

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería MYDCI



**“Evaluación de materiales compuestos avanzados en impresión
3D para el diseño mecánico y prototipado en la industria de
manufactura”**

Tesis

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta

José Manuel Sámano Ruiz

Director:

Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez

Co-director:

Dra. Mariela Domínguez Osuna

Mexicali, Baja California, enero de 2026.

ÍNDICE

RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.3 HIPÓTESIS	14
1.4 JUSTIFICACIÓN	15
1.5 OBJETIVOS	20
1.5.1 Objetivo general	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
1.6 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	21
1.6.1 Alcance	21
1.6.2 Limitaciones	22
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	24
2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	24
2.2 ANTECEDENTES NACIONALES	26
2.2.1 Evolución e hitos clave.....	26
2.2.2 Sectores líderes en adopción.....	26
2.2.3 Colaboración industria-academia	27
2.2.4 Desafíos y oportunidades	27
2.2.5 Tendencias recientes	30
2.3 ANTECEDENTES REGIONALES Y LOCALES.....	32
2.3.1 Infraestructura y actores clave.....	32
2.3.2 Coboración industria-academia	33
2.3.3 Oportunidades y casos de éxito	35
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	37
3.1 FUNDAMENTOS DE LA IMPRESIÓN 3D	37
3.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D	38
3.3 MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D	40
3.3.1 Polímeros convencionales.....	40
3.3.2 Filamentos compuestos	41
3.4 HERRAMIENTAS DE DISEÑO 3D	43
3.4.1 Software de diseño mecánico	43

3.4.2	Importancia del software en el prototipado	44
3.5	PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS	45
3.6	PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS PARA IMPRESIÓN 3D	47
3.7	APLICACIONES INDUSTRIALES DE MATERIALES AVANZADOS EN IMPRESIÓN 3D	49
3.7.1	Polímeros convencionales	49
3.7.2	Filamentos compuestos	49
3.7.3	Aplicaciones reales	50
3.8	ESTUDIOS PREVIOS SOBRE FILAMENTOS DE FIBRA DE CARBONO Y FIBRA DE VIDRIO	51
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS		53
4.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS	53
4.1.1	Filamento de Fibra de Carbono	53
4.1.2	Filamento de Fibra de Vidrio al 10%	54
4.1.3	Filamento de Fibra de Vidrio al 25%	56
4.1.4	Filamento de Fibra de Vidrio con Policarbonato	58
4.2	EQUIPOS Y CONDICIONES DE IMPRESIÓN	60
4.2.1	Impresora 3D utilizada: Modelo y Características	61
4.2.2	Software de diseño utilizado	64
4.2.3	Software para generación de código de impresión	65
4.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS PARA PRUEBAS	66
4.3.1	Preparación de muestras preliminares	66
4.3.2	Preparación y análisis de cortes para caracterización de fibras	67
4.3.3	Selección de las normas de ensayo	70
4.3.4	Diseño y fabricación de probetas según la norma ISO 527-4	71
4.4	Modelado 3D y preparación para impresión	72
4.4.1	Primera metodología de fabricación (FASE 1): Impresión directa con parámetros iniciales	72
4.4.1.1	Resultados preliminares	73
4.4.2	Segunda metodología de fabricación (FASE 2): Corte CNC de tabletas impresas	74
4.5	MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS MECÁNICOS	76
4.5.1	Ensayos de resistencia a la tracción	76
4.5.2	Análisis termogravimétrico (TGA)	78

4.6	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	78
4.6.1	Preparación de muestras.....	79
4.6.2	Verificación y etiquetado.....	80
4.6.3	Ensayo de tracción.....	80
4.6.4	Documentación y registro.....	80
CAPÍTULO 5. RESULTADOS		84
5.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS.....	84
5.1.1	Fase 1: Probetas con 4 paredes.....	84
5.1.1.1	Tabla de resultados Fase 1.....	87
5.1.2	Fase 2: Probetas con 100% relleno (3 temperaturas por material) ...	89
5.1.2.1	Tabla de resultados Fase 2.....	98
5.2	COMPARACIÓN ENTRE MATERIALES.....	100
5.2.1	Comparación general entre materiales.....	101
5.2.2	Comparación por temperaturas entre materiales.....	103
5.3	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA DE VIDRIO.....	106
5.4	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FILAMENTO DE POLICARBONATO CON FIBRA DE VIDRIO.....	110
5.5	OBSERVACIONES SOBRE LA CALIDAD DE IMPRESIÓN Y ACABADO.....	111
5.5.1	Comparación de las condiciones de impresión: Ender 3 vs. K1C ...	111
5.5.1.1	Defectos de Fase 1: Ender 3.....	112
5.6	CARACTERIZACIÓN TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA).....	113
5.6.1	Contenido del refuerzo determinado por TGA.....	117
5.6.1.1	PETG con fibra de carbono.....	118
5.6.1.2	ABS con fibra de vidrio al 10%.....	118
5.6.1.3	Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%.....	119
5.6.1.4	Policarbonato con fibra de vidrio.....	120
5.6.2	Estabilidad térmica de los materiales evaluados.....	121
5.6.2.1	PETG con fibra de carbono.....	121
5.6.2.2	ABS con fibra de vidrio al 10%.....	122
5.6.2.3	Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%.....	123
5.6.2.4	Policarbonato con fibra de vidrio.....	124
5.6.3	Efecto del proceso de extrusión en la composición.....	125
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....		128

6.1	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	128
6.1.1	Impacto de la metodología de fabricación (Fase 1 vs. Fase 2).....	128
6.1.2	Efecto del porcentaje de fibra de vidrio en pruebas mecánicas (10% vs. 25%)	130
6.1.3	Comportamiento del filamento de fibra de vidrio con policarbonato	132
6.1.4	Influencia de la temperatura de impresión.....	134
6.1.5	Variabilidad y reproducibilidad de los resultados.....	136
6.2	IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPADO	137
6.3	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	138
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		140
REFERENCIAS.....		146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Impresiones rectangulares para corte transversal	67
Figura 2 Imagen SEM del corte transversal de PETG con fibra de carbono	68
Figura 3 Imagen SEM del corte transversal de ABS con fibra de vidrio al 10%.68	
Figura 4 Imagen SEM del corte transversal de ABS con fibra de vidrio al 25%.69	
Figura 5 Imagen SEM del corte transversal de policarbonato con fibra de vidrio	70
Figura 6 Geometría y dimensiones de la probeta tipo 1 según ISO 527-4.....	71
Figura 7 Geometría de diseño de probeta de acuerdo ISO 527-4, probeta tipo 1B	72
Figura 8 Modelo CAD.....	72
Figura 9 Probeta en impresión directa con paredes laterales.	73
Figura 10 Modelo CAD en tinkercad	74
Figura 11 Tableta base	74
Figura 12 Probetas cortadas después de CNC.....	76
Figura 13 Mordazas de 500 N y 50 KN respectivamente.....	77
Figura 14 Montaje de la probeta en la máquina Shimadzu AGS-X series en PIMS Mitsubishi.	77
Figura 15 Fibra de carbono a 245 °C, fibra de vidrio al 10%, al 25% y fibra de vidrio con policarbonato a 255 °C respectivamente.....	81
Figura 16 PETG con fibra de carbono (240 °C, 250 °C, 260 °C)	81
Figura 17 Fibra de vidrio al 10% (Temperatura de: 250 °C, 260 °C, 270 °C).....	82
Figura 18 Fibra de vidrio al 25% (Temperatura de: 250 °C, 260 °C, 270 °C).....	82
Figura 19 Fibra de vidrio con policarbonato (Temperatura de: 260 °C, 270 °C, 280 °C).....	82
Figura 20 Gráfica de esfuerzo deformación de PETG con fibra de carbono.	85
Figura 21 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio 10%.....	85
Figura 22 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio 25%.....	86
Figura 23 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio con policarbonato	86
Figura 24 Captura de pantalla de los resultados obtenidos directamente del software de la máquina Shimadzu AGS-X Series para las probetas de la Fase 1 (impresas con 4 paredes).	87
Figura 25 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 240 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	89
Figura 26 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	90
Figura 27 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	90
Figura 28 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas PETG con fibra de carbono.....	91
Figura 29 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	91
Figura 30 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	92

Figura 31 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	92
Figura 32 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas ABS con fibra de vidrio al 10%.	93
Figura 33 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.	93
Figura 34 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.	94
Figura 35 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.	94
Figura 36 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%.....	95
Figura 37 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	95
Figura 38 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	96
Figura 39 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 280 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.....	96
Figura 40 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas de fibra de vidrio con policarbonato.	97
Figura 41 Captura de pantalla de los resultados obtenidos directamente del software de la máquina Shimadzu AGS-X Series para las probetas de la Fase 2 (Impresa en tableta en relleno 100% y cortada con CNC).....	98
Figura 42 Grafica de esfuerzo deformación de las 36 probetas utilizadas en fase 2.....	101
Figura 43 Curvas TGA del filamento de PETG con fibra de carbono antes de extruir. Se muestra la descomposición de la matriz y el residuo asociado al contenido de fibra de carbono.	114
Figura 44 Curvas TGA del filamento de PETG con fibra de carbono después de extruir a 240°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se observa el comportamiento térmico del material extruido y el porcentaje de residuo.	114
Figura 45 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 10 % antes de extruir. Se observa la pérdida de masa de la matriz polimérica y el residuo asociado al contenido de fibra de vidrio.....	115
Figura 46 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 10 % después de extruir a 250°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se muestra el comportamiento de degradación térmica y el residuo final del material extruido.	115
Figura 47 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 25 % antes de extruir. Se aprecia la variación de masa en función de la temperatura y el residuo correspondiente al refuerzo inorgánico.....	115
Figura 48 Curvas TGA del filamento de Ultra ABS con fibra de vidrio al 25 % después de extruir a 250°C través de una boquilla de 0.4 mm. Se observa el perfil de degradación térmica del material procesado y su residuo final.	116

