de estos materiales compuestos reforzados con fibras continuas. Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se puede evaluar la resistencia al impacto de materiales compuestos reforzados con diversas fibras continuas utilizando modelación numérica?

2. Justificación del Problema

La necesidad de realizar numerosos ensayos experimentales, en el desarrollo y evaluación de materiales compuestos impresos en 3D, especialmente aquellos que implican cargas de impacto, pueden ser costosos, consumir mucho tiempo y requerir recursos sustanciales. Mediante el uso de técnicas avanzadas como el método de elementos finitos, es posible crear modelos precisos que capturen el comportamiento mecánico de estos materiales, reduciendo significativamente la necesidad de realizar múltiples pruebas físicas (Barbero, 2018). Estos modelados numéricos permiten analizar de manera eficiente las propiedades mecánicas como la resistencia al impacto, la geometría de la pieza y la orientación de las fibras, lo que facilita la selección de materiales sin incurrir en altos costos experimentales (Vaško et al, 2020).

Por medio de modelaciones numéricas basadas en técnicas computacionales avanzadas, como el método de elementos finitos, es posible estudiar en detalle el comportamiento mecánico de los compuestos de PA6 impresos en 3D. Estos modelados permiten analizar de manera precisa y eficiente cómo las propiedades mecánicas y la respuesta al impacto de estos materiales se ven

afectadas por diversos factores, como la geometría de la pieza, las condiciones de impresión y la orientación de las fibras, reduciendo costos y la necesidad de realizar numerosos ensayos experimentales (Barbero, 2018).

La validación de los resultados numéricos con datos experimentales es fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de las simulaciones, lo que a su vez respalda la toma de decisiones informadas en el diseño y fabricación de componentes impresos en 3D con PA6.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la resistencia al impacto de materiales compuestos reforzados con diferentes fibras continuas mediante modelación numérica a temperatura ambiente.

3.2 Objetivo Específicos

Establecer la configuración geométrica, patrón de relleno y orientación de fibras de los materiales compuestos para su posterior modelado

Determinar las propiedades efectivas de cada probeta mediante la recopilación de datos experimentales y el uso de métodos teóricos.

Modelar numéricamente pruebas de impacto de los materiales compuestos a temperatura ambiente.

Validar los datos obtenidos mediante el modelamiento numérico con los datos experimentales.

4. Metodología

Este estudio se enfoca en un análisis numérico para evaluar la resistencia al impacto de compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas, utilizando como referencia datos experimentales publicados previamente. La metodología se organiza en cuatro etapas secuenciales: configuración geométrica, caracterización de propiedades, simulación computacional y validación con literatura especializada. Cada fase integra acciones estructuradas para garantizar coherencia, precisión y replicabilidad. A continuación, en la Tabla 1 se sintetiza el flujo metodológico de manera clara y concisa.

Tabla 1

Metodología para el análisis de resistencia al impacto en compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas.

Etapas	Propósito	Acciones clave
		Establecer dimensiones según norma ASTM A-370
Configuración geométrica	Definir parámetros base del material compuesto	Especificar configuración de la matriz PA6 Seleccionar fibras de refuerzo y su configuración
Caracterización de propiedades	Determinar propiedades mecánicas del compuesto	Recopilar datos de matriz y fibras (módulo elástico, densidad, etc.) Aplicar modelos teóricos para estimar propiedades efectivas

Simulación numérica	Modelar el comportamiento dinámico ante impacto	Diseñar modelos 3D con geometría definida Configurar condiciones de contorno y cargas de impacto
Validación de datos	Contrastar resultados numéricos con estudios previos	Ejecutar modelos numéricos Comparar energía absorbida y patrones de falla con ensayos experimentales obtenidos de la literatura Analizar las posibles causas en la diferencia de los resultados y realizar ajustes en el modelo

Nota. Esta tabla muestra la metodología de investigación utilizada, destacando las etapas clave y las acciones necesarias para alcanzar los objetivos propuestos. Cada etapa se centra en un aspecto fundamental del estudio, desde la configuración geométrica del material compuesto hasta la validación de los datos obtenidos.

5. Configuración del material compuesto.

En este capítulo, se definió y se especificó la configuración geométrica de las probetas de acuerdo con los materiales compuesto las dimensiones de los especímenes de acuerdo con la prueba de impacto, la forma de la matriz polimérica, la descripción del refuerzo y parámetros de impresión como la orientación de impresión de las muestras y los ángulos de deposición.

Los materiales compuestos son una combinación de dos o más componentes que, al trabajar juntos, ofrecen propiedades mecánicas superiores a las de sus materiales base. En este proyecto, se ha utilizado un material compuesto mediante manufactura aditiva utilizando la impresora

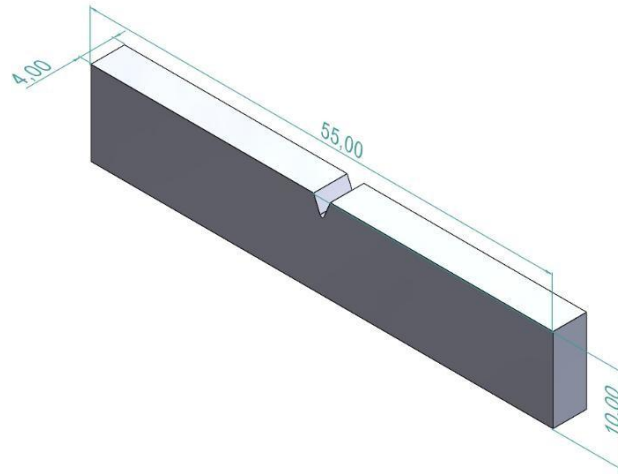
Markforged Two®, conocida por su capacidad para integrar refuerzos de alta resistencia en piezas impresas en 3D.

El material base utilizado es Onyx®, un polímero avanzado reforzado con fibras cortas de carbono, que se complementa con refuerzos continuos de fibra de carbono, fibra de Kevlar y fibra de vidrio. Estas fibras permiten personalizar las propiedades del material según las necesidades del diseño, maximizando su resistencia, rigidez y durabilidad.

Se establecieron las dimensiones de la probeta de acuerdo a la normativa ASTM A-370, aunque esta norma es originalmente diseñada para productos de acero, se seleccionó esta normativa para garantizar las consistencias y la comparabilidad de los resultados para la prueba de impacto, ya que esta detalla las especificaciones para pruebas mecánicas de productos relacionados con el acero, pero su aplicación en materiales compuestos implica el uso de dimensiones que permitan una evaluación efectiva de la resistencia al impacto por las dimensiones establecidas fueron de 55 mm de largo, 10 mm de alto y 4 mm de ancho como se puede observar en la figura 1, lo que proporciona un tamaño adecuado para generar resultados significativos y fiables. La elección de estas dimensiones se basa en la necesidad de cumplir con las condiciones de prueba que aseguran que no haya interferencia durante la medición de la resistencia al impacto, y que las propiedades mecánicas sean representativas del material fabricado.

Figura 1

Dimensiones probeta de acuerdo con la normativa ASTM A-370.

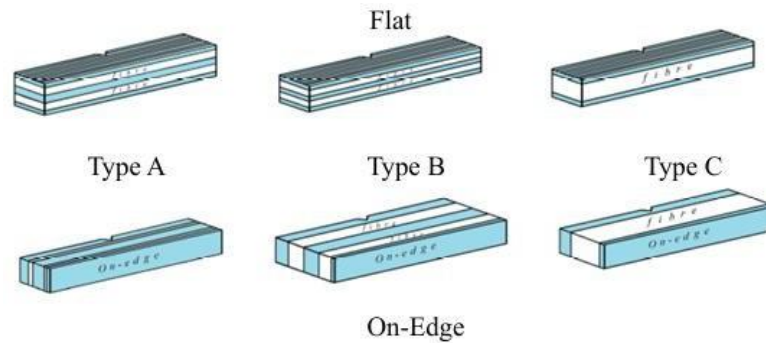


Nota. Representación isométrica de las configuraciones de entallas comúnmente empleadas en probetas para ensayos de impacto de acuerdo con la normativa ASTM A370.

En cuanto a la orientación de la pieza durante la fabricación aditiva, se eligió la configuración en bisel, también conocida como “on-edge” (ver Figura 2), como sugieren Díaz-Rodríguez et al. (2023) y Caminero et al. (2018). Esta disposición alinea las capas impresas perpendicularmente al esfuerzo principal, permitiendo que la carga se distribuya a través de la sección transversal de cada capa. Esto maximiza la resistencia a tracción, compresión y flexión, y además evita la delaminación, una de las principales debilidades de las piezas impresas en 3D. La orientación "on-edge" refuerza la unión entre capas en la dirección de carga, y al estar acompañada de fibras alineadas con esa misma dirección, mejora notablemente la absorción de energía durante impactos y la resistencia a la propagación de grietas.

Figura 2

Diferentes tipos de orientación.



Nota. Se muestran tres configuraciones de orientación tipo “On-edge” (A, B y C), junto con la orientación convencional “Flat”, utilizadas en la impresión de probetas reforzadas. Tomado de *Mechanical Performance of Additive Manufactured Onyx and Continuous Carbon Fibre-Reinforced Onyx under Impact and High-Strain Rate Tensile Loadings* por I. Díaz-Rodríguez et al., 2023, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5), 178. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050178>.

5.1. Configuración de la Matriz

5.1.1. Selección Material de la Matriz

La selección adecuada de materiales en la impresión 3D es un paso crítico para garantizar que las piezas fabricadas puedan cumplir con los requisitos de su aplicación prevista. Por lo que en esta sección se proporcionó una comparativa general de los materiales que se pueden emplear, considerando que la selección de un material correcto es importante cuando las piezas están sujetas a cargas mecánicas significativas en este caso como lo es la prueba de impacto la cual es fundamental para evaluar la resistencia a la fractura o a la deformación del material cuando se somete a una fuerza repentina y de alta energía.

Entre la variedad de materiales disponibles para la impresión 3D, el Onyx se posiciona como una opción para aplicaciones donde es necesaria una alta resistencia mecánica, este material

está compuesto de una matriz de nylon reforzado con fibras cortas de carbono es reconocido por su notable equilibrio de alta resistencia, rigidez y un acabado superficial liso y estéticamente agradable. Estas propiedades establecen que el Onyx es un candidato prometedor para aplicaciones donde la resistencia al impacto un factor importante, sin embargo esto requirió una evaluación más detallada de las propiedades de los materiales como la posibilidad de haber utilizado PLA, ABS, PETG, Nylon para la elaboración de la pieza, poniendo requisitos de rendimiento específicos para el proceso de selección, como la resistencia al impacto, rigidez, resistencia a la tracción, costo del material, facilidad de impresión ya que desempeñan un papel fundamental para determinar si son óptimos.

5.1.1.1 Factores de influencia y su ponderación para la selección de material. A continuación, se identificaron algunos de los factores claves para una óptima selección del material asignándoles una ponderación con una escala establecida entre bajo y muy alto asignándole los valores de 1 y 5 respectivamente basada en su relevancia para una prueba de impacto.

5.1.1.1.1 Resistencia al impacto. Se conoce como la capacidad de absorción de energía del material durante un impacto sin fracturarse es la propiedad central que se busca evaluar en este tipo de pruebas, siendo el factor más crítico al momento de seleccionar un material en una prueba de impacto. Por lo tanto, se le asignó una ponderación de 5 en una escala de 1 como baja y 5 como muy alta.

5.1.1.1.2 Rigidez. Evaluada por el módulo de flexión, también es importante al momento de selección del material ya que la resistencia a la deformación puede influir en cómo se distribuye la energía del impacto a través de la pieza. Una mayor rigidez puede ser deseable en algunos casos para evitar una deformación excesiva. Por esta razón recibe una ponderación de 4 considerada como alta.

5.1.1.1.3 Resistencia a la tracción. A este factor se le asignó una ponderación de 3 la cual se considera como media, puesto que un material con buena resistencia a la tracción se puede comportar de mejor forma a la propagación de grietas, aunque no sea el factor principal de una prueba de impacto, es importante para la integridad general del material la durabilidad general de la pieza.

5.1.1.1.4 Costo del material. Es un factor el cual se consideró debido a que, si se requieren múltiples pruebas o si el volumen de material necesario es grande, el precio del filamento es un factor limitante. Por esta razón, el costo del material recibe una ponderación media de 3

5.1.1.1.5 Facilidad de impresión. Al momento de imprimir es importante que se logre con éxito su geometría y sin defectos que puedan comprometer los resultados de la prueba. Sin embargo, para la prueba en sí, las propiedades mecánicas del material impreso son más críticas que la facilidad con la que se logró la impresión. Por lo tanto, recibió una ponderación baja de 2

5.1.1.1.6 Resistencia química. Para una prueba estándar este factor no es tan influyente debido a que esta no se realiza en un entorno donde se exponga la pieza a productos químicos a no ser que sea una especificación requerida, por lo que este factor recibe una ponderación baja de 1 a no ser que las especificaciones de la prueba digan lo contrario

La siguiente tabla proporciona una comparación de las propiedades mecánicas relevantes para una prueba de impacto de los materiales de impresión 3D más comunes. Los valores presentados son rangos típicos o valores promedio basados en la información recopilada.

Tabla 2

Propiedades mecánicas importantes de las diferentes alternativas.

Material	Resistencia al Impacto (Izod con muesca)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)
-----------------	---	--	---------------------------------------

PLA	20–60 J/m	40–60	77–85
ABS	2.5–7.7 ft-lb/in	42–48	66–91
PETG	37–101 J/m	28–50	54–74
Nylon	4.0–11.1 kJ/m ²	40–100	91–95
TPU	3.58 J/cm	39–63	64–95
Onyx	330 J/m	37–40	71–81

Nota. Propiedades mecánicas relevantes para una prueba de impacto de los materiales de impresión 3D más comunes. Elaboración propia

5.1.2 Selección de Alternativas

Se realizó una matriz de decisión para evaluar las diferentes alternativas establecidas anteriormente, se elaboró en función de los factores que más influyen en la impresión 3D los cuales ya fueron identificados, se utilizó una escala de evaluación de 1 a 5, donde 5 representa el mejor rendimiento para ese factor.

Tabla 3

Matriz de decisión para la selección de alternativas.

Material	Resistencia al Impacto (5)	Rigidez (4)	Resistencia a la Tracción (3)	Costo (3)	Facilidad de Impresión (2)	Resistencia Química (1)	Puntuación Total Ponderada
PLA	1	3	4	5	5	2	56
ABS	3	3	3	4	3	3	57
PETG	4	3	3	3	4	2	60

Nylon	4	3	4	2	3	4	60
TPU	5	1	2	3	4	3	55
Onyx	4	4	3	2	3	4	61

Nota. Matriz de selección para la mejor alternativa teniendo como factor principal la prueba de impacto, elaboración propia.

Basándose en estos resultados el Onyx se considera como una buena opción, ya que obtuvo una resistencia al impacto de 4 lo que refleja su capacidad mejorada en comparación con plásticos como el PLA y el ABS, sin embargo el Nylon y el PETG presentan un valor similar pero algunos de sus valores son más bajos como su menor rigidez y mayor dificultad de impresión, por otro lado el TPU presenta una mayor resistencia al impacto pero su baja rigidez lo hace menos adecuado para pruebas que requieran mínimas deformaciones, el PLA y el ABS obtuvieron puntuaciones más bajas en general, principalmente debido a su menor resistencia al impacto en comparación con el Onyx, teniendo en cuenta estos resultados y considerando como más importante la resistencia al impacto y la rigidez para las pruebas de impacto, se seleccionó el Onyx como la mejor opción debido a su combinación única de nylon y fibras cortas de carbono lo que le otorga mejores propiedades mecánicas en comparación a otros termoplásticos.

5.1.3 Patrón de relleno de la matriz.

Se selecciono un patrón de relleno triangular ya que al ser una forma triangular y un polígono básico con una distribución uniforme debido a sus ángulos y longitudes son fijos, proporcionando un elemento estructural robusto, gran estabilidad, capacidades eficientes como soportes de carga y una distribución uniforme de las cargas de las estructuras impresas lo que mejora la resistencia a los cambios de forma proporcionando estabilidad y resistencia a la

deformación y una capacidad de distribuir eficazmente las fuerzas de impacto a través de su estructura, ya que como señala Markforged (s. f.-a), los triángulos son la forma geométrica más fuerte y menos propensa a deformarse, proporcionando la mejor estructura de soporte, ya que este es un factor relevante en casos de impacto donde la probeta experimenta cargas repentinas y de alta intensidad que pueden provocar una deformación rápida sin embargo la red interconectada de celdas triangulares en el relleno puede actuar como una estructura tipo celosía, resistiendo eficazmente las fuerzas de compresión y cortante que normalmente se generan durante un evento de impacto.