Figura 49 Curvas TGA del filamento de policarbonato con fibra de vidrio antes de extruir. Se aprecia la estabilidad térmica de la matriz de policarbonato y el residuo de fibra de vidrio.....	116
Figura 50 Curvas TGA del filamento de policarbonato con fibra de vidrio después de extruir 260°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se muestra el comportamiento de degradación térmica del material extruido y su residuo final.	117
Figura 51 Diseño CAD de cabezal para llave de reparación de impresora 3D.	142
Figura 52 Variación en medición real contra diseño CAD.....	142
Figura 53 Apertura por falta de cuerpo	143
Figura 54 Prototipo con mayor cuerpo aplicado.....	143
Figura 55 Prototipos de desarmador.....	144
Figura 56 Puntas de desarmador (Hembra).....	144
Figura 57 Puntas intercambiables (Macho).....	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de Creality Ender 3.	62
Tabla 2. Especificaciones de Creality K1C.....	63
Tabla 3. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de PETG reforzado con fibra de carbono (Fase 1).....	88
Tabla 4. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% (Fase 1).....	88
Tabla 5. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de Ultra ABS reforzado con fibra de vidrio al 25% (Fase 1).....	88
Tabla 6. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de policarbonato con fibra de vidrio (Fase 1).....	88
Tabla 7. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de PETG reforzado con fibra de carbono (Fase 2).....	99
Tabla 8. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% (Fase 2).....	99
Tabla 9. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de Ultra ABS reforzado con fibra de vidrio al 25% (Fase 2).....	99
Tabla 10. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de policarbonato con fibra de vidrio (Fase 2).....	100
Tabla 11. Propiedades mecánicas de tensión: promedio y desviación estándar de probetas impresas directamente (Fase 1, n=3 por material).....	102
Tabla 12. Propiedades mecánicas de tensión: promedio y desviación estándar de probetas cortadas con CNC (Fase 2, n=9 por material).....	102
Tabla 13. Efecto de la temperatura de impresión en las propiedades mecánicas de tensión por material (Fase 2, n=3 por temperatura).....	104
Tabla 14. Comparación de propiedades mecánicas entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio a diferentes temperaturas de impresión (Fase 2).....	106
Tabla 15. Comparación de fuerza máxima entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio por temperatura.....	107
Tabla 16. Promedio general de fuerza máxima y desviación estándar según porcentaje de fibra de vidrio.....	108
Tabla 17. Comparación de elongación a la ruptura entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio por temperatura.....	108
Tabla 18. Desviación estándar y consistencia de resultados según porcentaje de fibra de vidrio y temperatura (10% y 25%).....	108
Tabla 19. Concentrado general de propiedades mecánicas de policarbonato con fibra de vidrio.....	110
Tabla 20. Porcentaje de residuo inorgánico antes y después de la extrusión: verificación de estabilidad composicional.....	125

RESUMEN

La presente tesis analiza el desempeño de materiales compuestos avanzados empleados en tecnologías de impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM), con el propósito de ser utilizados como alternativa para el diseño mecánico y prototipado industrial en el contexto de la industria manufacturera de Baja California. Ante el limitado uso de materiales avanzados en procesos de manufactura aditiva dentro de las pequeñas y medianas empresas, esta investigación aborda la necesidad de contar con criterios técnicos que permitan seleccionar materiales con propiedades mecánicas y térmicas superiores a los polímeros convencionales.

El estudio se centró en la caracterización comparativa de cuatro filamentos compuestos: fibra de carbono, fibra de vidrio al 10%, fibra de vidrio al 25% y fibra de vidrio combinada con policarbonato. Para ello, se diseñó un modelo experimental que incluyó la fabricación de especímenes normalizados mediante impresión 3D y su evaluación a través de ensayos mecánicos de tracción, así como análisis termogravimétricos (TGA) para determinar la estabilidad térmica y el contenido real de refuerzo en cada material.

Los resultados obtenidos permitieron identificar diferencias significativas en el comportamiento mecánico de los materiales evaluados. El filamento reforzado con fibra de carbono presentó los valores más altos de resistencia y rigidez, posicionándose como la opción más apta para aplicaciones donde se requieren altas prestaciones estructurales. En contraste, los compuestos con fibra de vidrio demostraron una relación equilibrada entre resistencia, costo y facilidad de impresión, destacando el filamento con mayor porcentaje de refuerzo por su mayor estabilidad dimensional. Por su parte, el filamento de fibra de vidrio con policarbonato mostró un desempeño superior en términos de tenacidad y resistencia térmica, lo que lo hace adecuado para entornos sometidos a temperaturas elevadas o esfuerzos dinámicos.

Asimismo, se observó que los parámetros de impresión influyen de manera determinante en el desempeño final de las piezas, siendo factores críticos la temperatura de extrusión, la orientación de las capas y la densidad de relleno. El análisis termogravimétrico evidenció que existen variaciones entre el porcentaje de refuerzo declarado por los fabricantes y el contenido real de fibra, lo cual impacta directamente en el rendimiento mecánico del material.

Como resultado de esta investigación, se establecieron criterios técnicos de selección de materiales orientados a facilitar la toma de decisiones en el ámbito industrial, favoreciendo la integración de manufactura aditiva como herramienta estratégica para el prototipado funcional. Finalmente, se concluye que el uso de materiales compuestos avanzados en impresión 3D tiene un alto potencial para incrementar la competitividad de la industria manufacturera regional, promoviendo la adopción de tecnologías propias de la Industria 4.0 y abriendo nuevas oportunidades para el diseño y desarrollo de productos de alto valor agregado.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria maquiladora en Baja California se posiciona como una de las líderes a nivel nacional con una visión de crecimiento para los siguientes años. La mayoría de las empresas instaladas actualmente, carecen de áreas de diseño mecánico y/o prototipado, lo que dificulta la creación o mejoramiento de productos.

La incorporación de materiales avanzados proporciona una ventaja competitiva para toda industria de manufactura, principalmente para ser utilizados en los departamentos de diseño mecánico y prototipo, debido al alto sentido de innovación constante que posiciona a las empresas como líderes competitivas en términos de mejora continua y productos con alto valor agregado.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar distintos tipos de materiales avanzados a través del estudio de sus propiedades, para ser utilizados en el área de diseño mecánico y prototipado de la industria de manufactura. El Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) tiene un alto reconocimiento por la capacidad científica y tecnológica en temas de manufactura avanzada, en este sentido, se utilizan técnicas avanzadas de caracterización de materiales con alto potencial para ser utilizados en la industria manufacturera.

Se utilizará una metodología práctica-experimental a través de un diseño de experimento que permitirá la evaluación de diferentes materiales avanzados y proporcionar resultados confiables sobre las propiedades de estos, así como rutas para la obtención y el procesamiento de los mismos. Se espera determinar materiales avanzados con las mejores propiedades para su uso en el diseño mecánico y prototipado.

El documento se divide de la siguiente manera. En el primer capítulo de este trabajo se abordan la problemática de la investigación, justificación, los objetivos de investigación, la hipótesis a comprobar y los alcances y limitaciones que presenta el proyecto.

El segundo capítulo está dedicado a definir los antecedentes internacionales, nacionales y regionales en el que se mueve el desarrollo de la investigación.

El capítulo dedicado al marco teórico es el tercero y está dividido en ocho grandes bloques: (1) fundamentos de la impresión 3D, (2) tecnologías de impresión, (3) materiales para impresión, (4) herramientas de diseño, (5) propiedades mecánicas de materiales compuestos, (6) propiedades térmicas de materiales compuestos para impresión 3D, (7) aplicaciones industriales de materiales avanzados en impresión 3D y, (8) estudios previos sobre filamentos de fibra de carbono y fibra de vidrio.

En el cuarto capítulo se establecen y describen los materiales y métodos utilizados en el proyecto de investigación. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo cinco y la discusión de los mismo en el capítulo seis.

Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria manufacturera es uno de los cimientos de la economía mexicana y destaca en la zona de Baja California por la exportación de productos de buena calidad, siendo el sector maquilador el de mayor relevancia. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI arroja que Baja California es la entidad con el mayor número de establecimientos manufactureros de México, con el 17.6% del total nacional. Aunque estas empresas desempeñan un papel relevante, la mayoría, especialmente las pequeñas y medianas, enfrentan limitaciones en sus capacidades de diseño mecánico debido a la insuficiente integración de procesos

de diseño y prototipado de piezas y herramientas que respalden de manera eficiente sus procesos productivos.

La externalización de servicios para el diseño prototipado de piezas y herramientas, consumo de tiempo y dinero en fabricación con innovación limitada los pone a merced de la libre competencia del mercado.

La impresión 3D, como una de las tecnologías de manufactura aditiva, ha sido considerada una tecnología disruptiva con el potencial de proveer tanto componentes intercambiables como prototipos de forma rápida y flexible, sin importar las ineficiencias de fabricación del torneado, prensado y fundido. La impresión 3D puede ser implementada en varios materiales, desde polímeros y metales hasta cerámicos, adaptando estructuras cóncavas.

Sin embargo, la selección adecuada de los materiales para la impresión 3D todavía es un desafío, especialmente para aquellas aplicaciones que necesiten propiedades mecánicas avanzadas, incluyendo resistencia, rigidez y durabilidad. Aunque los materiales más comúnmente utilizados en la industria para la impresión 3D son los polímeros convencionales como PLA y ABS, estos presentan limitaciones en términos de resistencia mecánica y estabilidad térmica que los hacen poco adecuados para aplicaciones industriales más exigentes. Como resultado, los filamentos compuestos, como la fibra de carbono y de vidrio, han sido utilizados cada vez más debido a sus propiedades mecánicas superiores y su habilidad para soportar cargas y condiciones de trabajo más severas. La fibra de carbono se caracteriza por su ligereza y alta resistencia, mientras que la fibra de vidrio, aunque menos rígida, ofrece mayor flexibilidad y mejor resistencia al impacto. A pesar de estas ventajas, aún se encuentra limitada la información técnica sobre el desempeño de los filamentos compuestos durante el comportamiento de la impresión 3D bajo condiciones de carga, temperatura y entorno de trabajo. Asimismo, la implementación e integración de estos materiales suele requerir equipos especializados —como una laminadora— y software

avanzado que permita optimizar los parámetros de impresión. En consecuencia, la falta de conocimiento técnico y de recursos en las empresas manufactureras de Baja California restringe su adopción.