De acuerdo con la información obtenida sobre los patrones de relleno como como la investigación elaborada por Liu et al. (2023) se sugiere que el patrón de relleno triangular presenta un equilibrio entre resistencia y eficiencia del material, ya que se obtuvo que los especímenes con esta geometría pudieron soportar cargas de compresión más altas por unidad de masa comparados con otros patrones como rectangular y gyroid, esto significa que se obtiene una estructura más ligera sin sacrificar la resistencia necesaria, o como expresa la investigación de Stewart (2024) donde destaca que el un patrón de relleno triangular demostró un rendimiento superior en términos de relación peso-resistencia, permitiendo diseñar partes con menor masa, pero aún con alto rendimiento estructural, lo cual es beneficioso en aplicaciones donde el peso es crítico, este hallazgo es crucial en el contexto del impacto, donde minimizar el peso manteniendo la integridad estructural puede ser una consideración clave de diseño. Una mayor relación resistencia-peso implica que el material puede soportar fuerzas de impacto significativas sin añadir una masa excesiva, lo que puede ser beneficioso en diversas aplicaciones de ingeniería.

Se seleccionó una densidad de relleno del 20% para equilibrar el uso de material y el tiempo de impresión con la necesidad de un soporte interno suficiente para simular con precisión el evento

de impacto. Esta densidad representa un equilibrio entre la creación de una probeta ligera y económica de imprimir y garantizar que haya suficiente material interno para proporcionar una representación realista de la respuesta estructural de la probeta bajo impacto. Una densidad muy baja podría conducir a una simulación de un objeto en gran parte hueco, lo que no reflejaría con precisión el comportamiento de una pieza típica impresa en 3D, mientras que una densidad muy alta aumentaría los costos de material y el tiempo de impresión sin proporcionar necesariamente un aumento proporcional en la precisión de la simulación de impacto para el patrón de relleno elegido.

Esta densidad se utiliza a menudo para modelos donde la apariencia visual es importante o como punto de partida para el análisis estructural, lo que representa una estructura interna relativamente escasa pero que aún proporciona cierto nivel de soporte. Como se menciona se utiliza una densidad de relleno de alrededor del 20% para modelos con un propósito visual, lo que sugiere que proporciona un nivel básico de integridad estructural sin ser excesivamente denso. Esto indica que es un punto de partida razonable para investigar el comportamiento ante el impacto de la probeta. Si una densidad del 20% se considera suficiente para mantener la forma y la integridad básica de un modelo visual, es probable que proporcione suficiente estructura interna para permitir una simulación de impacto significativa, especialmente cuando se combina con un patrón de relleno estructuralmente sólido como el triangular. La investigación sugiere que las densidades de relleno entre el 20% y el 25% ofrecen un compromiso razonable entre durabilidad y consumo de material para aplicaciones generales.

Posteriormente para la configuración precisa de los parámetros de impresión requeridos en este estudio, se optó por el software Eiger de Markforged. Este software fue seleccionado por su capacidad para ejercer un control detallado sobre las variables del proceso de fabricación aditiva,

lo cual es crucial para optimizar la resistencia al impacto y otras propiedades mecánicas de las probetas impresas. Los parámetros de impresión definidos mediante Eiger se pueden observar en la Tabla 4, que incluyen el patrón de relleno (triangular), la densidad del relleno (20%). Además, se puede observar en la Figura 3 la distribución de estos parámetros dentro del diseño de la probeta para facilitar una mejor comprensión de su influencia en la respuesta estructural del material ante el impacto.

Tabla 4

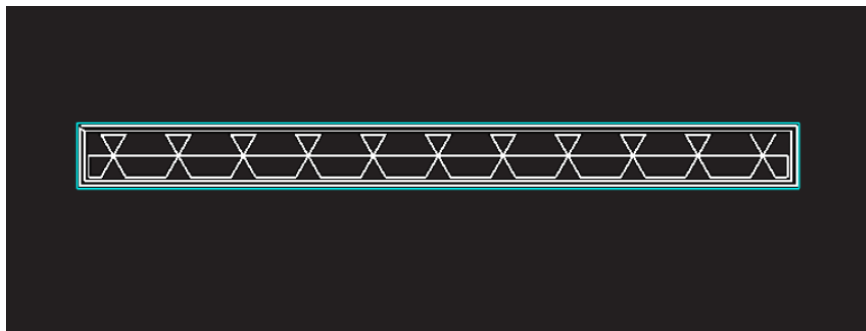
Parámetros de impresión para la matriz de infill triangular.

Infill triangular	
Altura de capa	<i>0,1 mm</i>
Tipo de infill	<i>Triangular</i>
Densidad de relleno	<i>20%</i>
Número de capas superiores	<i>4</i>
Número de capas inferiores	<i>4</i>
Paredes	<i>2</i>

Nota. parámetros de impresión definidos para la matriz. Elaboración propia.

Figura 3

Distribución del patrón de relleno para la matriz.



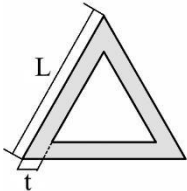
Nota. Distribución del patrón de relleno en forma triangular en una matriz lineal, generada utilizando la plataforma de software Eiger de Markforged. La imagen ilustra cómo las celdas de relleno se organizan para la impresión aditiva. Tomado de Eiger, <https://www.eiger.io/>.

5.1.4 Determinación teórica de las dimensiones del patrón

Una vez definido el patrón de relleno y su densidad se procedió a dimensionarlo por lo que se estableció una unidad básica o una unidad individual para cada celda en la geometría como se puede observar en la Tabla 5, esto representa la proporción de cuánto se llena por cada unidad de área o volumen del patrón. Una vez que se tiene esta unidad, se procedió a calcular las dimensiones finales de los componentes del patrón y, mediante la razón de llenado.

Tabla 5

Unidad de patrón de celda para un relleno triangular y sus expresiones de área.

Unidad de patrón	Área rellena	Área total
	$\sqrt{3} * t(L - t)$	$\frac{L^2\sqrt{3}}{4}$

Nota. Representación esquemática de una unidad de patrón individual de celda para un relleno triangular. L representa la longitud del lado del triángulo y t el espesor del material. El área rellena corresponde al área del material sólido dentro de la unidad, y el área total es el área de la celda completa. Elaboración propia.

Donde el área rellena representa el espacio que será ocupado por el material al momento de la impresión y el porcentaje de relleno se refiere a la densidad interna de la pieza. Este porcentaje determina cuánta materia prima se utiliza para rellenar el volumen interno, mientras que las

paredes exteriores permanecen constantes. La relación matemática entre el área total a rellenar y el porcentaje de relleno puede expresarse considerando el volumen del objeto y cómo el relleno afecta dicho volumen o área, obteniendo así la expresión matemática para su relación.

$$A_{relleno} = A_{total} * Densidad\ de\ relleno \quad \text{Ecuación 1}$$

Por lo que para obtener el lado (L) del triángulo equilátero y sabiendo que (t) hace referencia al espesor de la boquilla con la cual se realiza la impresión que tiene un valor de 0,4 mm y teniendo en cuenta la relación de áreas se obtuvo una Longitud de 7,5777 mm

5.2 Configuración de las fibras de refuerzo.

Dado que la matriz utilizada en este estudio es Onyx, un material desarrollado por la empresa Markforged, es imprescindible utilizar fibras de refuerzo compatibles con dicha tecnología. Esto se debe a que el proceso de fabricación se realiza mediante impresión 3D continua, la cual requiere materiales certificados por el fabricante para asegurar una correcta adhesión entre capas, compatibilidad térmica y óptimo desempeño mecánico.

5.2.1 Selección fibras de refuerzo

Entre las fibras disponibles para impresión continua con Onyx se encuentran la fibra de carbono, la fibra de carbono retardante de llama (FR), la fibra de aramida (Kevlar), la fibra de vidrio HSHT y la fibra de vidrio. No obstante, se descarta el uso de la fibra de carbono retardante de llama (FR), ya que está diseñada específicamente para aplicaciones que requieren resistencia al fuego y al calor extremo, lo cual no es necesario en este proyecto. De igual forma, se excluye la fibra de vidrio HSHT, puesto que está orientada a condiciones de operación con altas exigencias térmicas, lo cual no corresponde a los requerimientos del presente estudio.

5.2.2 Características de las fibras seleccionadas

En la configuración de las fibras de refuerzo para materiales compuestos, la selección de los tipos de fibras es crucial para determinar las propiedades mecánicas y el rendimiento del material final. Las fibras de carbono, Kevlar y vidrio han sido elegidas por sus características únicas que complementan y potencian la resistencia al impacto de los compuestos. Cada tipo de fibra aporta beneficios específicos, desde la reducción de peso hasta la mejora de la resistencia estructural, asegurando que el material compuesto cumpla con los requisitos de aplicaciones exigentes.

5.2.2.1 Fibra de carbono. Las fibras de carbono son esenciales por su alta resistencia y rigidez, ideales para aplicaciones que requieren reducción de peso y resistencia al impacto, como en la industria aeroespacial y automotriz. Su capacidad para mejorar la estructura sin aumentar el peso las convierte en una opción preferida.

5.2.2.2 Fibra de kevlar. La fibra de Kevlar destaca por su excepcional resistencia, siendo cinco veces más fuerte que el acero, y su capacidad para soportar condiciones extremas. Es utilizada en aplicaciones donde la resistencia al impacto es crítica, como en equipos de protección, mejorando la tenacidad y resistencia a la fatiga.

5.2.2.3 Fibra de vidrio. Finalmente, la fibra de vidrio es valorada por su combinación de propiedades mecánicas y costo accesible. Ofrece resistencia química y biológica, adecuada para ambientes corrosivos, y mejora la estabilidad dimensional y resistencia al impacto en diversas aplicaciones industriales.

5.2.3 Parámetros de impresión

Para lograr una adecuada implementación de las fibras de refuerzo en el material compuesto, se definieron parámetros de impresión específicos que aseguran una correcta

distribución del material y un rendimiento mecánico óptimo. Estos parámetros, como la altura de capa, el número de capas reforzadas y la disposición isotrópica de las fibras, fueron aplicados de forma uniforme para las fibras de carbono, Kevlar y vidrio. En la Tabla 6 se presentan las configuraciones utilizadas durante la etapa de fabricación, mientras que en la Figura 4 se muestra la disposición interna de las fibras de refuerzo en la probeta, según la visualización generada por el software Eiger de la empresa Markforged

Tabla 6

Parámetros de impresión para las fibras de refuerzo.

Fibras de refuerzo	
Altura de capa	<i>0,1 mm</i>
Número de capas con fibra de refuerzo	<i>52</i>
Numero de Capas totales	<i>100</i>
Disposición fibras de refuerzo	<i>Isotrópica</i>

Nota. Parámetros de impresión utilizados para las fibras de carbono, kevlar y vidrio en el material compuesto. Elaboración propia.

Figura 4

Disposición de las fibras de refuerzo.



Nota. Disposición isotrópica de las fibras de refuerzo. Tomado de <https://www.eiger.io/>

5.2.4 Cálculo del volumen de fibra

A partir de esta configuración, es posible analizar otros aspectos relevantes del diseño, como el contenido de refuerzo dentro del volumen total del material. En este sentido, el volumen de fibra en un material compuesto es un parámetro crítico que determina propiedades como la resistencia y la rigidez. Este se calcula como la relación entre el volumen de las fibras y el volumen total del compuesto, expresado generalmente en porcentaje. Para obtenerlo, se utiliza la Ecuación 2.

$$V_f = \frac{V_{fibras}}{V_{Total}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

En este caso, el volumen de fibra es aproximadamente del 24%, lo que indica que una cuarta parte del volumen total del material está compuesto por fibras de refuerzo. Este porcentaje es adecuado para asegurar un equilibrio entre la resistencia proporcionada por las fibras y la flexibilidad de la matriz, optimizando así el rendimiento del material compuesto.

5.3 Configuración ensayo según la norma ASTM y medidas de la probeta.

La norma ASTM A370 establece los procedimientos para realizar ensayos mecánicos en productos metálicos, incluyendo pruebas de tracción, dureza e impacto. Su objetivo es garantizar resultados consistentes y comparables, que permitan evaluar la resistencia y comportamiento de materiales metálicos bajo diferentes condiciones. Aunque está centrada en aceros y productos metálicos, muchas de sus directrices también se utilizan como referencia para comparar otros materiales, incluidos los compuestos, en contextos de investigación y desarrollo.

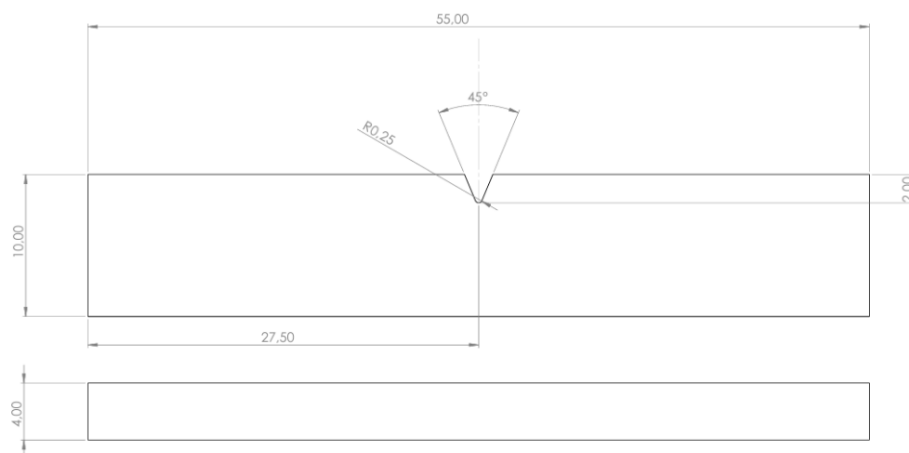
En los ensayos de impacto, esta norma es especialmente relevante porque define las dimensiones, preparación y configuración de las probetas para métodos como Charpy o Izod, que

evalúan la tenacidad del material ante cargas dinámicas.

En el presente estudio se emplearon probetas, cuyas dimensiones son: 55 mm de longitud, 10 mm de altura y 4 mm de espesor. Cada muestra incorpora una entalla tipo “V” con una profundidad de 2 mm, un ángulo de 45° y un radio de curvatura de 0.25 mm en la base. Estas especificaciones se basan en los lineamientos de la norma ASTM A370 para ensayos de impacto Charpy, la cual establece como dimensiones estándar para las probetas metálicas una longitud de 55 mm, altura de 10 mm y espesor de 10 mm. En este caso, el espesor se ha reducido a 4 mm como una adaptación necesaria a las limitaciones propias del proceso de manufactura aditiva y al diseño estructural del material compuesto. A pesar de esta modificación dimensional, se ha conservado la geometría crítica de la entalla, lo cual permite realizar una evaluación representativa del comportamiento frente al impacto y de la energía absorbida durante la fractura del material analizado.

Figura 5

Dimensiones probeta de acuerdo con la normativa ASTM A370.



Nota. Esquema de las dimensiones de la probeta según la normativa ASTM A370, las dimensiones están expresadas en milímetros (mm). Se observa una longitud total de 55.00 mm, una altura de

10.00 mm y un espesor de 4.00 mm. La muesca en V tiene un ángulo de 45° y un radio en la base de R0.25.

Para estimar la velocidad de impacto aplicada sobre la probeta, se ha tomado como referencia el funcionamiento del Impact Tester HSM41 de P.A. Hilton, un equipo ampliamente utilizado en ensayos de impacto de tipo Charpy en contextos académicos e industriales. Este sistema permite realizar configuraciones variables en cuanto a la masa del martillo y la altura desde la cual se libera, lo cual influye directamente en la energía cinética disponible en el momento del impacto. Si bien este proyecto no contempla la realización de ensayos experimentales, la simulación se fundamenta en parámetros reales obtenidos de dicho equipo, con el propósito de representar con mayor fidelidad las condiciones a las que estaría sometido el material en un escenario práctico.

En particular, se han considerado las condiciones de máxima energía disponible en el HSM41, correspondientes a una masa total de 4.0 kg y una altura inicial de 0.64781 metros, que equivale a un ángulo de liberación de 150° (2.618 radianes). Esta configuración representa el escenario más exigente posible dentro de las capacidades del equipo y fue seleccionada con el objetivo de simular el comportamiento del material frente a un impacto de alta intensidad, asegurando que la evaluación numérica pueda capturar adecuadamente los efectos mecánicos y estructurales que se producirían en condiciones críticas. De este modo, la simulación no solo se alinea con los principios del ensayo Charpy tradicional, sino que también proporciona una base sólida para comparar el desempeño del material compuesto frente a referencias experimentales reconocidas.

Para determinar la velocidad del martillo justo antes del impacto, se recurre al principio de conservación de la energía mecánica, considerando que la energía potencial gravitatoria en la

posición inicial se transforma completamente en energía cinética en el instante previo al contacto con la probeta, despreciando pérdidas por fricción o resistencia del aire. Esta relación se expresa mediante la Ecuación .