Por lo tanto, es crucial que se realice una evaluación sistemática y rigurosa de los nuevos materiales para impresión 3D avanzada, tomando en cuenta no solo sus propiedades mecánicas, sino también su compatibilidad con los procesos de diseño e impresión. Esta evaluación final servirá para identificar los materiales adecuados en procesos de diseño mecánico y fabricación de prototipos en la industria local, lo que permitirá a las empresas de la región tener parámetros técnicos suficientes para elegir y utilizar adecuadamente estos materiales de manera industrial.

Las dificultades actuales para atraer y retener talento especializado en diseño e ingeniería obligan a las empresas de la región a buscar expertos en distintas ciudades del país, e incluso en el extranjero, lo que limita el fortalecimiento de capacidades internas y encarece los procesos de desarrollo e innovación. Esto, a su vez, dificulta el establecimiento de departamentos de diseño en las propias empresas y la respuesta rápida y efectiva a situaciones industriales inusuales por parte del personal interno. La infraestructura industrial a menudo no es adecuada para el ritmo moderno de la industria, lo que dificulta la respuesta industrial inmediata a las situaciones inusuales.

La adopción de la impresión 3D en las pequeñas y medianas empresas es todavía limitada debido, principalmente, a la escasez de personal capacitado y a la insuficiencia de infraestructura tecnológica adecuada. La implementación de tecnologías de manufactura aditiva requiere equipamiento especializado, así como personal técnico entrenado para su correcta operación y mantenimiento. Esta carencia de recursos humanos y tecnológicos representa un riesgo creciente para las organizaciones que necesitan adaptarse con rapidez a los cambios del entorno productivo y responder de manera eficiente a las exigencias del mercado.

En conclusión, la falta de departamentos de diseño interno en la manufactura de Baja California, así como la escasez de talento especializado y carencia de recursos tecnológicos, son grandes desafíos para la innovación, la mejora continua y la competitividad del sector. Esta situación requiere de soluciones que faciliten a las empresas locales construir capacidades suficientes de diseño y prototipado para afrontar los desafíos y mercados globales más ágil y eficazmente.

1.3 HIPÓTESIS

A continuación, se plantean las siguientes hipótesis para la investigación:

- Tras la evaluación sistemática de los materiales avanzados para imprimir en 3D, los filamentos de fibra de carbono tendrán mejores propiedades mecánicas, tanto en términos de resistencia como de rigidez. En este sentido, los resultados de los ensayos de tracción, flexión y estabilidad dimensional superarán a los de los filamentos de fibra de vidrio y fibra de vidrio con policarbonato, debido a la alta relación peso-resistencia característica de los compuestos de este tipo.
- Los filamentos de fibra de vidrio, especialmente con un mayor porcentaje de refuerzo, esperarán una mejora en comparación con los polímeros convencionales a pesar de que se colocarán por debajo de la fibra de carbono.
- El filamento de fibra de vidrio con policarbonato se destacará por su alta tenacidad y resistencia al impacto, por lo que será adecuado para aplicaciones con factores dinámicos. Dado que estos materiales se integrarán en los procesos de diseño e industrialización de prototipos, fortalecerán la base de innovación y competitividad de la industria manufacturera en Baja California al ofrecer soluciones personalizadas y de alto desempeño para prototipos de uso funcional.
- La adición de factores ambientales y de uso industrial a la evaluación comparativa de los materiales no solo significará la evaluación en condiciones

estándar sino también su influencia ambiental y efecto durante la aplicación manufacturera, incluyendo la variación de temperatura, humedad y cíclica esfuerzos.

- Los materiales reforzados con fibra de carbono presentarán un desempeño superior en aplicaciones donde la rigidez y la resistencia a la fatiga sean críticas; mientras que el filamento de policarbonato reforzado con fibra de vidrio mostrará mejores resultados en resistencia al impacto y capacidad de absorción de energía.

Finalmente, la calidad superficial y la facilidad de impresión influirán en la decisión final respecto a la evaluación diferencial de estos materiales, ya que cada uno desdibuja la competencia por requisitos de aplicación industrial. Los parámetros de impresión, que incluyen la temperatura de extrusión, la velocidad y la orientación de los soportes, se considerarán críticos para maximizar el potencial de cada filamento. Los resultados de esta investigación, por ende, simplificarán la selección de materiales avanzados de esta manera para el proceso de impresión 3D. Adecuar en conjunto la decisión tomada en la industria manufacturera en Baja California y que las soluciones complejas favorezcan la eficiencia, la calidad y la competitividad en el desarrollo de piezas y componentes

1.4 JUSTIFICACIÓN

La justificación de esta investigación se sustenta en la urgencia de modernizar y fortalecer la industria manufacturera de Baja California frente a los desafíos de la globalización, la digitalización acelerada y la creciente demanda de productos personalizados y de alta calidad. En este escenario, la adopción de tecnologías propias de la Industria 4.0 como la automatización, la conectividad inteligente, el análisis de *big data* y la manufactura aditiva se convierte en un imperativo estratégico para mantener la competitividad y asegurar la sostenibilidad de los procesos productivos.

La Industria 4.0, entendida como la cuarta revolución industrial, busca transformar los modelos de producción tradicionales mediante la integración de sistemas digitales y físicos, permitiendo una mayor eficiencia, flexibilidad y adaptabilidad en las cadenas de valor. En este contexto, la impresión 3D es una tecnología emergente como una tecnología clave que facilita la fabricación de piezas complejas, la reducción de tiempos y costos en el desarrollo de prototipos, y la optimización del uso de materiales, lo que contribuye a la minimización de residuos y a la creación de soluciones más sostenibles.

Sin embargo, para aprovechar plenamente las ventajas de la impresión 3D dentro de la Industria 4.0, es fundamental contar con información técnica confiable sobre el desempeño de materiales avanzados, como la fibra de carbono, la fibra de vidrio y sus compuestos, en condiciones reales de manufactura, que en este caso suelen ser los materiales más comunes cuando se habla de materiales avanzados últimamente. La selección adecuada de estos materiales no solo impacta en la calidad y funcionalidad de los productos finales, sino que también influye en la viabilidad técnica y económica de los procesos de producción.

Baja California ocupa un lugar destacado en el sector manufacturero nacional. Según datos del INEGI, los ingresos por exportaciones de la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación (IMMEX) en el estado ascendieron a 1,582 millones de dólares en mayo de 2021, posicionando a la entidad en el tercer lugar a nivel nacional. Además, con 929 establecimientos IMMEX manufactureros, Baja California representa el 17.9% de este tipo de industrias en el país, consolidándose como líder en el sector. Sin embargo, para incrementar aún más esta posición y dejar de ser solo una región ensambladora, es necesario avanzar hacia la fabricación de productos completos a través del diseño mecánico y el prototipado, adoptando tecnologías y materiales avanzados que permitan agregar valor a la producción local.

Entonces, la evaluación sistemática de los materiales avanzados para la impresión 3D permitirá a las empresas manufactureras de la región tomar decisiones informadas y fundadas en la práctica, al tiempo que fomentará la innovación, la mejora continua y la adopción de modelos de negocio acordes con los principios de la economía circular. El objetivo de esta investigación es evaluar diferentes tipos de materiales avanzados, como el carbono, el vidrio y las de sus fibras compuestos, para ser utilizados en el área de diseño mecánico y prototipado de las empresas manufactureras. En ese sentido, se aplicó el método científico con el fin de obtener y aplicar conocimientos científicos y tecnológicos, mediante la investigación teórica, así como la experimentación, con el propósito de evaluar algunas propiedades de los materiales avanzados y su desempeño en la industria.

Se espera que el impacto de este proyecto alcance a diferentes empresas manufactureras que requieran la evaluación de diversos materiales avanzados para lograr un control de calidad en sus procesos y productos. Esto implica que se establezca un periodo de análisis previo a la práctica, el cual se llevará a cabo en un marco metodológico estricto, para que los estudios garanticen la confiabilidad de los resultados, ya que dependerá de la selección de un material que se empleará en vez de otro dependiendo de la labor o de las condiciones que se le apliquen.

Asimismo, será esencial comprender el material antes de abrir la posibilidad de que se emplee en una aplicación específica ya que los consumidores o clientes pueden solicitar diferentes evaluaciones, considerando la geometría de quienes lo portan, tolerancias, esfuerzos y propiedades del material, que determinarán la consecuencia de vida y calidad final. Las partes al fabricarlas serán fácilmente ensamblables, de excelente calidad y bajo un término costo/beneficio exitoso.

Por otra parte, la definición clara de las variables técnicas permite establecer si los procesos de fabricación serán manuales, automatizados o híbridos, lo que contribuye a una planeación más eficiente de la producción. La reducción de costos y la simplificación de procesos surgen como objetivos estratégicos para

optimizar los diseños y fortalecer la competitividad de la industria manufacturera de Baja California.

Además, la incorporación de materiales avanzados y tecnologías de impresión 3D en el diseño e ingeniería mecánica, así como en la manufactura de prototipos industriales, puede fortalecer la capacidad competitiva de los fabricantes en Baja California. Esta adopción permitiría a las empresas responder de manera más rápida y eficiente a las demandas del mercado, al reducir los tiempos de desarrollo y los costos asociados a la iteración de diseño y producción. Asimismo, el uso de estas tecnologías abre la posibilidad de ofrecer soluciones personalizadas que agreguen valor al producto final, lo cual resulta particularmente relevante para sectores estratégicos de la región, como el automotriz, aeroespacial, médico y de bienes de capital.

Ahora bien, independientemente de cómo evaluamos los materiales, es importante señalar que estos difieren en sus propiedades mecánicas, químicas, corrosivas, térmicas, también consideran cómo las impresiones son fabricadas en manufacturabilidad, calidad superficial y ensamblaje de las partes. Por lo tanto, se necesita criterios técnicos de selección para poder determinar qué material es el correcto, y estos se enfocan en la geometría de la parte, las tolerancias y los esfuerzos que se aplicarán durante su vida útil. Siendo este el caso, se puede asegurar que el producto cumple con los estándares de calidad y seguridad que demanda tanto el mercado como las autoridades reguladoras.