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- m es la masa total del martillo (4.0 kg),
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²),
- h es la altura desde la que cae el martillo (0.64781 m),
- v es la velocidad justo antes del impacto.

Despejando la velocidad, se obtiene la Ecuación :

$$v = \sqrt{2gh} \quad \text{Ecuación 4}$$

La velocidad teórica del martillo justo antes del impacto es de aproximadamente 3.56 m/s, y se ha utilizado como condición inicial en el modelo de simulación. Este valor constituye un parámetro clave dentro del análisis computacional, ya que permite representar con fidelidad el escenario de carga dinámica al que se sometería el material compuesto. A partir de esta condición, es posible evaluar su comportamiento estructural frente a un esfuerzo súbito de alta intensidad, así como estudiar los mecanismos de absorción de energía.

6. Propiedades efectivas del compuesto

La caracterización precisa de un material compuesto requiere no solo conocer las propiedades individuales de sus componentes, sino también cómo interactúan entre sí dentro de la

estructura. En este capítulo se aborda el proceso de obtención de las propiedades mecánicas efectivas del material compuesto elaborado con matriz de Onyx y reforzado con fibras continuas. Esta caracterización resulta esencial para simular su comportamiento frente a esfuerzos dinámicos como el impacto.

El material analizado presenta una estructura multicapa construida mediante manufactura aditiva, en la que se combinan regiones con distintas funciones estructurales: zonas de matriz sólida, zonas con patrón de relleno interno y capas con refuerzo continuo. Dicha complejidad hace inviable asumir una propiedad uniforme simple, por lo que se emplean métodos de homogenización que consideran las fracciones volumétricas y propiedades individuales de cada componente.

A lo largo de esta sección se describe primero la configuración estructural por capas del material, seguida por el cálculo de las fracciones volumétricas de cada región. Posteriormente, se utiliza el método de rigidez volumétrica promedio para estimar la matriz de propiedades mecánicas del compuesto ortotrópico equivalente. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, que serán utilizados como insumo en el modelado computacional del capítulo siguiente.

6.1 Distribución de capas en el material compuesto

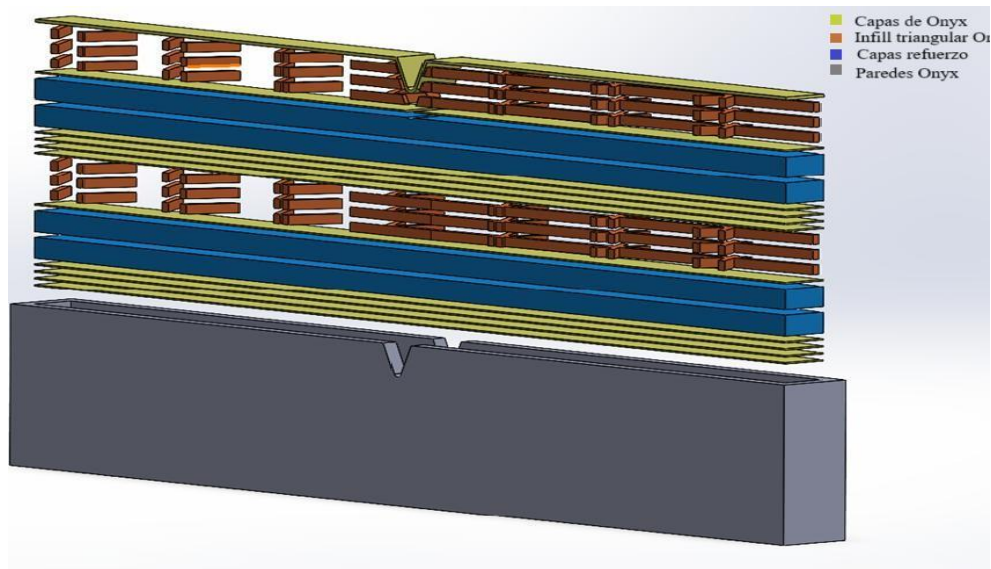
La configuración laminada utilizada en el modelo numérico corresponde a una estructura multicapa basada en el proceso de fabricación aditiva por deposición de material fundido (FDM). Esta arquitectura combina capas de Onyx con refuerzos internos de fibras continuas (Kevlar, carbono o vidrio), según el caso. En total, el modelo se compone de 100 capas distribuidas estratégicamente para reproducir de forma precisa el comportamiento mecánico ortotrópico del material y evaluar su desempeño frente a cargas de impacto.

Las primeras capas consisten en Onyx sólido con orientación alterna de $\pm 45^\circ$, seguidas por

una sección reforzada con fibras continuas dispuestas de manera isotrópica, es decir, con una distribución uniforme en múltiples direcciones para evitar una dependencia direccional en las propiedades mecánicas. A continuación, se incluye una zona de relleno triangular con Onyx, con un patrón estructural orientado en 0° , 45° y -45° , diseñado para mantener una alta rigidez específica. Esta secuencia se repite de forma simétrica a lo largo del espesor, con capas intermedias y finales también configuradas en $\pm 45^\circ$, lo que garantiza un comportamiento balanceado y mejora la estabilidad estructural del laminado ante impactos.

Figura 6

Modelo detallado y explosionado de la probeta.



Nota. Modelo explosionado de la probeta donde se puede observar la disposición de las fibras de refuerzo, matriz y capas solidas de Onyx. Elaboración propia.

La distribución detallada de materiales y orientaciones dentro del modelo simulado se organiza en función del tipo de capa y su función estructural. En total, se emplean 100 capas, segmentadas en 52 capas de refuerzo con fibras continuas, 12 capas de Onyx sólido y 36 capas de Onyx con matriz triangular. Esta configuración fue generada mediante el software Eiger, que

permite definir con precisión la ubicación y orientación de cada capa dentro del laminado. La tabla siguiente resume dicha disposición desde la base hasta la parte superior de la probeta:

Tabla 7

Distribución de capas que conforman la sección interna de la probeta.

Intervalo de capas	Material / configuración
Capas 1 al 4	Onyx sólido (orientación $\pm 45^\circ$)
Capas 5 al 30	Fibra de refuerzo (disposición isotrópica)
Capa 31	Onyx sólido ($\pm 45^\circ$)
Capas 32 al 48	Onyx con relleno triangular ($0^\circ, \pm 45^\circ$)
Capas 49 al 52	Onyx sólido ($\pm 45^\circ$)
Capas 53 al 78	Fibra de refuerzo (disposición isotrópica)
Capa 79	Onyx sólido ($\pm 45^\circ$)
Capas 80 al 98	Onyx con relleno triangular ($0^\circ, \pm 45^\circ$)
Capas 99 y 100	Onyx sólido ($\pm 45^\circ$)

Nota. Parámetros de impresión utilizados para las fibras de carbono, kevlar y vidrio en el material compuesto. Elaboración propia.

6.2. Fracciones volumétricas de los componentes

Para llevar a cabo una correcta estimación de las propiedades efectivas del compuesto, es fundamental conocer las proporciones relativas que ocupan cada uno de sus componentes en el volumen total del material. En este caso, el material impreso se compone de cuatro regiones principales: paredes perimetrales de Onyx, capas sólidas internas de Onyx, zonas de Onyx con

patrón de relleno triangular, y fibras de refuerzo continuo. (carbono, Kevlar o vidrio).

La fracción de volumen correspondiente a las fibras de refuerzo continuo se obtuvo directamente desde el software de impresión Eiger, que permite visualizar capa por capa la disposición del refuerzo y calcular su volumen en relación con el total. En este análisis se obtuvo un valor de 0,242 (24,2%).

Una vez con un valor ya establecido se procedió a calcular la fracción volumétrica de las paredes perimetrales a partir de su geometría conocida, teniendo en cuenta que cada pared tiene un espesor total de 0,8 mm y se encuentra dispuesta en los cuatro lados de la probeta a lo largo de su longitud y anchura. Considerando también la altura de 10 mm, se calculó el volumen total ocupado por estas paredes respecto al volumen total de la probeta mediante las siguientes ecuaciones obteniéndose una fracción de 0,419 (41,9%).

$$VT_{pared} = V_{capa\ pared} \cdot N_{capas\ pared} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_{capa\ pared} = A_{pared} \cdot t_{capa} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$A_{pared} = (L \cdot D) - (x \cdot y) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$x = L - 2 \cdot e_{pared} \cdot N_{paredes} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$y = D - 2 \cdot e_{pared} \cdot N_{paredes} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- VT_{pared} : Volumen efectivo de las paredes [mm^3]
- $V_{capa\ pared}$: Volumen ocupado por las paredes [mm^3]

- A_{pared} : Área transversal de las paredes de la probeta [mm^2]
- t_{capa} : Espesor de capa establecido en 0.1 [mm]
- L : Longitud de la probeta establecido en 55 [mm]
- D : Ancho de la probeta establecido en 4 [mm]
- e_{pared} : Espesor establecido en la impresión para las paredes de 0.4 [mm]
- $N_{paredes}$: Número de capas de paredes

De acuerdo con el software de impresión se estimaron 12 capas solidas de Onyx de 1mm de espesor para cada una distribuidas entre los intervalos del patrón de relleno triangular en las partes inferiores y superiores de este, por lo cual fueron estimadas en base a las siguientes ecuaciones:

$$VT_{Capas\ de\ onyx} = V_{capa\ Onyx} \cdot N_{capas\ Onyx} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$V_{Capas\ de\ onyx} = A_{capa\ Onyx} \cdot t_{capas\ Onyx} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$A_{Capas\ de\ onyx} = x \cdot y \quad \text{Ecuación 12}$$

$$x = L - 2 \cdot e_{pared} \cdot N_{paredes} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$y = D - 2 \cdot e_{pared} \cdot N_{paredes} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

- $VT_{Capas\ de\ onyx}$: Volumen efectivo de las capas solidas de Onyx [mm^3]
- $V_{Capas\ de\ onyx}$: Volumen ocupado por las capas solidas de Onyx [mm^3]
- $A_{Capas\ de\ onyx}$: Área transversal de las capas solidas de Onyx [mm^2]
- t_{capa} : Espesor de capa establecido en 0.1 [mm]
- L : Longitud de la probeta establecido en 55 [mm]
- D : Ancho de la probeta establecido en 4 [mm]

- e_{pared} : Espesor establecido en la impresión para las paredes de 0.4 [mm]
- $N_{Capas\ de\ onyx}$: Numero de capas solidas de Onyx establecido en 12.
- $N_{paredes}$: Número de capas de paredes establecido en 2.

Obteniendo como resultado una fracción volumétrica de 0,069 (6,9%) del volumen total.

Finalmente, el volumen restante, correspondiente al 27% del total, se atribuye a la región interna con patrón de relleno triangular. Esta zona celular representa el núcleo de la probeta, y aunque tiene menor densidad que las zonas sólidas, cumple un rol clave en la distribución de cargas y reducción del peso estructural.

Tabla 8

Valores fracciones volumétricas de la probeta.

Componente	Fracciones volumétricas [%]
Fibra de refuerzo	24,2
Paredes	41,9
Capas solidas de onyx	6,9
Matriz	27

Nota. Valores obtenidos para las fracciones volumétricas de cada material y parte que conforman la probeta en porcentaje. Elaboración propia

6.3 Propiedades mecánicas del onyx sólido y con infill triangular

Las propiedades mecánicas asignadas al Onyx sólido fueron tomadas directamente de literatura, en particular del estudio “Estudio a la fatiga de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de kevlar”(Meneses & Niño, 2020), donde se caracteriza este material en condiciones similares de manufactura aditiva. En dicho estudio, se reporta que el Onyx, compuesto por nylon reforzado con fibra corta de carbono, presenta una rigidez y resistencia adecuadas para ser utilizado como matriz en materiales compuestos de alto desempeño.

En el caso del Onyx con relleno triangular, las propiedades mecánicas efectivas para estos se estimaron aplicando el modelo de materiales celulares propuesto por (Gibson & Ashby, 1997) donde se modificaron las expresiones propuestas anteriormente teniendo en cuenta la forma de honeycomb triangular cuyos triángulos se consideraron equiláteros y sus dimensiones fueron estimadas anteriormente, además se consideraron isotropas, de acuerdo a esto y recordando que este modelo se basa principalmente en la densidad relativa de las celdas se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot t}{L} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- ρ_r : Se refiere a la densidad relativa en [kg/m^3]
- ρ^* : la densidad del sólido celular
- ρ_s : la densidad del material sólido
- T : Es el espesor de la célula el cual es el mismo de la boquilla de impresión
- L : Es la longitud del triángulo equilátero igual a 7,5777 [mm]

Los módulos de elasticidad se estimaron modificando las ecuaciones A.30 y A.31, obteniendo así las siguientes:

$$E_x = 1.15 \left(\frac{t}{L}\right) \cdot E_s \quad \text{Ecuación 16}$$

$$E_x = E_y \quad \text{Ecuación 17}$$

$$E_z = E_s \cdot \rho_r \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- E_x, E_y, E_z : Son los módulos de elasticidad para cada eje

- E_s : El modulo de elasticidad conocido para el Onyx de 1400 [mpa]

En el caso de los módulos de corte se tomaron las siguientes ecuaciones donde se consideró un valor inicial para el coeficiente de Poisson:

$$G = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$G_{xy} = 0.125 \cdot \rho_r \cdot E_s \quad \text{Ecuación 20}$$

$$G_{xz} = \frac{1}{2} \cdot E_s \cdot G_s \quad \text{Ecuación 21}$$

$$G_{yz} = G_{xz} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

- G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} : Son los módulos de corte para cada plano.
- ν_s : Coeficiente de Poisson conocido para el Onyx de 0.35.
- G_s : El módulo de corte del Onyx.

Para el coeficiente de Poisson se tomaron las siguientes expresiones y teniendo en cuenta la razón negativa de las deformaciones normales y paralelas en la dirección de X_1 :

$$\nu_{xy} = \frac{1}{3} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\nu_{xz} = \left(\frac{E_x}{E_z}\right) \cdot \nu_s \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\nu_{yz} = \left(\frac{E_y}{E_z}\right) \cdot \nu_s \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

- $\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$: Son los coeficientes de Poisson para el Onyx en los diferentes planos.

Las propiedades resultantes para ambas configuraciones del Onyx pueden apreciarse en la siguiente tabla.

Tabla 9

Propiedades mecánicas del onyx sólido y onyx con relleno triangular.

Propiedad	Unidad	Onyx sólido	Onyx con relleno triangular
Ex	MPa	1260	85
Ey	MPa	957,3	85
Ez	MPa	957,3	256,02
Gxy	MPa	201,5	32
Gyz	MPa	354,5	94,82
Gzx	MPa	201,5	94,82
ν_{xy}		0,315	0,333
ν_{yz}		0,2392	0,1162
ν_{zx}		0,315	0,1162
Densidad	g/cm ³	1,2	0,24

Nota. Las propiedades listadas corresponden al Onyx utilizado como matriz polimérica, considerando dos configuraciones estructurales: completamente sólido y con patrón de relleno triangular (densidad de infill del 20 %). Estas propiedades fueron utilizadas en el modelado numérico del compuesto.

6.4 Propiedades mecánicas de las fibras de refuerzo

Las propiedades mecánicas asignadas a la fibra de Kevlar fueron obtenidas de literatura, específicamente del estudio “Estudio a la fatiga de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de kevlar” (Meneses & Niño, 2020), el mismo que fue utilizado como base

para definir las propiedades del Onyx. En dicho trabajo se realiza una caracterización detallada del Kevlar como refuerzo en compuestos fabricados mediante modelado por deposición fundida, bajo condiciones experimentales y numéricas similares a las empleadas en el presente proyecto. Los datos utilizados para el modelado numérico se presentan en la Tabla 10.

Por otro lado, las propiedades mecánicas de la fibra de carbono fueron tomadas de Jaimes & Suárez (2021). Este trabajo analiza fibras de carbono continuas y reporta parámetros mecánicos relevantes empleados en simulaciones con ANSYS. Las propiedades extraídas de este estudio también se presentan en la Tabla 10.

Las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio fueron tomadas del trabajo titulado "Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3D con refuerzo de fibras", realizado por (Beltrán Guarín, 2017). En dicho estudio se reportan únicamente propiedades como el módulo de elasticidad (21 GPa), el módulo de rigidez (8,5 GPa) y el coeficiente de Poisson (0,23). Sin embargo, estas propiedades no representan el comportamiento isótropo necesario para un análisis detallado del compuesto. Por lo tanto, se recurrió al modelo numérico usado por Meneses & Niño (2020) el cual tiene en cuenta los espacios vacíos que se generan al momento de imprimir una pieza mediante deposición fundida, a estos vacíos les da el nombre de porosidad la cual ejerce una influencia significativa en la rigidez, la resistencia y la densidad mecánica del material, proponiendo así un modelo matemático basado en ecuaciones que permite determinar las propiedades elásticas de un material impreso en 3D, con la porosidad como el factor predominante por lo que consideraron propiedades isótropas para las fibras y una porosidad del 10%, se inició estableciendo las ecuaciones para los módulos de elasticidad como se observa a continuación.

$$E_x = (1 - \rho)E \quad \text{Ecuación 26}$$

$$E_y = (1 - \rho^{1/2}) \cdot E \quad \text{Ecuación 27}$$

$$E_y = E_z \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

- E_x, E_y, E_z : Son los módulos de elasticidad de la fibra para cada eje.
- E : El módulo de elasticidad conocido para la fibra de vidrio de 21 [Gpa].
- ρ : Es la porosidad del material impreso en 3D.