Asimismo, la combinación de metodologías de análisis y rigor experimental en la selección de los materiales permitirá encontrar qué materiales son los adecuados para una aplicación, con ello, maximizar el desempeño funcional y económico de los procesos de fabricación. En suma, se trata de un logro importante para una industria manufacturera más innovadora y sostenible, que pueda adaptar y adoptarse a las innovaciones tecnológicas y tendencias emergentes en el mercado global.

Por lo tanto, este proyecto de investigación se llevará a cabo con el apoyo del Instituto de Ingeniería de la UABC en Mexicali en México. La UABC es un reconocido centro de aprendizaje e innovación científica y tecnológica en la región, se ha destacado por su compromiso con la formación de capital humano y su capacidad de citas para resolver problemas regionales en colaboración con los sectores industrial, público y social. El instituto ha promovido en protuberancia la creación de investigación aplicada e innovación en problemas locales e industriales.

En este marco, la colaboración activa con el Instituto de Ingeniería de la UABC en Mexicali, ofrece las siguientes ventajas para el proyecto de investigación: acceso a la infraestructura y el equipamiento especializado necesarios para llevar a cabo ensayos y pruebas experimentales de la más alta calidad; trabajo con académicos, estudiantes e investigadores en un enfoque multidisciplinario que facilite el intercambio de conocimientos, la generación y transferencia de tecnología y formación de capital humano; mejorar la vinculación universidad-empresa con resultados de investigación pertinentes a las necesidades reales de la industria manufacturera de la región; un modelo de vinculación inteligente y la experiencia del Instituto centrada en proyectos de I+D que aseguran que los hallazgos y recomendaciones tengan un impacto inmediato en la mejora de los procesos productivos, la optimización de recursos y la adquisición de prácticas innovadoras por parte de las empresas manufactureras en Baja California. Por lo tanto, el estudio tendrá un impacto en la formación de capital humano especializado, la transferencia de tecnología y fortalecerá la relación Universidad, Industria. Es sobre esta base que las lecciones aprendidas y las mejores prácticas serán compartidas para el uso de un número más amplio de empresas que adopten soluciones avanzadas, fomentando la transformación digital y la mejora continua a lo largo de la cadena de valor en la industria manufacturera de Baja California.

Por último, la colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UABC, en Mexicali, genera un ecosistema de innovación y desarrollo tecnológico en que la academia, la industria y la sociedad actúan juntas en beneficio a la competitividad y el desarrollo regional. La colaboración es esencial para lograr en transformaciones con sustentabilidad y escala en el sector manufacturero promovidas por los desafíos y las oportunidades de la 4ª Revolución Industrial.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Evaluar materiales compuestos avanzados para impresión 3D, específicamente filamentos de fibra de carbono, fibra de vidrio en diferentes concentraciones (10% y 25%) y fibra de vidrio con policarbonato, mediante la caracterización de sus propiedades mecánicas, térmicas y tecnológicas, con el fin de determinar su viabilidad y beneficio para el diseño mecánico y el prototipado industrial en la manufactura de Baja California.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales avanzados seleccionados mediante técnicas especializadas de caracterización, tales como ensayos de tracción, flexión, impacto, análisis dimensional y estabilidad térmica, para identificar su comportamiento bajo condiciones de uso industrial.
- Seleccionar los materiales que presenten las mejores propiedades para su implementación en el proceso de diseño mecánico, considerando tanto su desempeño experimental como su compatibilidad con el uso de software avanzado de diseño 3D y sistemas de manufactura aditiva.
- Incorporar los materiales avanzados identificados como óptimos en el desarrollo de prototipos funcionales mediante manufactura aditiva,

evaluando su aplicabilidad, calidad y eficiencia en el contexto real de la industria manufacturera de la región.

- Establecer criterios técnicos sólidos para la selección y uso de materiales avanzados en impresión 3D, que contribuyan a la mejora continua de los procesos de diseño y prototipado, y que sirvan como referencia para la toma de decisiones en las empresas manufactureras de Baja California.

1.6 ALCANCE Y LIMITACIONES

1.6.1 Alcance

El presente estudio tiene como alcance principal la evaluación de materiales avanzados que ya seleccionamos para impresión 3D específicamente filamentos de fibra de carbono, fibra de vidrio al 10%, fibra de vidrio al 25% y fibra de vidrio con policarbonato, con el objetivo de determinar su viabilidad para el diseño mecánico y prototipado industrial en la región de Baja California, específicamente Mexicali como ciudad de estudio. El proyecto se centra en el análisis de propiedades mecánicas y térmicas de estos materiales, mediante ensayos experimentales y caracterización, considerando su aplicación en sectores más comunes o de mayor área de aplicación como podría ser como el automotriz, aeroespacial y médico.

El alcance abarca la selección, fabricación de probetas, caracterización y comparación de los materiales mencionados, así como la integración de los resultados en el desarrollo de prototipos funcionales mediante manufactura aditiva. La investigación contempla la colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UABC en Mexicali, lo que garantiza el acceso a infraestructura, equipamiento especializado y asesoría técnica para la realización de los ensayos y la interpretación de los resultados.

No obstante, el estudio se limita a los materiales y tecnologías seleccionadas, y a las condiciones experimentales y de manufactura (en este caso hablando de máquinas para todo el proceso de mecanizado o detallado) disponibles en el contexto de Mexicali, Baja California y las empresas e instituto donde se colabora.

El alcance no incluye la evaluación de otros materiales compuestos ni la optimización de procesos industriales a escala masiva o en una producción en masa, sino que se enfoca en proporcionar criterios técnicos sólidos para la selección y uso de materiales avanzados en el diseño y prototipado de componentes industriales funcionales y que las la gente pueda observar las diferencias y factibilidad del uso de manufactura aditiva para posteriormente hablar del prototipado y su posible implementación.

1.6.2 Limitaciones

En cuanto a las limitaciones se encuentran:

- **Recursos materiales y tecnológicos:** Si bien, se cuenta con acceso a equipos de impresión 3D y a los laboratorios de caracterización, la disponibilidad de materiales avanzados o nuevas tecnologías para la generación de información para este proyecto puede verse limitada por factores económicos o logísticos.
- **Tiempo:** El tiempo para la ejecución del proyecto se atiene a tiempos académicos y tiempos de laboratorio, en este sentido, la extensión de análisis o cantidad de pruebas podría verse limitada.
- **Acceso a información y datos:** Debido a la temporalidad de los datos no se cuenta con suficientes estudios previos del comportamiento de estos materiales a las condiciones mencionadas en Baja California, sin embargo, el uso de parámetros generales de la manufactura aditiva puede emplearse apropiadamente en el trabajo.

- **Metodología experimental:** En este sentido, el tamaño de muestra o cantidad de pruebas elaboradas puede verse limitado por los recursos disponibles lo que puede afectar la confiabilidad y validez de los datos, no obstante, se probará la repetibilidad y validación de pruebas.
- **Aplicabilidad industrial:** Los resultados generados solo serán generalizados a partir de las condiciones empleadas para la fabricación sin ser sometidos a pruebas.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Desde su inicio en 1980, la manufactura aditiva ha tenido un desarrollo acelerado a nivel internacional, principalmente en la impresión 3D, situándose como una de las tecnologías más importantes en la transformación de los procesos industriales.

El origen de la impresión 3D se atribuye al trabajo, que nunca se comercializó, iniciado por Hideo Kodama en 1980 sobre el uso de la fotopolimerización para creación de objetos de calidad. De 1984 a 1986, Charles Hull inventó la estereolitografía, patentando la primera impresora 3D, fabricando la primera impresora en 1986 fundando la empresa 3D Systems y el comienzo de la manufactura aditiva comercial. Durante la década de 1990, este se diversificó con la invención del sinterizado selectivo por láser SLS de Carl R. Deckard y la deposición de material fundido FDM patentada por Scott Crump.

Estos desarrollos permitieron la utilización de polvos y filamentos termoplásticos en la creación de piezas, abriendo un amplio abanico de posibilidades en materiales y procesos. Los años siguientes harán de la impresión 3D una tecnología destacada en la industria con ISO de impresoras de metal, creación de objetos laminados LOM y curado secundario, aplicando lo aprendido al sector aeroespacial, automotriz y médico. La evolución de los materiales para impresión 3D ha sido una constante paralela al desarrollo tecnológico. Desde polímeros conocidos como el PLA ácido poliláctico y ABS acrilonitrilo butadieno este metileno por su facilidad de uso y bajo costo, la tendencia se basa en la incorporación de materiales compuestos como la fibra de carbono y la fibra de vidrio, que permiten diseños livianos, resistentes y duraderos debido a sus propiedades.

En el ámbito de la investigación, los filamentos compuestos han sido objeto de importantes avances. Por ejemplo, se han desarrollado metodologías para la

impresión 3D de compuestos de fibra de carbono reforzada con PLA, logrando mejoras significativas en la resistencia a la tracción y flexión, así como en la estabilidad térmica de las piezas impresas. Matsuzaki (et al., 2016) demostraron la viabilidad de utilizar fibras continuas de carbono y jute en matrices termoplásticas, obteniendo componentes estructurales con propiedades similares a las de los compuestos tradicionales fabricados por métodos convencionales. Estos avances han permitido la producción directa de piezas funcionales sin la necesidad de moldes, reduciendo costos y tiempos de desarrollo.

En años recientes, la investigación se ha enfocado en el desarrollo de filamentos compuestos con fibras continuas, como los de carbono y Kevlar, que ofrecen propiedades mecánicas superiores y permiten la fabricación de piezas aptas para aplicaciones de alto desempeño. Por ejemplo, Cersoli et al. (2021) mostraron que la incorporación de fibras de Kevlar en matrices poliméricas puede duplicar la resistencia a la tracción y aumentar significativamente la resistencia al impacto, ampliando las posibilidades de aplicación en sectores donde la seguridad y la durabilidad son críticas. Además, la revisión de Swee Leong Sing (2023) sobre materiales emergentes para manufactura aditiva destaca la importancia de la continua innovación en el desarrollo de polímeros de alto desempeño, aleaciones y compuestos, que permiten fabricar piezas con propiedades superiores y adaptadas a necesidades específicas.