En el caso de los módulos de corte se estimaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$G_{xy} = G \cdot \left(\frac{(1 - \rho) \cdot (1 - \rho^{1/2})}{(1 - \rho) + (1 - \rho^{1/2})} \right) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$G_{xy} = G_{xz} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$G_{yz} = (1 - \rho^{1/2}) \cdot G \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

- G : Es el módulo de corte en base el módulo de elasticidad y Posisson.
- G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} : Son los módulos de corte para cada plano.

Por último, se establecieron los valores para los coeficientes de Poisson de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$u_{xy} = (1 - \rho) \cdot v \quad \text{Ecuación 33}$$

$$u_{xy} = u_{xz} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$v_{yz} = (1 - \rho^{1/2}) \cdot v \quad \text{Ecuación 35}$$

Los valores obtenidos por este método se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Propiedades mecánicas ortotrópicas de las fibras de refuerzo utilizadas en el compuesto.

Propiedad	Unidad	Kevlar	Carbono	Vidrio
Ex	MPa	24 873	70 000	18 900
Ey	MPa	2 344,1	2 420	14 359,2
Ez	MPa	2 344,1	2 420	14 359,2
Gxy	MPa	682,72	1 639	3 316,99
Gyz	MPa	559,03	1 908	5 837
Gzx	MPa	682,72	1 639	3 316,99
Vxy	–	0,370	0,403	0,207
Vyz	–	0,503	0,321	0,1572
Vzx	–	0,370	0,321	0,207
Densidad	g/cm ³	1,20	1,40	1,50

Nota. Las propiedades ortotrópicas mostradas corresponden a los materiales de refuerzo empleados en el modelado numérico del compuesto. Los datos del Kevlar fueron obtenidos del estudio de Meneses & Niño (2020), los datos para la fibra de carbono se extrajeron del trabajo de (Jaimes & Suárez, 2021), y los de la fibra de vidrio fueron estimados a partir de datos base de

(Beltrán Guarín, 2017) utilizando el método de porosidad.

6.5 Propiedades mecánicas efectivas del compuesto

Con los valores ya estimados se procedió a aplicarse el método de rigidez volumétrica promedio, una herramienta que permite estimar la matriz de rigidez global del laminado mediante la combinación ponderada de las propiedades elásticas de cada uno de sus componentes. A partir de dicha matriz, fue posible obtener las constantes ortotrópicas efectivas del material compuesto, incluyendo los módulos de Young, los módulos de corte y los coeficientes de Poisson en las direcciones principales.

Con las propiedades para las capas y asumiendo como material isótropo transversal, se procedió a aplicar la matriz de inversa de rigidez ($[S]$) correspondiente. Esta matriz tiene una forma particular que refleja la simetría del material, donde las propiedades son isotrópicas en un plano perpendicular a la dirección x y diferentes en la dirección perpendicular dirección x , que suele ser la dirección de la fibra o de extrusión principal. Las propiedades como los módulos elásticos (E), los módulos de corte (G) y las relaciones de Poisson (ν) se relacionan con los elementos de esta matriz. La forma general de esta matriz es como se mostró anteriormente en la ecuación A.9 sin embargo, antes de realizar el proceso de rigidez volumétrica promedio fue necesario estimar la matriz de rigidez total para todas las diferentes regiones que componen la sección transversal de la probeta, la cual se describe como la inversa de la matriz inversa de rigidez ($[C] = [S]^{-1}$).

$$[C_G] = [C_{Fibra\ de\ refuerzo}] \cdot V_{fibra\ de\ refuerzo} + [C_{Capas\ sólidas\ de\ onyx}] \cdot V_{Capas\ sólidas\ de\ onyx} + [C_{Paredes}] \cdot V_{Paredes} + [C_{infill}] \cdot V_{Infill}$$

Ecuación 36

Sin embargo, como las capas sólidas y de relleno se imprimieron con una orientación angulada con respecto al eje longitudinal de la probeta, fue necesario calcular la contribución de

estas capas al comportamiento general de la probeta, transformando sus propiedades elásticas a un sistema de coordenadas global alineado con la probeta, esto se logró utilizando una matriz de rotación ($[T]$). Por lo que la matriz de rigidez global relativa al sistema de coordenadas global se obtiene mediante una transformación que involucra la matriz de rotación y la matriz de inversa de rigidez original de la capa.

$$[T] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot C \cdot S \\ S^2 & C^2 & 0 & 0 & 0 & -2 \cdot C \cdot S \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 \\ -C \cdot S & C \cdot S & 0 & 0 & 0 & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- C : Representa al coseno del ángulo.
- S : Representa al seno del ángulo.
- $[T]$: Se refiere a la matriz de transformación.

Para facilitar y sistematizar este proceso, el modelo fue implementado mediante un código desarrollado en Python (ver Apéndice), el cual permitió integrar de forma automatizada las propiedades individuales, ensamblar las matrices correspondientes y calcular la matriz inversa de rigidez. Este procedimiento fue fundamental para representar con mayor precisión el comportamiento estructural de la probeta en el contexto del modelado numérico.

Como resultado de la integración del modelo de rigidez volumétrica promedio con las fracciones volumétricas previamente determinadas, se obtuvieron las propiedades elásticas efectivas del material compuesto. Estas constantes describen el comportamiento ortotrópico de la probeta y permiten representar su respuesta estructural de forma homogénea en los análisis computacionales. Dichos parámetros constituyen la base del modelado numérico por elementos finitos desarrollado en capítulos posteriores. La Tabla 11 resume los valores obtenidos a partir del

procedimiento de homogenización descrito.

Tabla 11

Propiedades elásticas efectivas del material compuesto según el tipo de fibra de refuerzo.

Propiedad	Kevlar	Carbono	Vidrio	Unidad
Ex	8167,63	21898,29	6363,07	MPa
Ey	1233,26	1252,24	4854,52	MPa
Ez	1269,76	1290,16	4901,60	MPa
Gxy	329,17	620,07	1130,53	MPa
Gyz	331,06	621,96	1132,41	MPa
Gzx	357,61	767,96	1963,19	MPa
vxy	0,3743	0,38	0,2238	–
vyz	0,4200	0,31	0,1668	–
vxz	0,3370	0,34	0,2174	–
Densidad	1,001	1,060	1,090	g/cm ³

Nota. Propiedades elásticas efectivas calculadas mediante el modelo de rigidez volumétrica promedio, considerando las fracciones volumétricas determinadas para la configuración multicapa de la probeta, elaboración propia.

Otro valor necesario para la simulación en los diferentes elementos que conforman la probeta, es el límite uniaxial elástico a la tracción, el cual pudo ser determinado, en el caso de los materiales compuestos, por la investigación de Pertuz et al. (2020), que realizaron mediciones de dicha propiedad mecánica para configuraciones de una matriz de Onyx con el patrón de relleno triangular al 20%, con fibras de Kevlar, carbono y vidrio como material de refuerzo, y para el Onyx sin ningún material de reforzante, el estudio de Vedrtnam et al. (2023), lo proporciona, los valores se reflejan en la Tabla 12

Tabla 12

Límite uniaxial elástico a la tracción para los materiales

Material	Límite uniaxial elástico a la tracción (MPa)
Compuesto con refuerzo de Kevlar	110
Compuesto con refuerzo de Fibra de Carbono	166
Compuesto con refuerzo de Fibra de Vidrio	122
Onyx	37

Nota. Adaptado de Pertuz et al. (2020) y Vedrtnam et al. (2023).

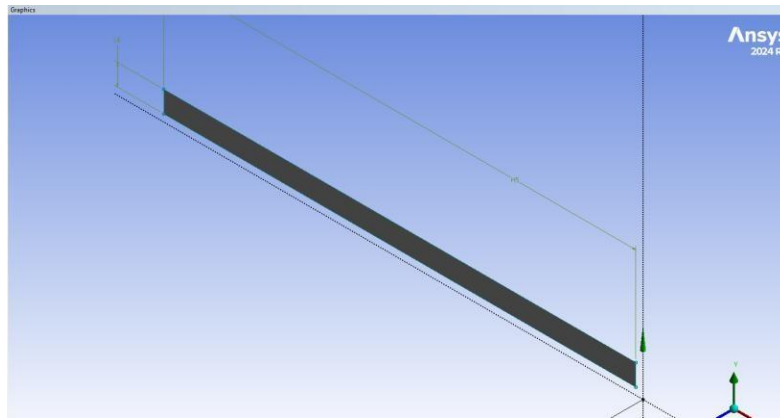
7. Modelado Computacional

7.1 Ansys Composite PrepPost

Para comprobar de forma experimental los valores obtenidos, se procedió a realizar el proceso denominado “Ansys Composite PrepPost” (ACP) en software Ansys que permite el diseño y análisis de material que es fabricado por una composición de capas, para ello como primer paso se creó en el mismo programa la capa base, con un largo de 53,4 mm y un ancho de 2,4 mm, ambos productos de restar 0,8 mm por cada extremo a las medidas originales, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Capa base del elemento interno de la probeta al que se le aplicó ACP.

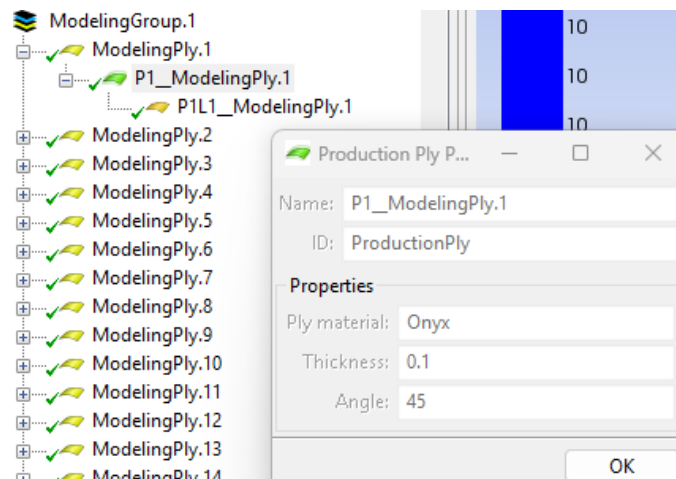


Nota. Vista en el entorno de Ansys Composite PrepPost (ACP) de la capa base del elemento interno de la probeta, con dimensiones ajustadas (53,4 mm de largo y 2,4 mm de ancho), utilizada para el diseño y análisis de laminados compuestos.

Posteriormente se modelaron las 100 capas para lograr la fabricación de la sección interna de la probeta con las diferentes capas de intercaladas para lograr la altura de 10 mm, se obtuvieron 3 resultados al variar las capas de las fibras de refuerzo, así como evidencia las siguientes figuras.

Figura 8

Creación de las 100 capas en ACP para el centro de la probeta.

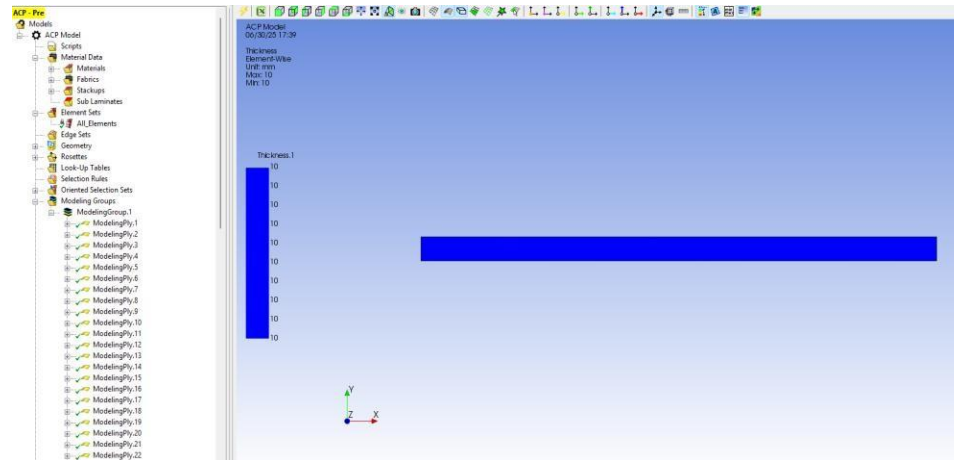


Nota. Modelado inicial de las 100 capas en ACP para la sección central de la probeta, representando la disposición secuencial de cada lámina de refuerzo para alcanzar una altura total

de 10 mm.

Figura 9

Resultado final de las 100 capas desarrolladas en ACP para el centro de la probeta.

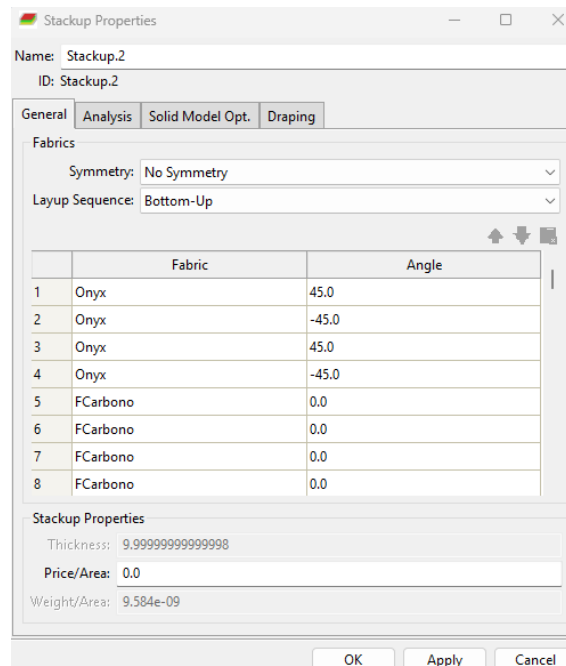


Nota. Visualización final de la sección central de la probeta con las 100 capas desarrolladas en Ansys Composite PrepPost, mostrando la estructura completa del laminado.

Luego en la sección de propiedades del material apilado se obtuvieron las matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez de los laminados, para las tres configuraciones de las distintas fibras de refuerzo, tal como se aprecia en las figuras siguientes.

Figura 10

Configuración del análisis de material apilado para el centro de la probeta



Nota. Configuración del apilamiento de materiales en ACP, especificando la orientación angular y tipo de fibra (Onyx y Fibra de carbono) en cada capa para el análisis estructural del laminado.

Figura 11

Matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez para la configuración con fibra de carbono

i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	34876	3685.5	-1.776...	6256.5	655.25	0.86756	0	0
1	3685.5	12173	-1.776...	655.25	2169.9	0.86756	0	0
2	-1.954...	-1.954...	11556	0.86756	0.86756	2072.4	0	0
3	6256.5	655.25	0.86756	29937	3201.7	-0.33196	0	0
4	655.25	2169.9	0.86756	3201.7	10503	-0.33196	0	0
5	0.86756	0.86756	2072.4	-0.33196	-0.33196	9928.8	0	0
6	0	0	0	0	0	0	4383.5	0
7	0	0	0	0	0	0	0	11559

i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	3.338e-05	-1.012...	2.5594...	-2.094...	6.4121...	-8.185...	0	0
1	-1.012...	9.5423...	9.3387...	6.4118...	-5.920...	-2.997...	0	0
2	2.5594...	9.3387...	9.7484...	-8.176...	-2.996...	-6.104...	0	0
3	-2.094...	6.4118...	-8.176...	3.8912...	-1.187...	3.8807...	0	0
4	6.4121...	-5.920...	-2.996...	-1.187...	0.0001...	1.4148...	0	0
5	-8.185...	-2.997...	-6.104...	3.8807...	1.4148...	0.0001...	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0.0002...	0
7	0	0	0	0	0	0	0	8.6509...

Nota. Matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez obtenidas para la configuración del laminado con fibra de carbono, evidenciando la respuesta estructural del modelo en ANSYS.

Por medio de estas matrices se pudieron calcular nuevamente las propiedades de los materiales compuestos apilados en el centro de la probeta obteniendo los resultados presentes en la Tabla 13.