La evolución de la manufactura aditiva a nivel internacional ha estado marcada por la integración de nuevos materiales, la mejora de los procesos de impresión y la ampliación de aplicaciones industriales. Actualmente, la tecnología permite la fabricación de componentes complejos, personalizados y de alto desempeño, reduciendo el desperdicio de materiales y facilitando la innovación en sectores estratégicos. La investigación continúa explorando nuevas combinaciones de materiales, la optimización de parámetros de impresión y la búsqueda de soluciones sostenibles, consolidando a la manufactura aditiva como un pilar fundamental de la industria del futuro.

2.2 ANTECEDENTES NACIONALES

En México, la manufactura aditiva ha experimentado un crecimiento notable en la última década, impulsada por la demanda de soluciones innovadoras en sectores estratégicos como el automotriz, aeroespacial, médico y electrónico. Aunque el país aún se encuentra en una fase de adopción temprana comparado con economías líderes, los avances tecnológicos y la colaboración entre industria, academia y gobierno han posicionado a México como un actor relevante en la región latinoamericana.

2.2.1 Evolución e hitos clave

El desarrollo de la manufactura aditiva en México se remonta a principios de los años 2000, con la introducción de las primeras impresoras 3D en universidades y centros de investigación. Sin embargo, fue a partir de 2014 cuando la tecnología comenzó a ganar tracción en el sector industrial, con la apertura de los primeros centros especializados en impresión 3D profesional. Un hito significativo ocurrió durante la pandemia de COVID-19 en 2020, cuando iniciativas como "Aditiva por México" y "México unido contra el COVID-19" demostraron el potencial de la tecnología para responder a crisis globales. Estas iniciativas reunieron a más de 350 socios y 400 impresoras 3D a nivel nacional, produciendo equipos médicos críticos como válvulas para ventiladores y protectores faciales, así como piezas industriales para mantener operativas cadenas de suministro interrumpidas.

2.2.2 Sectores líderes en adopción

- Automotriz: Empresas como Ford y Nematik han integrado la impresión 3D para la fabricación de prototipos, herramientas personalizadas y componentes ligeros. Por ejemplo, Nematik utilizó tecnología de manufactura aditiva durante la pandemia para producir "splitters" que multiplicaron la capacidad de ventiladores en hospitales.

- Aeroespacial: En Querétaro, clusters industriales fabrican componentes críticos como inyectores de combustible para turbinas, aprovechando la precisión y complejidad geométrica que ofrece la impresión 3D.
- Médico: La personalización de prótesis, implantes y modelos quirúrgicos ha crecido gracias a empresas locales que combinan diseño digital y materiales biocompatibles.
- Bienes de consumo: Marcas de lujo y electrónica utilizan prototipos impresos en 3D para acelerar el lanzamiento de productos y reducir costos de desarrollo.

2.2.3 Colaboración industria-academia

Instituciones como el Tecnológico de Monterrey y la UABC han sido pioneras en la integración de tecnologías avanzadas. Por ejemplo, el Tec de Monterrey adquirió en 2025 la impresora industrial Meltio M450 para fabricar componentes metálicos, fortaleciendo la formación de estudiantes en manufactura aditiva y ofreciendo servicios a empresas. Esta sinergia ha permitido proyectos de innovación abierta, como el desarrollo de herramientas de ensamble para la industria automotriz y prótesis personalizadas para el sector salud.

2.2.4 Desafíos y oportunidades

A pesar del progreso, persisten retos significativos:

- 1) **Adopción limitada en pymes**: La manufactura aditiva ha experimentado un crecimiento importante en México en los últimos años, especialmente en sectores estratégicos como el automotriz, aeroespacial y médico. Sin embargo, su adopción en las pequeñas y medianas empresas (pymes) sigue siendo baja y poco profunda. Según la encuesta “Estado de la manufactura aditiva en México 2023”, realizada por la Asociación Mexicana

de Manufactura Aditiva (AMMA3D) y el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADIT), solo el 10% de las empresas mexicanas que cuentan con impresoras 3D las utilizan para aplicaciones industriales avanzadas; el resto se limita a la fabricación de prototipos básicos o modelos de presentación.

Esta situación se debe principalmente a la falta de capacitación técnica y a la falta de estándares claros para la validación de piezas impresas en 3D. El mismo estudio señala que el 75% de las pymes que adquirieron impresoras 3D no cuentan con personal capacitado en diseño digital o ingeniería de materiales avanzados.

Esto limita enormemente el potencial de la tecnología, ya que muchas empresas no logran aprovechar las ventajas de la manufactura aditiva para la producción de piezas finales o componentes funcionales. Para contrarrestar este problema, universidades como el Tecnológico de Monterrey y la UABC han establecido laboratorios y programas de capacitación, buscando formar recursos humanos especializados y promover el uso industrial de la tecnología en la región.

2) Dependencia de materiales importados: Otro de los principales obstáculos para la consolidación de la manufactura aditiva en México es la alta dependencia de materiales importados, especialmente filamentos compuestos como la fibra de carbono y la fibra de vidrio. Según datos de la Secretaría de Economía y el portal Data México, en 2023 el 85% de los filamentos compuestos utilizados en el país se importaron, principalmente de Estados Unidos, China y Alemania.

Por ejemplo, el valor total de las importaciones de filamentos sintéticos en México superó los 320 millones de dólares en ese año, mientras que las

exportaciones fueron de apenas 38 millones de dólares, lo que refleja una fuerte dependencia de insumos extranjeros.

Esta situación encarece los procesos productivos y expone a las empresas a riesgos de suministro y fluctuaciones en los precios internacionales. Además, la dependencia de materiales importados limita la competitividad de la industria local y dificulta el desarrollo de una cadena de valor nacional en torno a la manufactura aditiva.

A pesar de ello, instituciones como el Instituto de Ingeniería de la UABC donde se está realizando este proyecto, están impulsando proyectos de investigación para desarrollar materiales avanzados a nivel local, buscando reducir la dependencia y fortalecer la industria nacional.

3) Falta de estandarización: La ausencia de normas y estándares mexicanos para la validación de piezas impresas en 3D es otro desafío importante para la adopción de la tecnología en el país. Actualmente, no existen normas oficiales mexicanas (NOM) específicas para la fabricación y validación de componentes mediante manufactura aditiva, lo que limita el uso de la tecnología en aplicaciones críticas como la industria aeroespacial, automotriz y médica.

Según el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC), solo el 15% de las empresas que utilizan impresión 3D en México cuentan con protocolos internos para la validación de piezas, mientras que el resto depende de estándares internacionales o no dispone de procedimientos claros.

La falta de estandarización frena la adopción de la tecnología, ya que las empresas no pueden garantizar la calidad y seguridad de los productos impresos en 3D para aplicaciones críticas. Para avanzar en este sentido,

el IMNC y organismos sectoriales están trabajando en la adaptación de normas internacionales y el desarrollo de regulaciones propias que permitan a las empresas mexicanas confiar en la calidad de los productos impresos en 3D y fortalecer la posición de México en el mercado global de manufactura avanzada.

No obstante, el marco del T-MEC y los incentivos fiscales para I+D están impulsando la inversión en tecnología. Para 2025, se proyecta un crecimiento del 25% en la adopción de manufactura aditiva, con énfasis en la producción de herramientas, moldes y componentes metálicos para aeronáutica y energía.

2.2.5 Tendencias recientes

- **Impresión 3D de metales:** La impresión 3D de metales ha experimentado un avance significativo en México durante los últimos años, impulsada por la adopción de tecnologías industriales de vanguardia. Un ejemplo destacado es la introducción de la impresora Meltio M600 por parte de la empresa Alar, en colaboración con el Tecnológico de Monterrey. Esta impresora, presentada oficialmente en el 3rd International Automotive Industry Supply Summit 2025 en Querétaro ante más de 15,000 profesionales del sector automotriz, marca un hito en la fabricación aditiva de piezas metálicas complejas en el país.

La Meltio M600 utiliza tecnología de deposición de metal por láser (LMD) a partir de alambre, lo que permite fabricar y reparar componentes industriales en materiales como titanio, acero inoxidable, cobre, aluminio, níquel e Inconel, entre otros. Esta tecnología ofrece ventajas claras frente a los métodos tradicionales, como la reducción de tiempos de producción hasta en un 40% y la posibilidad de fabricar piezas bajo demanda, con geometrías complejas y sin necesidad de moldes o herramientas costosas. Además, la impresora puede operar de manera continua (24/7) y se integra

fácilmente en líneas de producción y ensamblado, lo que aumenta la flexibilidad y la eficiencia de las empresas manufactureras.

La adopción de la impresión 3D de metales se está consolidando en sectores estratégicos como el automotriz, aeroespacial y médico, donde la personalización, la rapidez y la calidad de los componentes son fundamentales. Por ejemplo, la Meltio M600 permite la fabricación de piezas de gran tamaño (hasta 300 x 400 x 600 mm) y la producción en serie de componentes funcionales, lo que facilita la innovación y la competitividad industrial.

- **Sostenibilidad:** La manufactura aditiva se ha posicionado como una alternativa ecoeficiente en México, gracias a su capacidad para reducir el desperdicio de materiales y promover el uso de insumos reciclables. Un ejemplo relevante es el uso de materiales como PLA (ácido poliláctico) y PETG (tereftalato de polietileno glicol), que pueden ser reciclados y reutilizados en procesos de impresión 3D, contribuyendo a la reducción de residuos y al cumplimiento de los objetivos de economía circular del país.

Estudios internacionales y nacionales han demostrado que la impresión 3D con materiales reciclados puede reducir el consumo de materias primas y la generación de residuos plásticos. Por ejemplo, un proyecto de investigación realizado en la Universidad Médica de Groningen (UMCG) y NHL Stenden demostró que el PETG reciclado a partir de residuos hospitalarios es apto para la impresión 3D de piezas funcionales, con beneficios ambientales y económicos significativos. El estudio mostró que la impresión con PETG reciclado consume menos energía y genera menos emisiones de CO₂ que la impresión con filamentos vírgenes, además de reducir la cantidad de plástico enviado a vertederos.