Tabla 13

Propiedades del material compuesto con los diferentes materiales de refuerzo obtenidas por ACP

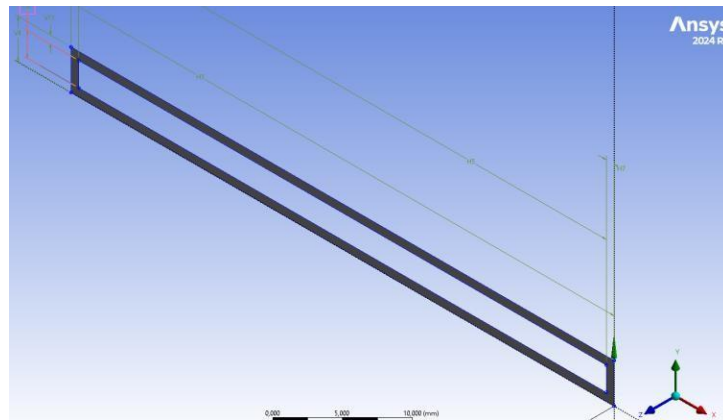
Propiedad	Material compuesto con refuerzo de		
	Kevlar	Fibra de Carbono	Fibra de Vidrio
Densidad (kg/m ³)	854,40	958,40	1010,40
Módulo de Young en dirección X (MPa)	11.595,00	29.957,92	8.853,70
Módulo de Young en dirección Y (MPa)	1.241,64	10.479,62	6.765,93
Módulo de Young en dirección Z (MPa)	384,02	10.258,11	1.599,64
Relación de Poisson XY	0,388	0,303	0,214
Relación de Poisson YZ	-0,002	0,000	-0,001
Relación de Poisson XZ	-0,002	0,000	-0,001
Módulo de corte XY (MPa)	422,51	11.559,49	1.792,33
Módulo de corte YZ (MPa)	362,58	8.813,73	1.402,32
Módulo de corte XZ (MPa)	358,19	4.383,49	3.102,73

Nota. Propiedades mecánicas del material compuesto con refuerzo de Kevlar, fibra de carbono y fibra de vidrio, obtenidas mediante el módulo ACP en ANSYS.

De forma análoga en el ACP también se realizó la simulación de la fabricación del borde externo de la probeta, cuyas dimensiones eran 55 mm de largo, 4 mm de ancho y un espesor de 0,8 mm por lado. Esto generó nuevos valores en las propiedades del Onyx solido a ser aplicado en la simulación y que se pueden apreciar en la Tabla 14.

Figura 12

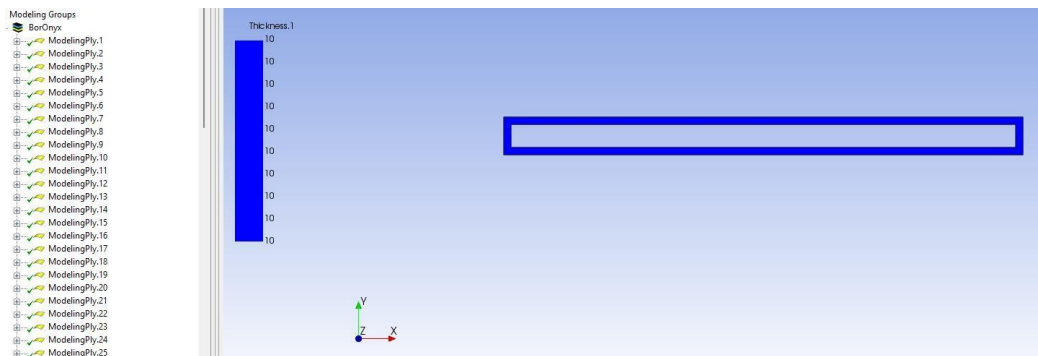
Capa base del borde de la probeta a la que se aplicó ACP



Nota. Vista en el entorno de Ansys Composite PrepPost (ACP) de la capa base borde externo de la probeta, con dimensiones ajustadas (55 mm de largo, mm de ancho y un espesor de 0,8 mm por lado), utilizada para el diseño y análisis de laminados compuestos.

Figura 13

Resultado final de las 100 capas desarrolladas en ACP para el borde de la probeta.



Nota. Visualización final de la sección exterior de la probeta con las 100 capas desarrolladas en Ansys Composite PrepPost, mostrando la estructura completa del laminado.

Figura 14

Matrices normalizadas de rigidez e inversa de rigidez para el borde de la probeta.

	i	0	1	2	3	4	5	6	7
Stiffness Matrix:	0	964.09	561.09	2.3093...	1.6814...	1.0357...	0.81845	0	0
	1	561.09	964.09	2.3093...	1.0357...	1.6814...	0.81845	0	0
	2	2.1316...	2.1316...	436.45	0.81845	0.81845	8.3446...	0	0
	3	1.6814...	1.0357...	0.81845	964.09	561.09	-1.705...	0	0
	4	1.0357...	1.6814...	0.81845	561.09	964.09	-1.705...	0	0
	5	0.81845	0.81845	8.3446...	-1.023...	-1.023...	436.45	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	278	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	278
Compliance Matrix:	i	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0.0015685	-0.000...	1.0154...	-7.716...	4.2119...	-3.688...	0	0
	1	-0.000...	0.0015685	1.0154...	4.2119...	-7.716...	-3.688...	0	0
	2	1.0421...	1.0421...	0.0022912	-3.688...	-3.688...	-1.314...	0	0
	3	-7.716...	4.2119...	-3.688...	0.0015685	-0.000...	1.6185...	0	0
	4	4.2119...	-7.716...	-3.688...	-0.000...	0.0015685	1.6185...	0	0
	5	-3.688...	-3.688...	-1.314...	1.5161...	1.5161...	0.0022912	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0.0035971	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0.0035971	

Nota. Matrices normalizadas de rigidez y su inversa obtenida para la configuración del laminado con Onyx, evidenciando la respuesta estructural del modelo en Ansys.

Tabla 14

Propiedades del Onyx sólido de acuerdo con la simulación ACP.

Propiedad	Onyx sólido
Densidad (kg/m ³)	1.200
Módulo de Young en dirección X (MPa)	637,54
Módulo de Young en dirección Y (MPa)	637,54
Módulo de Young en dirección Z (MPa)	436,45
Relación de Poisson XY	0,582
Relación de Poisson YZ	0,000
Relación de Poisson XZ	0,000
Módulo de corte XY (MPa)	278,00
Módulo de corte YZ (MPa)	436,45
Módulo de corte XZ (MPa)	278,00

Nota. Propiedades mecánicas del material para la parte exterior de la probeta de Onyx, obtenidas mediante el módulo ACP en Ansys

7.2 Construcción de la Geometría

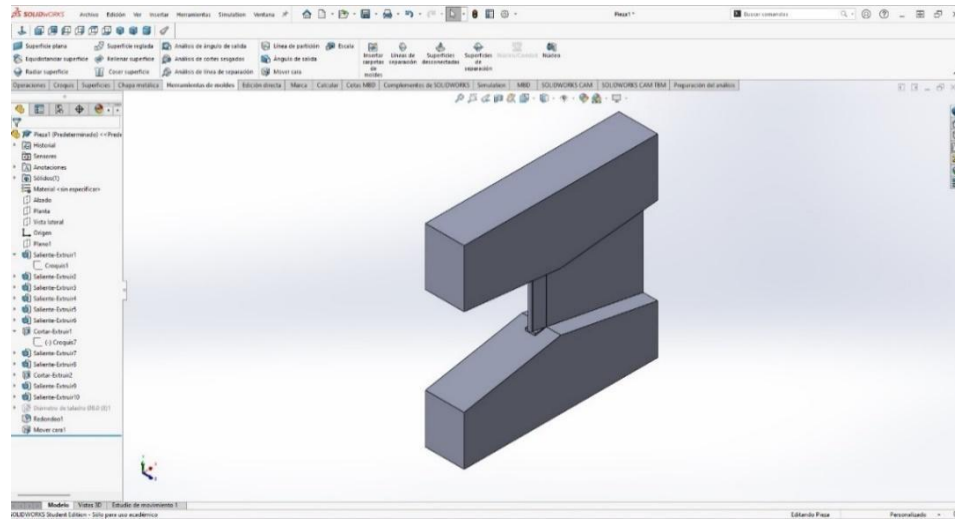
Para poder llevar a cabo la simulación del ensayo de impacto Charpy, en primer lugar se requirió recrear los tres principales elementos involucrados: el ensamblaje de la cabeza del martillo, los soportes donde se coloca la pieza para realizar el experimento, y probeta en sí, las medidas de los dos primeros elementos, están basadas en los datos suministrados por la ficha técnica del Pendulum Impact Tester HSM41 (P.A. Hilton, 2018), y para las medidas de la probeta de las norma sobre el ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy, método de ensayo (UNE-EN ISO, 2017).

Se diseñaron dos tipos de probetas, ambas con las mismas dimensiones establecidas. La primera es una probeta sólida, destinada a realizar la simulación con las propiedades obtenidas mediante el análisis matemático. La segunda probeta fue dividida en dos secciones: una sección central y una sección externa, con el objetivo de replicar el diseño desarrollado en el análisis de elementos finitos (ACP). Esta última se utilizará para realizar simulaciones con las propiedades obtenidas a través de dicho análisis.

Se realizaron las piezas por medio del software CAD, SolidWorks, teniendo en la Figura 15, la cabeza del martillo, en la Figura 16 para la primera probeta, en la Figura 17 la segunda probeta (usada para ACP) y para la Figura 18, el ensamble completo.

Figura 15

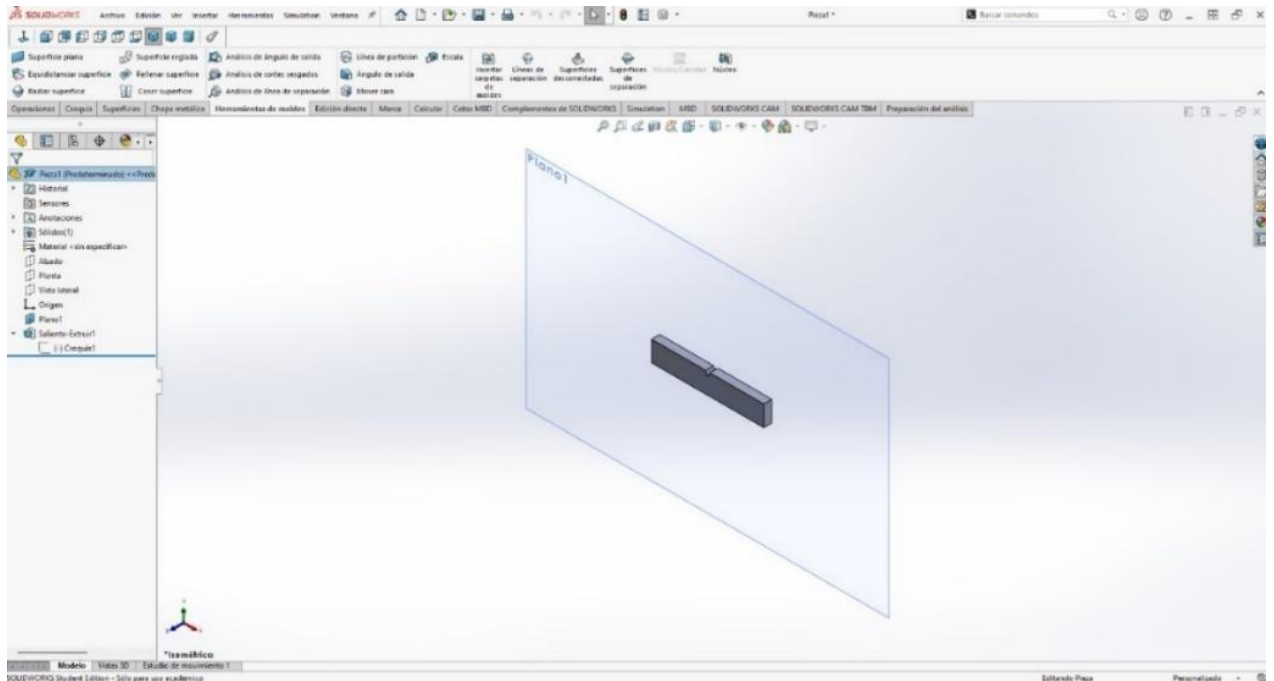
Cabeza del martillo en SolidWorks.



Nota. Modelo 3D de la cabeza del martillo utilizada en el ensayo de impacto Charpy, diseñado en SolidWorks.

Figura 16

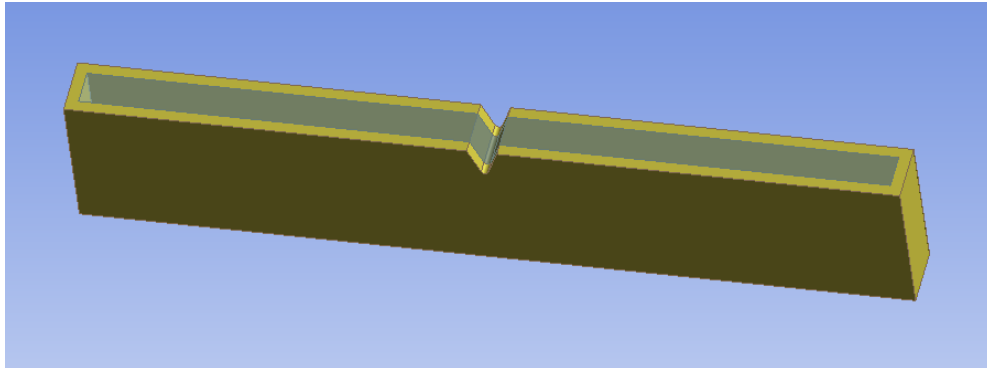
Probeta 1 en SolidWorks.



Nota. Probeta sólida para simulaciones con propiedades calculadas mediante el modelo matemático.

Figura 17

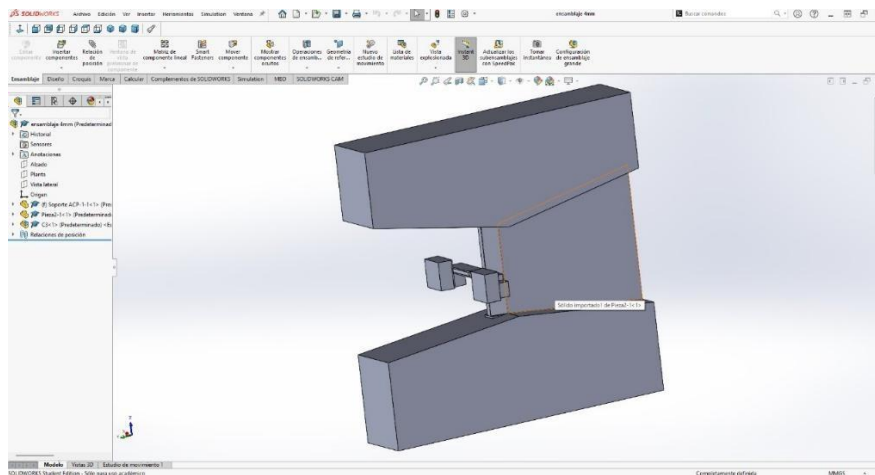
Probeta 2 en SolidWorks (ACP).



Nota. Detalle de la probeta dividida en dos secciones: una sección central y una externa, replicando el diseño basado en el análisis de elementos finitos (ACP).

Figura 18

Ensamblaje completo en SolidWorks.



Nota. Muestra el ensamblaje completo del sistema, que incluye la cabeza del martillo, los soportes y la probeta, modelado en CAD para simular el ensayo de impacto Charpy.

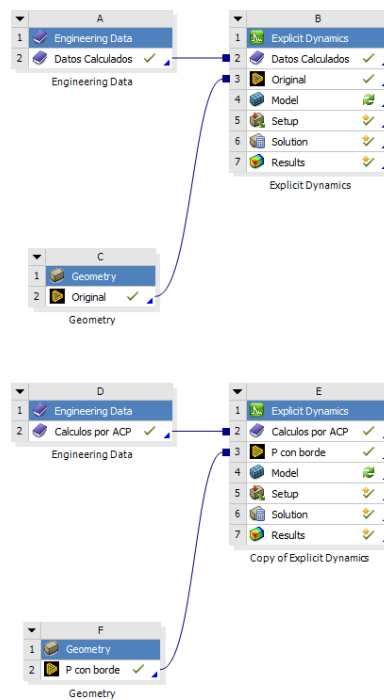
7.3 Análisis de dinámica explícita

Con todos los datos obtenidos, se procedió a realizar un análisis de dinámica explícita en

el software ANSYS, donde se pudo recrear el impacto de la cabeza de martillo a la probeta sostenida por los dos soportes tanto para los materiales calculados, como para los determinados por el proceso ACP, y para este proceso se comenzó colocando las propiedades de todos los materiales que componen las diferentes piezas (ver Figura 20 y Figura 21)

Figura 19

Análisis de dinámica explícita aplicado a dos configuraciones diferentes.



Nota. Modelo completo de simulación del impacto en ANSYS, que incluye la cabeza del martillo, la probeta y los dos soportes. Se representa la configuración utilizada para el análisis de dinámica explícita bajo condiciones del ensayo Charpy.

Figura 20

Inserción de las propiedades de los materiales calculadas en el ANSYS.