Además, la impresión 3D permite optimizar el diseño de las piezas para minimizar el uso de material y reducir el peso de los componentes, lo que se traduce en ahorros de energía y recursos durante el ciclo de vida del producto. Según un análisis publicado en la revista *Environmental Science & Technology*, la manufactura aditiva puede reducir el uso de material en piezas finales entre un 35% y un 80%, dependiendo del diseño y la aplicación, y disminuir la huella de carbono asociada al transporte y la logística al permitir la producción local y bajo demanda.

La integración de la impresión 3D en modelos de economía circular también se refleja en la creciente adopción de prácticas como la reutilización de soportes y el reciclaje de piezas fallidas, lo que contribuye a cerrar el ciclo de vida de los materiales y a reducir el impacto ambiental de la industria manufacturera.

2.3 ANTECEDENTES REGIONALES Y LOCALES

En Baja California, la manufactura aditiva se ha consolidado como una herramienta estratégica para incrementar la innovación y la competitividad industrial, especialmente en sectores como el aeroespacial, automotriz y médico. La región se distingue por su proximidad con Estados Unidos, lo que facilita el acceso a nuevas tecnologías y mercados internacionales, así como por su infraestructura industrial, manufactura avanzada y la colaboración constante entre empresas, instituciones académicas y centros de investigación. Este ecosistema ha permitido una adopción más ágil de tecnologías de impresión 3D y el desarrollo de materiales avanzados, posicionando a Baja California como un referente nacional en manufactura avanzada.

2.3.1 Infraestructura y actores clave

Uno de los principales actores en la región es M Aerospace RTC, con sede en Mexicali, un centro especializado en manufactura aditiva que cuenta con

certificaciones internacionales (AS9100 Rev D) y ofrece servicios de impresión 3D en metales y polímeros para industrias de alta exigencia como la aeroespacial y automotriz. Este centro tiene capacidad para producir más de 100,000 piezas anuales y colabora con empresas globales como Boeing, Lockheed Martin y SpaceX, lo que demuestra el nivel de integración de la región en cadenas de valor internacionales.

En Tijuana, **Micro TJ** se ha especializado en prototipado rápido mediante tecnologías como estereolitografía (SLA) y modelado por deposición fundida (FDM). Esta empresa desarrolla prototipos de alta resolución para la industria médica y de consumo, utilizando materiales como resinas biocompatibles y filamentos técnicos, incluyendo PETG y fibra de carbono. La capacidad de producir prototipos funcionales de manera rápida y precisa ha permitido a empresas locales reducir drásticamente los tiempos de desarrollo y validación de nuevos productos.

Por su parte, la UABC ha impulsado diversos proyectos de investigación aplicada en impresión 3D, como el desarrollo de prótesis personalizadas y herramientas industriales. Destaca el trabajo de Holsworth Rios (2022), quien exploró el uso de la impresión 3D en diseño arquitectónico para optimizar el uso de materiales y reducir residuos, además de iniciativas para reciclar plásticos y convertirlos en filamentos para impresión 3D, lo que contribuye a la sostenibilidad regional.

2.3.2 Coboración industria-academia

El Instituto de Materiales Avanzados para la Manufactura Sostenible del Tecnológico de Monterrey, con presencia en Baja California, lidera proyectos para integrar materiales compuestos como fibra de carbono y fibra de vidrio en procesos de impresión 3D. Su enfoque en sostenibilidad incluye el uso de polímeros reciclables como PLA y PETG, logrando una reducción de desperdicios de hasta un 86% respecto a métodos tradicionales. Además, en colaboración con

empresas locales, han desarrollado moldes y herramientas para la industria automotriz, logrando reducir los tiempos de producción hasta en un 30%.

A pesar de estos avances, Baja California enfrenta desafíos que, si bien son similares a los del resto del país, México, presentan particularidades regionales:

1) Dependencia de materiales importados

A nivel nacional, la manufactura aditiva enfrenta una fuerte dependencia de materiales importados, especialmente filamentos compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio. Sin embargo, en Baja California este desafío adquiere particular relevancia por su posición geográfica fronteriza y su integración directa con cadenas de suministro de Estados Unidos y Asia.

Mientras que en otras regiones del país la importación puede implicar largos tiempos de espera y altos costos logísticos, en Baja California la cercanía con la frontera facilita el acceso rápido a insumos internacionales, pero también expone a la industria local a fluctuaciones en políticas aduaneras, tarifas y disrupciones logísticas globales. Además, la alta especialización industrial de la región con empresas que requieren materiales de alto desempeño para sectores aeroespacial y automotriz hace que la dependencia sea no solo de volumen, sino también de calidad y certificación internacional, lo que eleva los estándares y la presión sobre los proveedores locales.

2) Escasez de talento especializado

En todo México existe un déficit de personal capacitado en manufactura aditiva, pero en Baja California este reto es más crítico debido a la concentración de industrias de alta tecnología y la competencia directa con el mercado laboral estadounidense.

A diferencia de otras regiones, donde la demanda de talento puede estar limitada a sectores tradicionales, en Baja California la presencia de clusters

aeroespaciales, automotrices y médicos genera una demanda constante y creciente de ingenieros y técnicos especializados en impresión 3D, diseño digital y materiales avanzados. Además, la migración de talento hacia Estados Unidos, atraído por mejores salarios y oportunidades, agrava la escasez local y obliga a las empresas y universidades a invertir más en retención y formación continua.

3) Falta de estandarización

La falta de las normas y certificaciones para la manufactura aditiva es un desafío nacional, pero en Baja California tiene un impacto particular en la exportación y la integración en cadenas de valor globales.

Mientras que en otras partes del país la falta de estandarización puede limitar la adopción interna de la tecnología, en Baja California donde muchas empresas fabrican para clientes internacionales o participan en cadenas de suministro globales la necesidad de cumplir con estándares internacionales es indispensable para mantener la competitividad y acceder a mercados regulados, como el aeroespacial y el médico. Esto significa que la región no solo enfrenta el reto de crear normas locales, sino también de homologar procesos y certificaciones con estándares internacionales como AS9100 o ISO 13485.

2.3.3 Oportunidades y casos de éxito

En el sector médico, empresas como **3D Medical MX** en Tijuana fabrican prótesis personalizadas y modelos quirúrgicos mediante impresión 3D, logrando una reducción de costos de hasta un 40% en comparación con métodos tradicionales.

En el sector automotriz, la empresa **Nemak** en Mexicali ha implementado la impresión 3D de aluminio para producir componentes ligeros, consiguiendo ahorros del 25% en material y del 15% en consumo energético.

Además, iniciativas gubernamentales como el **Baja Innovation Hub** promueven la adopción de tecnologías 4.0, ofreciendo talleres de capacitación en impresión 3D para pymes y subsidios para la adquisición de equipos, lo que fortalece el ecosistema de innovación regional.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 FUNDAMENTOS DE LA IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D, conocida también como manufactura aditiva, representa una de las tecnologías disruptivas más relevantes de las últimas décadas en el campo de la ingeniería y la fabricación. Este proceso permite la creación de objetos tridimensionales sólidos a partir de un modelo digital, mediante la adición sucesiva de capas de material. A diferencia de los métodos de manufactura tradicionales, como el mecanizado, la fundición o el moldeo por inyección, que suelen requerir la eliminación de material o el uso de moldes, la impresión 3D construye piezas añadiendo material capa por capa, lo que abre la puerta a diseños complejos, estructuras internas y geometrías que antes eran imposibles de fabricar.

El proceso de impresión 3D inicia con el diseño de un modelo tridimensional utilizando software especializado, como CAD (Computer-Aided Design). Este modelo digital se exporta a un formato compatible con las impresoras 3D y, posteriormente, se procesa en un software llamado “slicer” o laminador, que divide el modelo en capas delgadas y genera instrucciones detalladas para la impresora. La máquina interpreta estas instrucciones y deposita o solidifica el material seleccionado plástico, resina, metal, cerámica, entre otros, capa a capa, hasta completar el objeto deseado.

Existen diversas tecnologías de impresión 3D, cada una con ventajas y aplicaciones particulares (Dependiendo de que es lo que buscamos y a qué condiciones se va a someter el producto que queremos crear). Entre las más comunes destacan la estereolitografía (SLA), el sinterizado selectivo por láser (SLS), el modelado por deposición fundida (FDM) y la fusión por haz de electrones (EBM). Cada tecnología utiliza diferentes materiales y mecanismos de solidificación, lo que permite adaptar el proceso a las necesidades específicas de cada proyecto, desde prototipos rápidos hasta piezas funcionales para uso industrial.

La impresión 3D ha revolucionado la manera en que se desarrollan productos, permitiendo a ingenieros y diseñadores experimentar con nuevas ideas, optimizar diseños y reducir significativamente los tiempos y costos asociados al desarrollo de prototipos. Además, esta tecnología facilita la personalización de productos y la fabricación de lotes pequeños o únicos, lo que resulta especialmente valioso en aplicaciones médicas, aeroespaciales, automotrices y de consumo.

3.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Al referirnos a la impresión 3D, cabe recordar que no hay una serie de normas o un único camino para producir objetos tridimensionales. En cambio, existen múltiples tecnologías que presentan sus propias ventajas, limitaciones y áreas de aplicación. Solo mencionando todas ellas, se puede comprender por qué algunos modelos se escogen en la industria o la academia y otros siguen guardados para su uso en situaciones específicas. Por ejemplo, la **estereolitografía**, o **SLA**, fue una de las primeras tecnologías utilizadas. Emplea un láser para soldar una resina líquida sensible a la luz ultravioleta, capa sobre capa. Este método es particularmente solicitado para la producción de objetos con detalles muy finos o superficies lisas. Los dentistas o los diseñadores prefieren esta tecnología del nivel de detalle. No obstante, trabajando con las resinas, se tiene que prestar mucha atención, ya que requiere el manoseo de los materiales y el postprocesado para eliminar posibles residuos y curar la pieza desde adentro.

Luego, el **sinterizado selectivo por láser** o **SLS**, tiene algunas características completamente diferentes. Usa un láser que funde partículas de polvo de un polímero con tal que forme la pieza sin soportes adicionales. Durante la impresión, el polvo sobrante sirve al mismo tiempo. Es especialmente útil para la creación de productos complejos y en aplicaciones industriales donde la resistencia y la geometría son los elementos clave. El sinterizado se utiliza mucho en la industria automovilística, aeroespacial y en la creación de diferentes prototipos.

La fusión por haz de electrones, o **EBM's**, funciona de manera parecida al FLM pero se usa un haz de electrones en lugar de un láser con el fin de fundir polvos metálicos. La tecnología es más cara y necesita condiciones especiales de vacío. Entonces se usa en aplicaciones de alta demanda, como la fabricación de implantes quirúrgicos y componentes aeroespaciales de titanio.

Finalmente, la tecnología del mayor interés para la investigación actual es el **modelado por deposición fundida, FDM** (por sus siglas en inglés, Fused Deposition Modeling). En general, FDM es probablemente la tecnología de impresión 3D más accesible para laboratorios y empresas. Es un proceso de impresión en 3D en el que la pieza se crea fundiendo filamento de plástico y depositándolo capa a capa en una base, dirigiendo cada capa basada en planos 3D precisos. Esta técnica de impresión 3D nos permite trabajar con diferentes materiales que van desde plásticos regulares hasta polímeros de fibra de carbono y vidrio. Al final, FDM es muy fácil de usar y no es muy caro de instalar, por lo que es ideal para trabajos en talleres o empresas pequeñas. Esta técnica también permite a los operadores ajustar la temperatura de la boquilla, la velocidad de impresión y el porcentaje de relleno, lo que afecta directamente las propiedades de la pieza impresa. Aunque la superficie del material es inferior a otro tipo de impresoras, FDM es un mejor ajuste para prototipos útiles, herramientas personalizables o piezas finales utilizadas en las que la fuerza y la ligereza son vitales.

Además, contar con impresión 3D en un departamento de diseño puede hacer más sencillo el trabajo diario, porque permite a los equipos visualizar y tocar sus ideas casi de inmediato, lo que ayuda a tomar decisiones más informadas y a resolver problemas en etapas tempranas. Esto no solo acelera los proyectos, sino que también genera un ambiente más creativo y colaborativo dentro de la empresa, por eso el propósito de esta investigación o proyecto es poder evitar la intervención de algún tercero para la aplicación y diseño de prototipos, pudiendo

entregar diseños propios y ajustes necesarios de acuerdo las necesidades de nuestro sector que vayamos a estar aplicados.

3.3 MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

En este apartado se describen los principales materiales utilizados en impresión 3D, haciendo énfasis en aquellos seleccionados para el presente proyecto. Se explican las características, ventajas y limitaciones de los polímeros convencionales y los materiales compuestos reforzados con fibras, que representan una alternativa avanzada para aplicaciones industriales y de prototipado funcional

3.3.1 Polímeros convencionales

En la impresión 3D, especialmente bajo la tecnología FDM, los polímeros convencionales son los materiales más utilizados gracias a su facilidad de procesamiento, disponibilidad y costo accesible. Entre los más representativos destacan el **PLA** (ácido poliláctico) y el **ABS** (acrilonitrilo butadieno estireno).

El PLA es un polímero biodegradable, derivado de recursos renovables como el maíz o la caña de azúcar. Es ampliamente valorado por su facilidad de impresión, baja tendencia a la deformación y buena calidad superficial. Además, su temperatura de extrusión relativamente baja lo hace compatible con la mayoría de las impresoras 3D domésticas e industriales. Sin embargo, el PLA presenta ciertas limitaciones en cuanto a resistencia térmica y mecánica, por lo que suele emplearse en prototipos, modelos conceptuales o piezas que no estarán sometidas a esfuerzos elevados.

Por otro lado, el ABS es un polímero de mayor resistencia mecánica y térmica en comparación con el PLA. Es conocido por su durabilidad, tenacidad y capacidad de soportar temperaturas más altas, lo que lo hace adecuado para piezas funcionales y aplicaciones industriales. Sin embargo, el ABS requiere temperaturas de impresión más elevadas y puede emitir vapores durante el

proceso, por lo que se recomienda utilizarlo en espacios ventilados y con impresoras que cuenten con cama caliente para evitar deformaciones.

Además de PLA y ABS, existen otros polímeros convencionales como el **PETG**, que combina la facilidad de impresión del PLA con la resistencia del ABS, y el policarbonato (PC), que ofrece una alta resistencia al impacto y a la temperatura, aunque su procesamiento es más exigente.

En resumen, los polímeros convencionales siguen siendo la base de la impresión 3D debido a su equilibrio entre costo, facilidad de uso y propiedades mecánicas, permitiendo la fabricación de prototipos, piezas funcionales y modelos personalizados en una amplia variedad de sectores industriales y educativos, pero siguen siendo convencionales, nada fuera de lo extraordinario lo que hace que pueda haber un mejor ejemplar para aplicaciones específicas en algún sector industrial.

3.3.2 Filamentos compuestos

En los últimos años, el desarrollo de filamentos compuestos ha ampliado considerablemente las capacidades de la impresión 3D, especialmente en tecnologías como FDM (Que es donde se centrara este proyecto). Estos materiales combinan una matriz polimérica como PLA, ABS o PETG con refuerzos de fibras (por ejemplo, carbono, vidrio, aramida) o partículas (como madera o metales), con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas, térmicas o funcionales de las piezas impresas

El principal atractivo de los filamentos compuestos es que permiten fabricar piezas más resistentes, ligeras o con características especiales, sin necesidad de procesos industriales complejos. Por ejemplo, al añadir fibras de vidrio o carbono, se logra incrementar la rigidez y la resistencia a la tracción y flexión, acercando el desempeño de las piezas impresas a los materiales compuestos tradicionales fabricados por métodos convencionales.

Además, existen filamentos compuestos con fibras continuas, que pueden alcanzar niveles de desempeño mecánico comparables a los de los compuestos industriales, lo que abre la puerta a aplicaciones exigentes en sectores como la automoción, la aeroespacial o la fabricación de herramientas especializadas. Por otro lado, la incorporación de fibras naturales o partículas de madera ha permitido desarrollar materiales más sostenibles y con acabados estéticos únicos, ideales para aplicaciones de diseño y arquitectura.

En este proyecto principalmente se busca el uso de la impresión 3D por la técnica FDM, en donde se vayan a cumplir ciertas actividades en concreto que serán sometidos a un estrés o condiciones más agresivas que si fuera solo para diseño el prototipo que queramos usar, ya que este proyecto esta enfatizado a realizar prototipos en general para sectores industriales sea cual sea el propósito, por esto mismo se buscara un filamento con mejores propiedades fuera de lo convencional.

Los filamentos seleccionados para esta investigación son:

- **GFPC (Glass Fiber Polycarbonate):** Este material combina la alta resistencia térmica y la tenacidad del policarbonato con el refuerzo de fibra de vidrio, lo que resulta en un filamento ideal para piezas que deben soportar esfuerzos mecánicos elevados y condiciones exigentes de trabajo.
- **PETG con fibra de carbono:** Este filamento une la estabilidad y facilidad de impresión del PETG con el refuerzo de fibra de carbono, logrando piezas ligeras, pero con una excelente rigidez y resistencia estructural, muy útiles para componentes funcionales y prototipos avanzados.
- **ABS-GF (ABS con 10% de fibra de vidrio):** El ABS es conocido por su durabilidad, y al añadirle fibra de vidrio se incrementa notablemente su resistencia al impacto y a la deformación, haciéndolo adecuado para piezas que requieren soportar cargas dinámicas o ambientes industriales.

- **Ultra ABS GF25 (ABS con 25% de fibra de vidrio):** Este filamento lleva la resistencia un paso más allá, ya que el alto contenido de fibra de vidrio proporciona una rigidez superior y una mayor estabilidad dimensional, ideal para aplicaciones donde la pieza debe mantener su forma y resistencia bajo condiciones de uso intenso.

La elección de estos materiales responde al objetivo de este trabajo: Identificar y validar filamentos compuestos que permitan a los departamentos de diseño y prototipado en Baja California fabricar piezas funcionales de alto desempeño, superando las limitaciones de los polímeros convencionales y abriendo nuevas posibilidades para la manufactura local o regional.

3.4 HERRAMIENTAS DE DISEÑO 3D

En este apartado se revisan las principales herramientas de diseño 3D utilizadas en la manufactura aditiva, con especial énfasis en el software de diseño mecánico y su papel en el desarrollo de prototipos y piezas funcionales. A continuación, se describen las características y ventajas de estas herramientas, así como su relevancia en el contexto del presente proyecto.

3.4.1 Software de diseño mecánico

El software de diseño mecánico es la herramienta fundamental en cualquier proceso de manufactura aditiva, ya que permite crear, modificar y optimizar modelos tridimensionales antes de su fabricación. Estos programas, conocidos como CAD (Diseño Asistido por Computadora), han evolucionado para ofrecer entornos intuitivos y potentes donde los ingenieros pueden plasmar sus ideas, analizar la factibilidad de los diseños y preparar archivos listos para impresión 3D.

Entre los softwares más utilizados en la industria y la academia destacan **SolidWorks**, **CATIA**, **Autodesk Inventor** y **Fusion 360**. Estas plataformas no solo permiten modelar piezas con precisión, sino que también ofrecen módulos de

simulación mecánica, análisis de esfuerzos y herramientas para optimizar la geometría de acuerdo a las restricciones del proceso de impresión. Esto es especialmente relevante en impresión 3D, donde la orientación, los soportes y el grosor de las paredes pueden afectar la calidad y resistencia de la pieza final.