Outline of Schematic A2, B2: Datos Calculados		
A		
1	Contents of Datos Calculados	
2	Material	
3	PCarbono	
4	PFVidrio	
5	PKevlar	
6	Steel AISI 1030	
*	Click here to add a new material	

Properties of Outline Row 3: PCarbono		
A	B	C
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1060	kg m ⁻³
Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	64700	MPa
Young's Modulus Y direction	22400	MPa
Young's Modulus Z direction	22400	MPa
Poisson's Ratio XY	0,3	
Poisson's Ratio YZ	0,4	
Poisson's Ratio XZ	0,3	
Shear Modulus XY	22100	MPa
Shear Modulus YZ	8300	MPa
Shear Modulus XZ	22100	MPa
Tensile Yield Strength	166	MPa

Nota. Asignación de propiedades de material en ANSYS para los componentes del sistema de impacto, correspondientes a los materiales calculados previamente.

Figura 21

Inserción de las propiedades de los materiales determinadas por ACP en el ANSYS.

Outline of Schematic D2, E2: Cálculos por ACP		
A		
1	Contents of Cálculos por ACP	
2	Material	
3	CCFCarbono	
4	CCFVidrio	
5	CCKevlar	
6	Onyx	
7	Steel AISI 1030	
*	Click here to add a new material	

Properties of Outline Row 6: Onyx		
A	B	C
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1200	kg m ⁻³
Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	637,54	MPa
Young's Modulus Y direction	637,54	MPa
Young's Modulus Z direction	436,45	MPa
Poisson's Ratio XY	0,582	
Poisson's Ratio YZ	0	
Poisson's Ratio XZ	0	
Shear Modulus XY	278	MPa
Shear Modulus YZ	436,45	MPa
Shear Modulus XZ	278	MPa
Tensile Yield Strength	37	MPa

Nota. Configuración de las propiedades de material en ANSYS para los componentes definidos, utilizadas en el análisis de dinámica explícita.

En la Tabla 15 se presentan algunas propiedades mecánicas del acero AISI 1030, material

utilizado en la construcción de la cabeza del martillo y los soportes. Es importante destacar que, para no aumentar las dimensiones del martillo y evitar un mayor consumo de capacidad de cómputo durante la simulación, se ajustó el valor de la densidad del material con el fin de lograr un peso total de 4 kg. Este ajuste permitió mantener las especificaciones de peso requeridas sin comprometer el rendimiento y la eficiencia en el proceso de simulación.

Tabla 15

Propiedades del Acero AISI 1030.

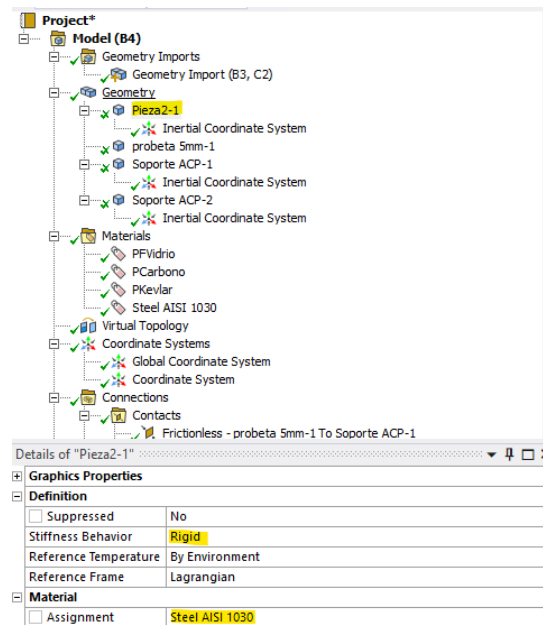
Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	3.708,9
Módulo de Young (GPa)	210
Relación de Poisson	0,3
Módulo de corte (GPa)	80,77
Límite Elástico de Tracción (MPa)	370
Resistencia a la Rotura por Tracción (MPa)	585

Nota. Propiedades mecánicas del acero AISI 1030 utilizadas en la simulación. La densidad fue ajustada para obtener un peso total de 4 kg en la cabeza del martillo, manteniendo el equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

Una vez incorporadas las propiedades de los materiales, se procedió a importar las geometrías realizadas y también al proceso de configuración del análisis de dinámica explícita, lo que implicó la asignación del material a cada elemento de el ensamblaje, siendo el acero AISI 1030, para el martillo (denominado pieza 2-1), y los soportes, lo cuales se establecieron como rígidos (ver Figura 22), mientras que la probeta se estableció flexible y se le asignó alguno de los materiales compuestos con fibras de refuerzo (Figura 23).

Figura 22

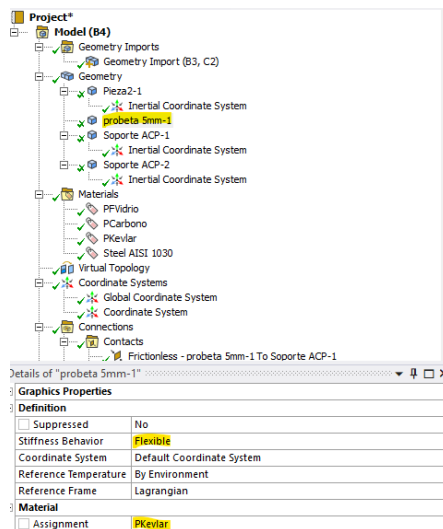
Asignación de material al martillo.



Nota. Asignación de materiales en ANSYS para las piezas del ensamblaje: acero AISI 1030 para el martillo (pieza 2-1) y materiales rígidos para los soportes, como parte de la configuración del análisis de dinámica explícita.

Figura 23

Asignación de material a la probeta.



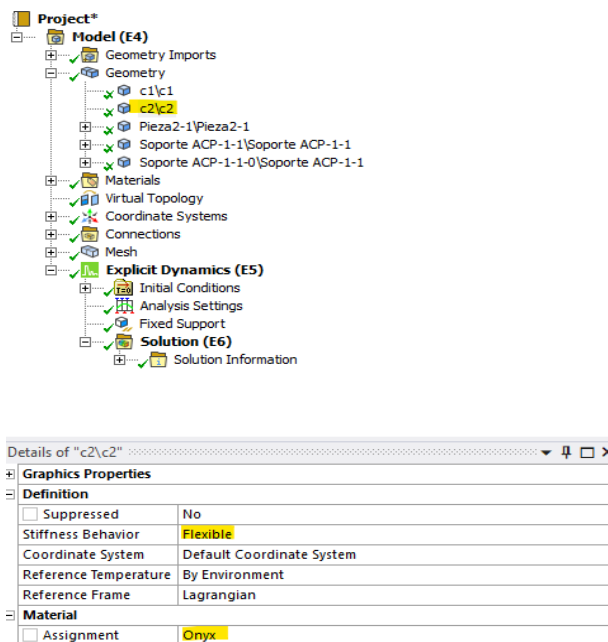
Nota. Configuración de la probeta como cuerpo flexible en ANSYS, con la asignación de uno de

los materiales compuestos con fibras de refuerzo, en el contexto del análisis de impacto Charpy.

Para la simulación realizada con los resultados obtenidos por el proceso ACP, se incluye en la probeta dos elementos, el primero, el interno o central, se le asigna las características del material compuesto con las fibras de refuerzo, y el externo se le asigna las características del material Onyx, como se ve en la Figura 24.

Figura 24

Asignación de material al borde de la probeta por ACP.



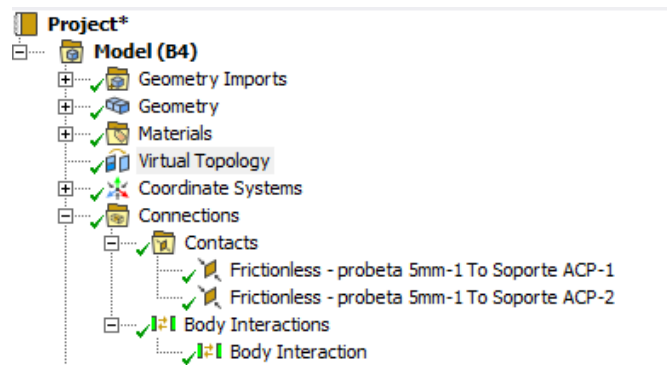
Nota. Configuración de la probeta en ANSYS con doble composición para la simulación basada en resultados del proceso ACP. El núcleo interno se asignó con propiedades del material compuesto reforzado, mientras que la capa externa corresponde al material Onyx.

Luego se debe indicar que los contactos entre los cuerpos fueron asignados como sin fricción, ver Figura 25 y Figura 26 de acuerdo con el análisis aplicado. La decisión de emplear contacto sin fricción en las simulaciones de impacto de ANSYS se fundamenta en la naturaleza de los fenómenos físicos dominantes y los objetivos del análisis. Esta simplificación es válida

principalmente en escenarios donde el interés se centra en las fuerzas normales y la deformación global del material, en lugar de las interacciones tangenciales detalladas. Para impactos de corta duración, donde los resultados están dominados por la inercia, el beneficio marginal de incluir la fricción podría verse superado por el aumento en los recursos computacionales y el tiempo de solución, lo que convierte el contacto sin fricción en un compromiso práctico desde el punto de vista de la ingeniería. Además, la fricción puede introducir desafíos de estabilidad numérica, por lo que, en casos de impacto rápido, evitar estos problemas mediante el uso de contacto sin fricción se convierte en un incentivo importante

Figura 25

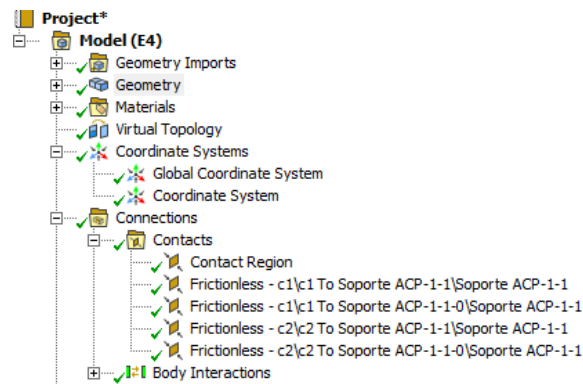
Asignación del tipo de contacto en primer análisis dinámico.



Nota. Asignación de contacto sin fricción entre los componentes del ensamblaje en ANSYS. Esta configuración se emplea para representar adecuadamente el comportamiento dinámico en simulaciones de impacto de corta duración.

Figura 26

Asignación del tipo de contacto en segundo análisis dinámico.



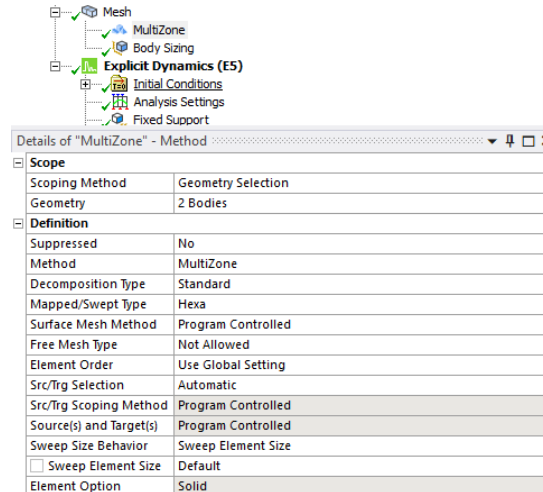
Nota. Visualización del contacto sin fricción definido entre la cabeza del martillo y la probeta en el entorno de simulación de ANSYS. La ausencia de fricción permite una solución más estable y eficiente en términos computacionales.

7.4 Mallado

Para el mallado en general, se utilizó un tamaño de elemento del orden de 3 mm para todos los cuerpos. Sin embargo, para la probeta, se emplearon tres métodos distintos: el multizona, el tamaño del cuerpo y la esfera de influencia. En el método multizona, el tipo de barrido mapeado es del tipo Hexa, y el tamaño del elemento de barrido es el valor predeterminado (Figura 27). En el segundo método, se utilizó body sizing, una técnica de mallado en ANSYS que permite definir un tamaño específico para los elementos de la malla de un cuerpo. Esto ayuda a mejorar la calidad del mallado en áreas de interés, como las zonas de alta deformación o esfuerzo. En este caso, los tamaños de los elementos varían entre 1 mm, 0,75 mm y 0,5 mm (Ver Figura 28). Finalmente, en el método de la esfera de influencia, los tamaños de los elementos son de 0,75 mm, 0,5 mm y 0,25 mm, con el centro de la esfera ubicado en el sistema de coordenadas dispuesto específicamente para este fin, coincidiendo con el punto de la muesca de la probeta, la esfera posee un radio de 5 mm (Ver Figura 29). Este mallado se aplicó en ambos análisis para todas las configuraciones de acuerdo con el tipo de fibra de refuerzo.

Figura 27

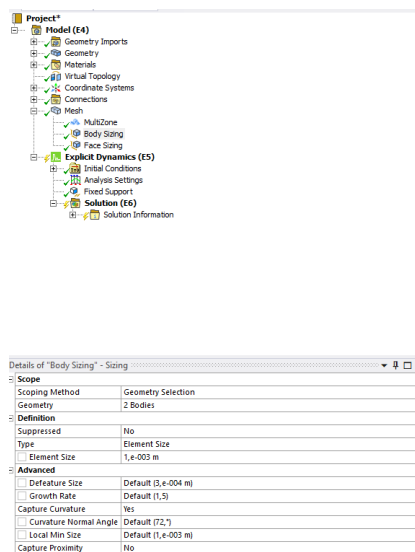
Mallado multizona.



Nota. Mallado multizona de la probeta en ANSYS con elementos hexaédricos y tamaño predeterminado mediante barrido mapeado.

Figura 28

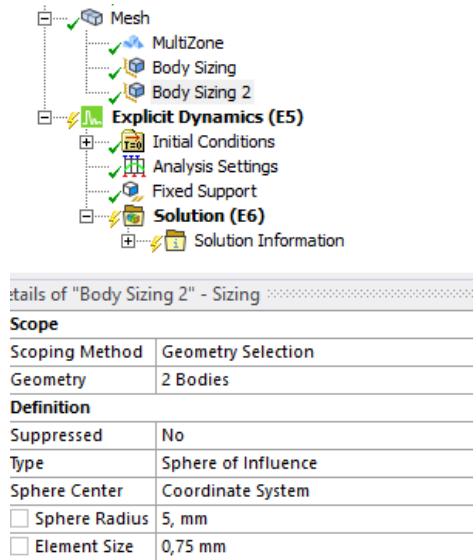
Mallado por tamaño del cuerpo.



Nota. Mallado por body sizing aplicado a la probeta, con tamaños de elemento de 1 mm, 0,75 mm y 0,5 mm en zonas críticas.

Figura 29

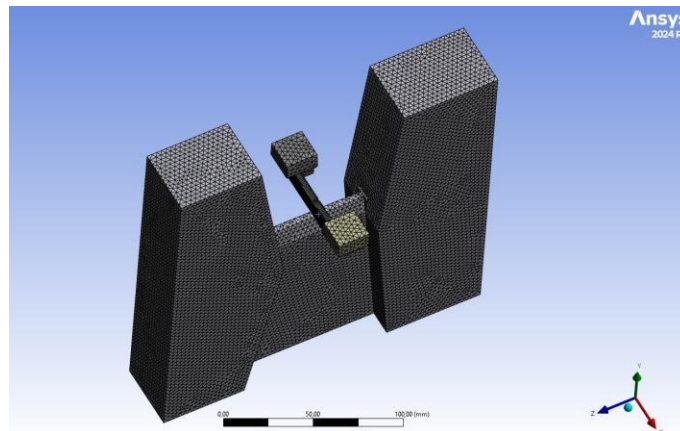
Mallado por esfera de influencia.



Nota. Mallado con esfera de influencia centrada en la muesca de la probeta, usando elementos de 0,75 mm, 0,5 mm y 0,25 mm en un radio de 5 mm.

Figura 30

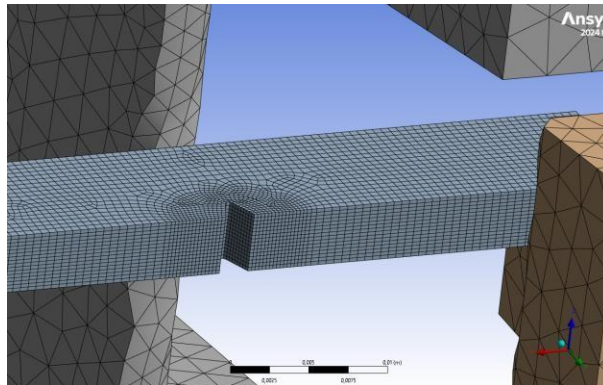
Mallado en todo el ensamble.



Nota. Mallado general aplicado a todo el ensamblaje del sistema de impacto en ANSYS.

Figura 31

Detalle del mallado en la probeta.



Nota. Detalle del mallado de la probeta con refinamiento en la zona de impacto.

El mallado del conjunto de probeta y péndulo fue definido con un tamaño global de elemento de 3 mm y refinamientos locales de hasta 0,5 mm en la zona de la entalla y el punto de impacto. Esta decisión se sustentó en el criterio de sensibilidad a concentraciones de esfuerzo en zonas críticas, particularmente alrededor de la entalla, donde se espera la iniciación de la fractura. Además, se consideraron las limitaciones de tiempo de cómputo derivadas del uso de elementos sólidos de tipo SOLID186, los cuales incrementan exponencialmente el número de grados de libertad con mallados más finos. De acuerdo con recomendaciones de convergencia de malla para simulaciones de impacto en compuestos (ANSYS, 2025), un refinamiento local inferior al 1 mm en la entalla asegura la captura de gradientes de tensión sin incurrir en sobrecostos computacionales.

Figura 32

Calidad del mallado.

Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Display	
<input checked="" type="checkbox"/> Defaults	
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors and Warnings
<input type="checkbox"/> Target Element Quality	Default (0,2)
<input type="checkbox"/> Target Characteristic Length (LS-DYNA)	Default (0,3 mm)
<input type="checkbox"/> Target Aspect Ratio (Explicit)	Default (5,)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,4838e-010
<input type="checkbox"/> Max	0,89087
<input type="checkbox"/> Average	0,20501
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11556

Nota. Métricas de calidad del mallado en ANSYS según la asimetría de los elementos

Los valores de calidad de mallado presentados en la **Figura 32**, indican una malla con características aceptables para análisis dinámico explícito. La métrica de asimetría utilizada evalúa la desviación de los elementos respecto a su forma ideal, donde valores cercanos a cero representan elementos de mejor calidad geométrica.

El valor mínimo de asimetría de $1,4838e-10$ señala la presencia de elementos prácticamente perfectos en la discretización, lo cual es típico en regiones con geometría regular o donde el algoritmo de mallado ha logrado una distribución óptima de nodos. El valor máximo de $0,89087$ indica la presencia de elementos con deformación geométrica, aproximándose al límite superior recomendado para análisis explícitos. Aunque este valor está por debajo del umbral crítico de $0,95$, representa elementos con distorsión que, localizados en su mayoría en las secciones periféricas del martillo, que no entran en contacto con la probeta.

La media de $0,20501$ sugiere que la mayoría de los elementos mantienen una calidad aceptable, situándose por encima del objetivo por defecto de $0,2$, por lo que el mallado global cumple con los estándares mínimos establecidos para el análisis, aunque existe margen para

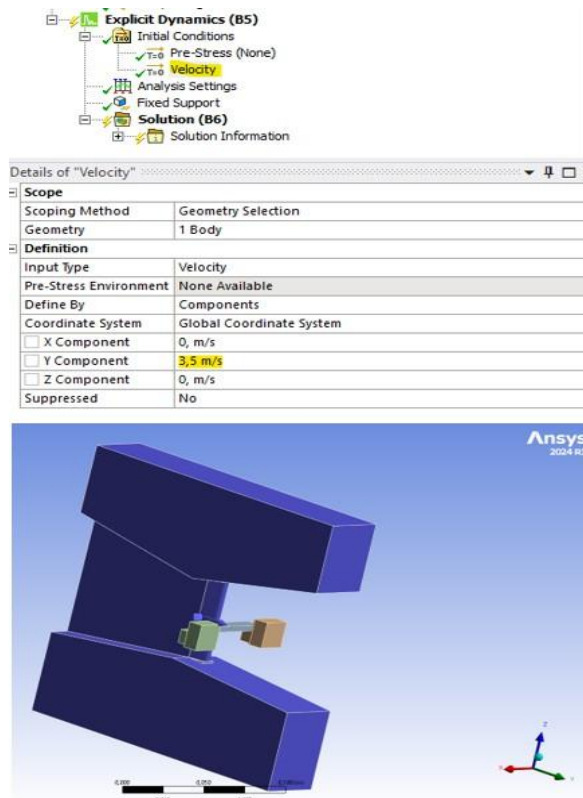
optimización. Así también, la desviación estándar de 0,11556 revela una distribución relativamente uniforme de la calidad de elementos, sin variaciones extremas que comprometan la estabilidad numérica.

7.5 Elementos del Análisis dinámico

Para establecer los elementos del análisis dinámico, se comenzó determinando la velocidad con que golpea el martillo la probeta, la cual de acuerdo con Díaz-Rodríguez et al. (2023), es aproximadamente 3,5 m/s, aplicada linealmente en el componente y del sistema de coordenadas establecido como se puede observar en la Figura 33.

Figura 33

Velocidad de trabajo.

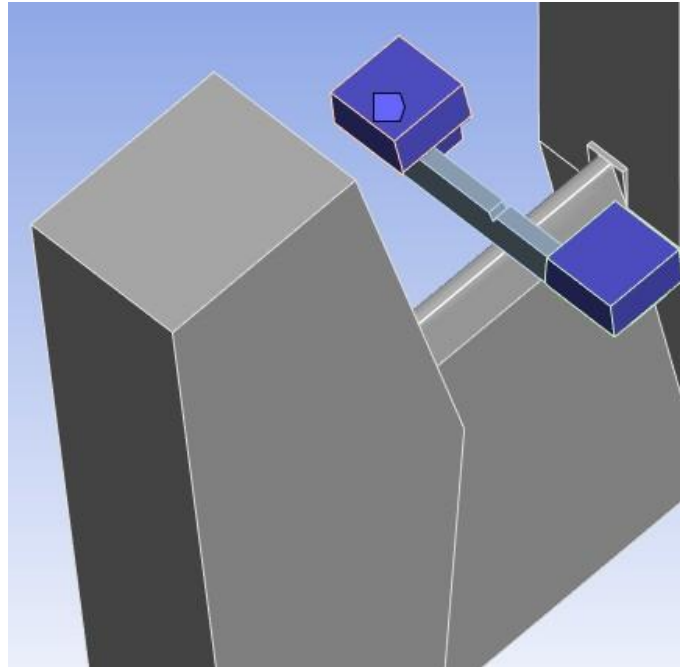


Nota. Aplicación de la velocidad inicial de 3,5 m/s en la dirección Y al martillo,

Luego se definió los soportes a los cuerpos del ensamble desarrollados para tal fin, como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Soportes fijos del análisis.



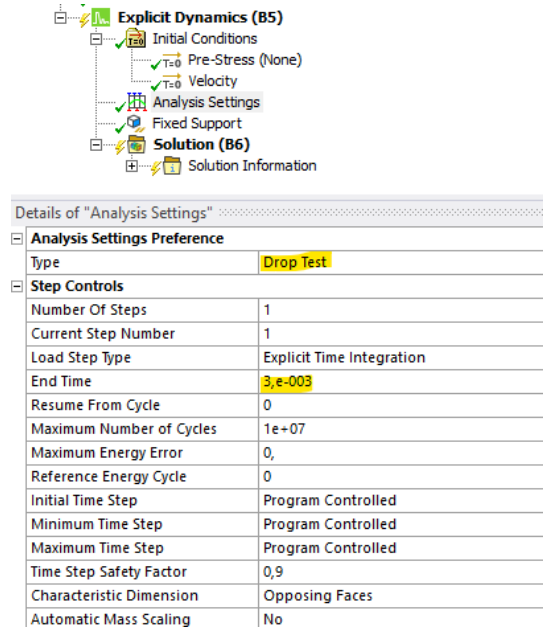
Nota. Definición de los soportes fijos aplicados al ensamblaje para el análisis de impacto en ANSYS.

Dentro de los ajustes de análisis dinámico, se estableció que el tipo de análisis es el denominado como prueba de caídas, con un tiempo de análisis igual a 0,003 segundos, tal como se muestra en la Figura 35.

Finalmente se estableció conocer la energía interna aplicada a la probeta, en la solución del análisis (Figura 36)

Figura 35

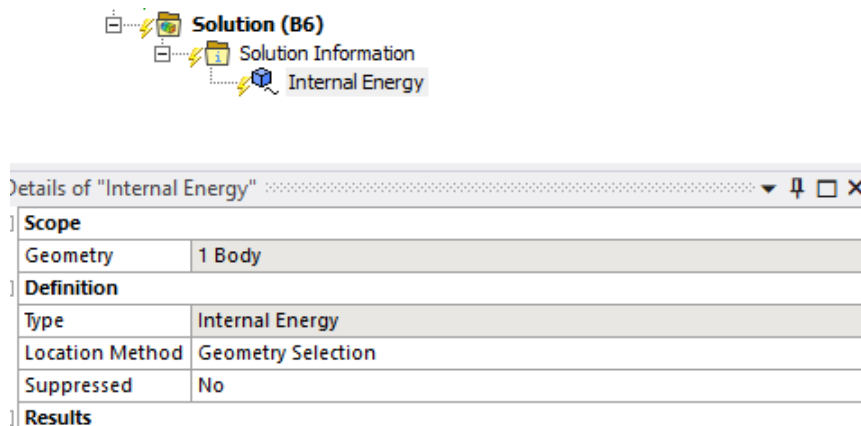
Tipo y tiempo para el análisis dinámico.



Nota. Configuración del análisis dinámico tipo “prueba de caídas” con un tiempo de simulación de 0,003 segundos

Figura 36

Tipo de solución requerida.



Nota. Visualización de la energía interna absorbida por la probeta durante el impacto, obtenida en la solución del análisis.

8. Validación de Resultados

Los resultados se presentan diferenciados primero en los dos tipos de análisis realizados, luego por los mallados realizados, y por los tipos de fibras de refuerzo aplicadas. En la Tabla 16 vemos los valores concernientes al mallado en las tres interacciones realizadas.

Tabla 16

Valores para los mallados en las diferentes iteraciones

Mallado	1era iteración	2da iteración	3era iteración
Tamaño del cuerpo	1 mm	0,75 mm	0,5 mm
Esfera de influencia	0,75 mm	0,5 mm	0,25 mm
Numero de nodos	70.644	76.414	107.885
Número de elementos	354.086	359.012	387.684

Nota. Valores obtenidos del mallado en las tres iteraciones realizadas para el análisis dinámico.

En la Tabla 17 se tienen los valores de energía obtenidos para los diferentes tipos de fibras de refuerzo, en las tres iteraciones, para el caso del análisis dinámico realizado con los valores calculados.

Tabla 17

Valores de energía para las iteraciones con valores calculados

Fibra de refuerzo	Energía para 1era iteración	Energía para 2da iteración	Energía para 3era iteración
Kevlar	11,776 J	10,173 J	9,283 J
Carbono	24,008 J	23,871 J	23,697 J
Vidrio	22,14 J	21,842 J	21,26 J

Nota. Energía interna absorbida por la probeta con diferentes tipos de fibras de refuerzo, en tres iteraciones, usando los valores calculados.

Los resultados de la Tabla 17 muestran una tendencia decreciente en la energía absorbida a medida que el mallado se refina. Esta observación es consistente con la expectativa de que un mallado más fino permite una representación más precisa de la deformación y la disipación de energía, lo que puede llevar a una estimación más conservadora de la energía absorbida una vez que se alcanza la convergencia. La energía absorbida por las probetas reforzadas con Kevlar disminuye de 11.776 J en la primera iteración a 9.283 J en la tercera, lo que sugiere que el modelo se está volviendo más preciso en la captura de los mecanismos de absorción de energía a medida que la discretización mejora.

Para una comprensión más detallada de la absorción de energía, se puede observar en el Apéndice B, donde se presentan las gráficas de energía interna de las probetas para cada configuración estudiada. Estas gráficas visualizan la evolución de la energía interna a lo largo del tiempo, permitiendo identificar los mecanismos de deformación y absorción de energía predominantes en cada caso. Por ejemplo, las Figuras B.1 y B.2 ilustran claramente cómo la energía se disipa en las probetas reforzadas con fibra de Kevlar, mostrando las zonas de mayor concentración de energía.

En la Tabla 18 se puede apreciar el error relativo entre los valores obtenidos las iteraciones, lo que indica una convergencia con valores menores al 10%, siguiendo una disminución de los valores en todos los casos.

Tabla 18

Grado de convergencia entre iteraciones con valores calculados

Iteración	Kevlar	Error relativo	Carbono	Error relativo	Vidrio	Error relativo
1	11,776 J	-	24,008 J	-	22,14 J	-
2	10,173 J	15,76%	23,871 J	0,57%	21,842 J	1,36%
3	9,283 J	9,59%	23,697 J	0,73%	21,26 J	2,74%

Nota. Error relativo entre las iteraciones del análisis con valores calculados, mostrando convergencia con variaciones menores al 10 %.

En la Tabla 19 se presentan los valores de energía obtenidos para los diferentes tipos de fibras de refuerzo, en las tres iteraciones, para el caso del análisis dinámico realizado con los valores obtenidos por el método del ACP.

Tabla 19

Valores de energía para las iteraciones con valores de ACP

Fibra de refuerzo	Energía para 1era iteración	Energía para 2da iteración	Energía para 3era iteración
Kevlar	5,0689 J	3,7113 J	5,4601 J
Carbono	8,2724 J	10,2 J	11,586 J
Vidrio	4,5948 J	6,3385 J	4,0672 J

Nota. Energía interna absorbida por la probeta con diferentes fibras de refuerzo, obtenida mediante valores derivados del método ACP

En la Tabla 20 se evidencia el error relativo entre los valores obtenidos las iteraciones, pero en este caso la convergencia no se logra, pues los cambios entre los valores de energía obtenidos son más abruptos, y tanto para el Kevlar como para el Vidrio los valores fluctúan, al aumentar para luego disminuir, mientras que con el carbono aumenta.

Tabla 20

Grado de convergencia entre iteraciones con valores de ACP

Iteración	Kevlar	Error relativo	Carbono	Error relativo	Vidrio	Error relativo
1	5,0689	-	8,2724	-	4,5948	-
2	3,7113	36,58%	10,2	18,90%	6,3385	27,51%
3	5,4601	32,03%	11,586	11,96%	4,0672	55,84%

Nota. Error relativo entre las iteraciones del análisis con valores del método ACP, sin evidencia de convergencia clara.

El umbral del 10% se eligió porque el ensayo Charpy es altamente sensible a heterogeneidades (Jang et al., 2008). Un error mayor introduciría incertidumbre en la energía absorbida, clave para evaluar tenacidad. La convergencia lograda con propiedades calculadas (Tabla 18) confirma que el modelo captura adecuadamente la disipación de energía, mientras que el ACP, al exceder el umbral, genera predicciones no físicas (ej. energía negativa en Poisson, Tabla 13). Esto refuerza la necesidad de validar modelos compuestos con datos experimentales antes de simulaciones dinámicas.

Por los valores obtenidos, se infiere que el método más congruente, es el que implicó el uso de las propiedades mecánicas obtenidas mediante las matrices, ahora se compara los valores obtenidos con los resultados para el ensayo de Charpy para las mismas condiciones aplicados por Díaz-Rodríguez et al. (2023), en la Tabla 21, donde la energía absorbida por la probeta para cada material se calculó multiplicando la tenacidad del material (expresada en kJ/m²) por el área transversal de la probeta (4 mm x 10 mm, convertida a metros cuadrados). Para la fibra de vidrio, con una tenacidad de 460.7 kJ/m², la energía absorbida resultante es de 18,42 J. En el caso del Kevlar, que posee una tenacidad de 236.2 kJ/m², la energía absorbida es de 9,45 J. Finalmente, para el carbono, cuya tenacidad es de 40.9 kJ/m², la energía absorbida es de 1,64 J. Estos cálculos

demuestran cómo la tenacidad intrínseca de cada material, en combinación con las dimensiones de la probeta, determina la cantidad de energía que puede ser absorbida antes de la fractura.

Tabla 21

Comparación entre valores encontrados y valores esperados

Fibra de refuerzo	Por simulación	Esperados	Error relativo
Kevlar	9,283 J	9,45 J	1,80%
Carbono	23,697 J	1,64 J	93,08%
Vidrio	21,26 J	18,42 J	13,36%

Nota. Comparación de los valores simulados con los resultados experimentales del ensayo Charpy, reportados por Díaz-Rodríguez et al. (2023).

Las diferencias entre los resultados simulados y los esperados en la Tabla 21 (1.80% para Kevlar, 93.08% para fibra de carbono, 13.36% para fibra de vidrio) se deben principalmente a las propiedades mecánicas limitadas utilizadas en la simulación: módulo de Young, módulo de cizallamiento y límite elástico a la tracción. Estas propiedades describen el comportamiento elástico y el inicio del fallo en tracción estática, pero no capturan la tenacidad a la fractura ni los mecanismos de fallo bajo impacto, como los requeridos en el ensayo Charpy, especialmente para materiales frágiles como la fibra de carbono.

El bajo error para Kevlar (9.283 J vs. 9.45 J) indica que sus propiedades elásticas y de tracción (110 MPa) reflejan bien su alta tenacidad, permitiendo una buena aproximación en la simulación. En contraste, la fibra de carbono, con un alto módulo de Young (64,700 MPa), lleva a sobreestimar la energía absorbida (23.697 J vs. 1.64 J) debido a su fragilidad, ya que el modelo no considera su baja tenacidad a la fractura, lo que causa fallos rápidos por fractura quebradiza.

La fibra de vidrio, con un error moderado (21.26 J vs. 18.42 J), tiene una tenacidad intermedia, pero la simulación sobreestima su resistencia al no modelar mecanismos de fallo como

delaminación o rotura de fibras. La homogeneización del compuesto como un material efectivo ignora interacciones entre capas, lo que afecta la precisión, especialmente para materiales con comportamiento anisotrópico complejo.

Las propiedades calculadas (Tabla 18) mostraron mejor convergencia (errores <10%) que las de ACP (Tabla 20), sugiriendo mayor fiabilidad para el ensayo Charpy. Para mejorar la precisión, se deben incluir propiedades de fractura y modelos de daño progresivo, especialmente para fibra de carbono, y realizar ensayos experimentales para validar los resultados.

En el caso particular de la fibra de carbono, sus valores de rigidez son superiores a los de las otras fibras consideradas, pero su comportamiento es frágil, con baja elongación a la rotura y escasa capacidad de disipación de energía. Esto contrasta con el comportamiento de materiales como el Kevlar, que, aunque presenta módulos más bajos, posee una mayor capacidad de deformación y de absorción de energía durante el impacto, lo que se refleja en mejores resultados experimentales de tenacidad. La simulación, al no incorporar modelos de daño progresivo ni criterios de fractura, tiende a sobreestimar la energía absorbida en materiales más rígidos como la fibra de carbono.

9. Conclusiones

Este trabajo se centró en evaluar el comportamiento al impacto de los materiales compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas, utilizando modelado numérico. Para validar los resultados obtenidos, se compararon con los de un estudio previo que incluyó pruebas experimentales. La comparación con los resultados experimentales existentes permitió corroborar la efectividad de los métodos y enfoques utilizados. A continuación, se presentan las conclusiones

más importantes.

Los resultados de la simulación, particularmente aquellos obtenidos mediante el método de propiedades calculadas, la energía absorbida por el compuesto reforzado con fibra de carbono fue de 23.697 J en la tercera iteración, mientras que para el Kevlar fue de 9.283 J y para el vidrio de 21.26 J (Tabla 17). Estos valores, especialmente en el caso del Kevlar, se acercan notablemente a los resultados esperados experimentalmente (9.45 J para Kevlar), con un error relativo bajo del 1.80% (Tabla 21). Esto subraya la eficacia del Kevlar en la disipación de energía, a pesar de que la fibra de carbono, siendo más rígida, absorbe una mayor cantidad de energía en la simulación, aunque con una sobreestimación significativa respecto a los valores experimentales debido a su fragilidad inherente.

Se compararon dos metodologías para determinar las propiedades mecánicas efectivas: una basada en modelos analíticos y otra que emplea el módulo ANSYS Composite PrepPost (ACP). Los resultados de la validación revelaron que el método de propiedades calculadas (basado en modelos analíticos) mostró una mejor convergencia con los datos experimentales, con errores relativos consistentemente por debajo del 10% para la mayoría de los materiales (Tabla 18). En contraste, el método ACP presentó fluctuaciones más abruptas y errores relativos significativamente mayores, superando el umbral del 10% en varios casos (Tabla 20), lo que sugiere una menor fiabilidad para la predicción del comportamiento al impacto en este contexto. Esta diferencia se atribuye a la capacidad del modelo analítico para capturar de manera más adecuada la disipación de energía en el ensayo Charpy, mientras que el ACP, al no integrar completamente los criterios de daño progresivo y fractura, generó predicciones menos precisas, especialmente para materiales con comportamiento complejo.

Una limitación crucial identificada en el modelado numérico con ANSYS Workbench

Explicit Dynamics es su incapacidad para simular fenómenos críticos como la delaminación y la ruptura del material. Esta deficiencia es particularmente evidente en el caso de la fibra de carbono, un material con alta rigidez, pero baja tenacidad a la fractura. La simulación sobreestimó drásticamente la energía absorbida por la fibra de carbono (23.697 J simulados frente a 1.64 J esperados, con un error del 93.08% en la Tabla 21), lo que se explica por la falta de consideración de su comportamiento frágil y los mecanismos de fallo rápido. Aunque el modelo es útil para predecir el comportamiento general, la ausencia de modelos de daño progresivo y criterios de fractura limita su precisión en la representación de la falla real del material. Para la fibra de vidrio, con una tenacidad intermedia, la simulación también sobreestimó la resistencia (21.26 J simulados frente a 18.42 J esperados, con un error del 13.36% en la Tabla 21). Estos hallazgos subrayan la necesidad de incorporar modelos de fractura y daño progresivo más sofisticados en futuras simulaciones para mejorar la precisión predictiva, especialmente para materiales con comportamientos anisotrópicos complejos.

Se identificó que la configuración geométrica, el patrón de relleno y la orientación de las fibras son factores determinantes en la modulación de las propiedades mecánicas del compuesto. La disposición isotrópica de las fibras, junto con un patrón de relleno triangular al 20% de densidad, contribuye a una distribución uniforme de las cargas y a una mayor estabilidad estructural. La capacidad de estos materiales para soportar cargas multidireccionales, gracias a la orientación controlada de las fibras, es una evidencia de la versatilidad y el potencial de diseño que ofrecen los compuestos reforzados con fibra continua en la fabricación aditiva, sin embargo el comportamiento ortotrópico del material refuerza la necesidad de considerar cuidadosamente estos aspectos en el diseño de componentes, ya que las propiedades mecánicas varían significativamente

dependiendo de la orientación de las fibras.

10. Trabajos Futuros

En este estudio, se ha logrado un análisis numérico detallado de la resistencia al impacto de materiales compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas, sin embargo, se han identificado varias limitaciones que deben ser abordadas en investigaciones futuras. Uno de los principales problemas es que los modelos existentes en la literatura y las herramientas de simulación, como ANSYS Workbench, están diseñados principalmente para materiales isotrópicos, mientras que los materiales utilizados en este estudio son ortotrópicos debido a la disposición y refuerzo de fibras continuas. Además, el hecho de que estos materiales sean fabricados mediante impresión 3D agrega una capa de complejidad, ya que las propiedades mecánicas pueden verse influenciadas por factores como la orientación de las fibras y la geometría de las piezas impresas. Dado que estos materiales son relativamente nuevos y poco estudiados, especialmente en lo que respecta a sus criterios de falla, se necesitan más investigaciones para desarrollar modelos adecuados que puedan predecir con precisión su comportamiento bajo cargas extremas. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para abordar estas limitaciones y avanzar en la investigación de los materiales compuestos ortotrópicos impresos en 3D.

10.1 Incorporación y Modelado de Falla en Materiales Ortotrópicos

Una de las principales limitaciones de este estudio fue la imposibilidad de incluir modelos avanzados de delaminación y ruptura en ANSYS Workbench, especialmente para materiales ortotrópicos como los compuestos de PA6 reforzados con fibras continuas. Esto resultó en la

incapacidad de visualizar la fractura en las simulaciones, lo que impidió obtener una representación precisa del comportamiento de los materiales bajo cargas extremas.

Se recomienda integrar modelos de falla avanzados, específicamente adaptados para simular la propagación de grietas y la delaminación, fenómenos comunes en los compuestos reforzados con fibras. La implementación de estos modelos avanzados no solo mejorará la fiabilidad de los resultados, sino que también proporcionará una evaluación más realista del comportamiento de los materiales bajo cargas extremas.

10.2 Exploración de otros softwares de simulación especializados

Dado que ANSYS Workbench Explicit Dynamics es una herramienta robusta, pero presenta limitaciones al modelar materiales ortotrópicos y fenómenos complejos de falla en materiales compuestos, se recomienda explorar otros programas de simulación que puedan ser más adecuados para estos casos, como ABAQUS o LS-DYNA. Estos softwares ofrecen herramientas especializadas para simular fenómenos como la delaminación, la fractura y los efectos anisotrópicos, lo que podría permitir obtener simulaciones más precisas y realistas. Comparar los resultados obtenidos en ANSYS con los de estos programas permitirá validar los modelos y mejorar la capacidad predictiva del análisis numérico, proporcionando una mayor comprensión del comportamiento de los materiales ortotrópicos bajo cargas extremas.

10.3 Desarrollo de un modelo multiescala para simular la falla de materiales compuestos

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos, especialmente aquellos impresos en 3D, es complejo y puede variar significativamente en función de la microestructura,

la orientación de las fibras y otros factores. Se recomienda el desarrollo de un modelo multiescala, que combine simulaciones a nivel microscópico y macroscópico para obtener una representación más precisa del comportamiento de los materiales compuestos bajo cargas de impacto. Este enfoque integrador permitirá capturar los efectos de la microestructura (como la interacción entre las fibras y la matriz) y las propiedades globales del material, mejorando la precisión de las simulaciones de falla.

Referencias Bibliográficas

Acuña Jaimes, F. A., & Hernández Suarez, L. M. (2021). *Diseño, simulación y fabricación en manufactura aditiva de un mosquetón de seguridad tipo hms reforzado con fibra de carbono empleando análisis por elementos finitos.*

<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/41931>

Addcomposites. (2021). *Continuous Carbon Fiber for High-Strength Applications.*

<https://www.addcomposites.com/post/continuous-carbon-fiber-for-high-strength-applications>

ANSYS. (2025). *Chapter 10: Meshing Features.*

https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/wb_sim/ds_Mesh.html

Arias, C. C., & Ruíz, E. E. (2019). *Modelación por el Método de Elementos Finitos (MEF), mediante el Software ANSYS del elemento placa.*

<https://repository.udistrital.edu.co/items/f03d9005-3608-4a25-8152-5c94fb56ab77>

Barbero, E. J. (2018). *Introduction to composite materials design* (Third edition). CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business.

Beltrán Guarín, S. (2017). *Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3D con refuerzo de fibras* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/items/d2b069f6-9177-4268-9b6c-6b11be52348c>

Caballero Encinas, S. (2020). *Caracterización y simulación del comportamiento ante impacto de*

- estructuras compuestas tipo sándwich. propuesta metodológica para un caso real: Pala de pádel* [Bachelor thesis]. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/19492>
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
https://www.google.com.co/books/edition/Materials_Science_and_Engineering/8ymtMwEACAAJ?hl=es
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93-103.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>
- Díaz-Rodríguez, J. G., Pertuz-Comas, A. D., & Bohórquez-Becerra, O. R. (2023). Impact Strength for 3D-Printed PA6 Polymer Composites under Temperature Changes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5), Article 5.
<https://doi.org/10.3390/jmmp7050178>
- Díaz-Rodríguez, J. G., Pertúz-Comas, A. D., & González-Estrada, O. A. (2021). Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites. *Composites Part B: Engineering*, 211, 108657.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108657>
- Gasca, A. F. (2022). *Diseño de patrones combinados de relleno en impresión 3D para la fabricación de elementos automotrices*. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/3826>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Hughes, S. E. (2009). Chapter 6—Non—Destructive and Destructive Testing. En S. E. Hughes

- (Ed.), *A Quick Guide to Welding and Weld Inspection* (pp. 67-87). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-641-2.50006-4>
- International Organization for Standardization & ASTM International. (2021). *International Organization for Standardization & ASTM International. (2021). ISO/ASTM 52900:2021 – Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary.*
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- Ivey, M., Carey, J. P., & Ayranci, C. (2017). Ply mechanics for braided composite materials. En *Handbook of Advances in Braided Composite Materials* (pp. 259-306). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100369-5.00007-6>
- Jang, Y. C., Hong, J. K., Park, J. H., Kim, D. W., & Lee, Y. (2008). Effects of notch position of the Charpy impact specimen on the failure behavior in heat affected zone. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1), 419-424.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.272>
- Jones, R. M. (2018). *Mechanics Of Composite Materials* (2.^a ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781498711067>
- Kaware, K., & Kotambkar, M. (2022). Low velocity impact response and influence of parameters to improve the damage resistance of composite structures/materials: A critical review. *International Journal of Crashworthiness*, 27(4), 1232-1256.
<https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1914985>
- Liu, J., Naeem, M. A., Al Kouzbary, M., Al Kouzbary, H., Shasmin, H. N., Arifin, N., Abd Razak, N. A., & Abu Osman, N. A. (2023). Effect of Infill Parameters on the Compressive Strength of 3D-Printed Nylon-Based Material. *Polymers*, 15(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/polym15020255>

Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M.

(2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges.

Materials & Design, 183, 108137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>

Markforged. (s. f.-a). *Ajustes de impresión 3D que afectan a la resistencia de las piezas*.

Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://markforged.com/es/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>

Markforged. (s. f.-b). *Tecnologías y tipos de impresoras 3D*. Tecnologías y tipos de impresoras

3D. Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>

Melenka, G. W., Cheung, B. K. O., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016).

Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*, 153, 866-875.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>

Mena, J. L. (2007). *Estudio del efecto del escalamiento dimensional en materiales compuestos termoplásticos: Laminados no-simétricos y balanceados*.

<http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1040>

Meneses, O. J., & Niño, N. Y. (2020). *Estudio a la fatiga de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de kevlar bajo ensayos por flexión alternativa*.

<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/40283>

Mexpolimeros. (s. f.). *PA 6 Poliamidas*. Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos.

Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.mexpolimeros.com/etp/pa6.html>

Montesino Loza, A. F., & Rubio Nieto, J. D. (2022). *Absorción de energía generada por cargas*

- de impacto en estructuras celulares funcionalmente graduadas mediante elementos finitos*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/9848>
- PA Hilton. (2018). *PENDULUM IMPACT TESTER*. <https://www.p-a-hilton.co.uk/products/strength-materials-hsm/pendulum-impact-tester-25j>
- Pérez, M. J. (2023). *Kevlar® ¿Qué es y por qué es tan resistente? | Oroel*. <https://oroel.com/ayuda-y-consejos/kevlar-por-que-es-tan-resistente/>
- Pertuz, A. D., Díaz-Cardona, S., & González-Estrada, O. A. (2020). Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique. *International Journal of Fatigue*, *130*, 105275. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105275>
- Pertuz-Comas, A. D., Díaz, J. G., Meneses-Duran, O. J., Niño-Álvarez, N. Y., & León-Becerra, J. (2022). Flexural Fatigue in a Polymer Matrix Composite Material Reinforced with Continuous Kevlar Fibers Fabricated by Additive Manufacturing. *Polymers*, *14*(17), 3586. <https://doi.org/10.3390/polym14173586>
- Pett, A. (2022). *What is Explicit Dynamics?* <https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. En *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 1-12). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- SemcoCAD. (s. f.). Software de Simulación Ansys SemcoCAD. *SemcoCAD*. Recuperado 12 de junio de 2025, de <https://www.semco.com.pe/ansys/>
- Stewart, J. (2024). Investigación de Patrones de relleno y efectos geométricos sobre el

- rendimiento compresivo de estructuras de hormigón fabricado aditivamente. *Tesis y Disertaciones de Grado*. <https://scholarworks.uark.edu/etd/5599>
- Tinoco, A. (2013). *Algoritmo para calcular esfuerzos y criterios de falla de Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hashim y Hashim-Rotem en agujeros circulares en laminados de fibra de vidrio /*. <https://hdl.handle.net/20.500.12585/2619>
- Torres Enk, J. E. (2006). *Caracterización de materiales compuestos mediante el método de diseño de experimentos*. <http://hdl.handle.net/10784/4456>
- UNE-EN ISO. (2017). *Materiales metálicos. Ensayo de flexión ...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058225>
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2017). *Ensayo de impacto (Versión 01)*. *Laboratorio de Resistencia de Materiales*. <https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/storage/mecanica-inventarios/June2023/xlPmkuu9lK5xwIBzHEVP.pdf>
- Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2018). Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures. En V. V. Vasiliev & E. V. Morozov (Eds.), *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures* (pp. xvii-xxv). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102209-2.00022-0>
- Vaško, M., Sága, M., Majko, J., Vaško, A., & Handrik, M. (2020). Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing. *Materials*, *13*(24), 5654. <https://doi.org/10.3390/ma13245654>
- Vedrtnam, A., Ghabezi, P., Gunwant, D., Jiang, Y., Sam-Daliri, O., Harrison, N., Goggins, J., & Finnegan, W. (2023). Mechanical performance of 3D-printed continuous fibre Onyx composites for drone applications: An experimental and numerical analysis. *Composites*

Part C: Open Access, 12, 100418. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100418>

Zhao, S., Zhao, Z., Yang, Z., Ke, L., Kitipornchai, S., & Yang, J. (2020). Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review. *Engineering Structures*, 210, 110339. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110339>

Zohdi, N., & Yang, R. (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, 13(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/polym13193368>