El uso de software de diseño mecánico está directamente relacionado con el éxito de proyectos de impresión 3D, ya que facilita la detección temprana de posibles fallos y la adaptación del diseño a las capacidades de la impresora y los materiales seleccionados. Por ejemplo, herramientas como “Will It Print” ayudan a evaluar la manufacturabilidad de las piezas, sugiriendo cambios en la geometría u orientación para evitar errores de impresión y mejorar la calidad del resultado final. En el contexto de este proyecto, el software de diseño mecánico es esencial para desarrollar prototipos y piezas funcionales adaptadas a las necesidades de la industria local en Baja California. Permite experimentar con diferentes materiales compuestos, ajustar los diseños para maximizar el desempeño mecánico y reducir desperdicios, y preparar archivos optimizados para los procesos de impresión FDM. Además, el dominio de estas herramientas fortalece la capacidad del departamento de diseño para **innovar** y responder rápidamente a los **retos** que plantea la manufactura avanzada.

3.4.2 Importancia del software en el prototipado

El software de diseño CAD es bastante importante para el prototipado porque permite crear modelos 3D precisos y detallados antes de imprimir cualquier pieza. Con estas herramientas, es posible visualizar y modificar cada elemento del diseño de forma fácil y rápida. Si algo no resulta como se esperaba al diseño inicial, se pueden hacer ajustes al instante, sin necesidad de gastar materiales ni tiempo en fabricar prototipos físicos que podrían no funcionar, que esta viene siendo la mayor ventaja el contar con un departamento de diseño.

Esta posibilidad de corregir y experimentar es clave para el proceso de desarrollo. El software CAD da la libertad de probar diferentes ideas, cambiar dimensiones,

ajustar la geometría o analizar cómo se comportaría la pieza bajo distintas condiciones, todo desde la computadora. Así, se pueden explorar múltiples opciones y encontrar la mejor solución antes de imprimir.

Además, el uso de CAD facilita la colaboración entre los miembros del equipo, ya que los modelos digitales se pueden compartir y revisar fácilmente. Esto ayuda a detectar errores y mejorar el diseño antes de pasar a la fabricación, es decir, se puede estar pasando los diseños o los archivos de diseño entre compañeros para poder notar errores de diseño.

En el contexto de este proyecto, el software CAD, como CATIA, ha sido parte clave para diseñar y preparar los modelos que después se imprimirán en 3D. Gracias a estas herramientas, es posible asegurar que los prototipos cumplan con los requisitos de tolerancias y tecnicismos y se adapten tanto a las capacidades de la impresora como a las propiedades de los materiales seleccionados. La posibilidad de modificar rápidamente el diseño y seguir experimentando hace que el software CAD sea un aliado indispensable para transformar ideas en soluciones funcionales y confiables.

3.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos utilizados en impresión 3D, como los reforzados con fibras de carbono o vidrio, destacan por su capacidad de mejorar significativamente las propiedades mecánicas de las piezas impresas, en comparación con los polímeros convencionales. Estos compuestos combinan una matriz plástica, por ejemplo, PLA, ABS, PETG o policarbonato con refuerzos en forma de fibras cortas o continuas, permitiendo obtener piezas más resistentes, rígidas y estables

Una de las propiedades más relevantes que se han comentado es la resistencia a la tracción y a la flexión. La incorporación de fibras, especialmente de carbono o vidrio, puede aumentar notablemente la capacidad de un material para soportar

cargas sin romperse ni deformarse. Por ejemplo, se ha demostrado que los compuestos impresos con fibras continuas presentan una resistencia a la tracción superior a la de los polímeros puros o incluso a otros tipos de refuerzos, como fibras naturales. Además, el módulo elástico también se incrementa, lo que significa que las piezas se vuelven más rígidas y menos propensas a la deformación bajo carga

El desempeño mecánico de estos materiales depende en gran medida de la orientación de las fibras y del porcentaje de refuerzo (Por eso mismo se obtuvo en filamento de vidrio dos distintas concentraciones para revisar cómo es que podría afectar esa concentración al filamento). Piezas impresas con fibras alineadas en la dirección de la carga muestran mejores resultados en pruebas de tracción y flexión, mientras que un mayor contenido de fibra, hasta cierto punto, mejora la rigidez y la resistencia, aunque puede hacer que el material sea más frágil o difícil de imprimir

Otra ventaja importante de los compuestos es su estabilidad dimensional, es decir, su capacidad para mantener la forma bajo carga o cambios de temperatura. Los materiales reforzados con fibra de vidrio, por ejemplo, suelen mostrar menos deformación y mejor desempeño en ambientes exigentes. Sin embargo, la resistencia al impacto puede variar según el tipo y la cantidad de refuerzo: mientras que algunos compuestos ganan tenacidad, otros pueden volverse más quebradizos si el contenido de fibra es muy alto

Finalmente, las propiedades mecánicas finales no solo dependen de la composición del filamento, sino también de los parámetros de impresión, como la temperatura, la altura de capa, la velocidad y la orientación de las capas. Ajustar estos parámetros permite optimizar la unión entre capas y la distribución del refuerzo, lo que influye directamente en la resistencia y durabilidad de la pieza impresa.

Por todo lo anterior, resulta fundamental contar con información experimental y comprobada sobre cómo influyen los diferentes tipos de refuerzos y sus concentraciones en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos utilizados en impresión 3D. Es precisamente este el objetivo central del presente proyecto: generar datos concretos y verificables que permitan comparar el desempeño de distintos materiales compuestos, como los filamentos de fibra de carbono, fibra de vidrio al 10% y 25%, y policarbonato reforzado con fibra de vidrio, respecto a los polímeros convencionales. Así, se busca aportar evidencia sólida para la selección y aplicación de estos materiales en el diseño y prototipado de piezas funcionales dentro de la industria local e internacional.

3.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS PARA IMPRESIÓN 3D

Además de las propiedades mecánicas, el comportamiento térmico de los materiales compuestos utilizados en impresión 3D tiene un papel fundamental tanto durante el proceso de fabricación como en el desempeño final de las piezas. Propiedades como la temperatura de transición vítrea, la resistencia a la deformación por calor y la estabilidad térmica determinan hasta qué punto una pieza puede trabajar en ambientes de elevadas temperaturas sin deformarse, ablandarse o degradarse.

En términos generales, los polímeros base empleados en este trabajo presentan comportamientos térmicos distintos. El ABS y el PETG se consideran termoplásticos de ingeniería de prestaciones medias, adecuados para aplicaciones que no estén sometidas a temperaturas demasiado altas, mientras que el policarbonato se caracteriza por una mayor resistencia al calor y una temperatura de transición vítrea más elevada. Cuando estos polímeros se refuerzan con fibras de carbono o de vidrio, no solo cambia su rigidez y resistencia mecánica, sino también la forma en que se calientan, se enfrían y resisten la degradación térmica.

La presencia de fibra suele mejorar la estabilidad dimensional a temperatura, es decir, ayuda a que las piezas se deformen menos cuando se exponen a fuentes de calor o a ciclos térmicos. En el caso de la fibra de vidrio, por ejemplo, su naturaleza inorgánica y térmicamente estable hace que actúe como un esqueleto que limita la contracción o el pandeo de la matriz polimérica. De manera similar, las fibras de carbono aportan buena resistencia térmica y pueden contribuir a que la pieza conserve su forma en rangos de temperatura donde un polímero convencional comenzaría a ablandarse. No obstante, el efecto exacto depende de la cantidad de refuerzo, del tipo de matriz y de cómo estén distribuidas las fibras dentro del material.

Estas propiedades térmicas no solo influyen en el uso final de las piezas, sino también en la propia impresión 3D. La selección de la temperatura de extrusión, de la cama caliente y de las condiciones de enfriamiento está directamente relacionada con la respuesta térmica del material. Si la estabilidad térmica es insuficiente, pueden aparecer problemas como degradación del filamento durante la impresión, emisión excesiva de humos, pérdida de propiedades mecánicas o deformaciones no deseadas en la pieza. Por el contrario, un material con buen comportamiento térmico permite trabajar con márgenes de seguridad más amplios y obtener piezas más confiables.

Debido a lo anterior, resulta importante no solo conocer las propiedades térmicas reportadas por los fabricantes, sino también verificarlas de manera experimental. En este proyecto se recurre al análisis termogravimétrico (TGA) como herramienta para evaluar la estabilidad térmica de los materiales y estimar el contenido real de refuerzo inorgánico presente en cada filamento. Los resultados obtenidos se presentan y discuten en el capítulo 5, donde se analizan tanto la cantidad de residuo asociado a la fase de refuerzo como las temperaturas a las que inicia y se desarrolla la degradación térmica de cada compuesto.

3.7 APLICACIONES INDUSTRIALES DE MATERIALES AVANZADOS EN IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D han estado transformando y siguen transformando la manera en que la industria diseña y fabrica piezas, permitiendo la producción de componentes personalizados, funcionales y, en muchos casos, finales. Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en sectores tan diversos como la medicina, la electrónica, la automoción, la aeroespacial y la manufactura de bienes de consumo, gracias a la versatilidad de los materiales disponibles y la capacidad de adaptar los procesos a necesidades específicas.

3.7.1 Polímeros convencionales

Materiales como PLA, ABS y PETG siguen siendo ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su bajo costo, facilidad de impresión y propiedades adecuadas para prototipos, modelos de validación y piezas de bajo esfuerzo. Por ejemplo, el PLA se utiliza frecuentemente para fabricar modelos anatómicos en medicina o prototipos de diseño en arquitectura. El ABS, por su parte, es común en la producción de carcasas, piezas automotrices ligeras y componentes para electrodomésticos, gracias a su resistencia y estabilidad térmica.

3.7.2 Filamentos compuestos

El desarrollo de filamentos reforzados con fibras de carbono, vidrio o incluso materiales conductores ha ampliado el rango de aplicaciones industriales. Estos materiales permiten fabricar piezas con mayor resistencia mecánica, rigidez y, en algunos casos, propiedades funcionales adicionales como conductividad eléctrica o resistencia química. Por ejemplo, los compuestos de fibra de carbono se emplean en la industria automotriz y aeroespacial para fabricar soportes estructurales ligeros, herramientas personalizadas y componentes que requieren alta relación resistencia-peso. Los filamentos con fibra de vidrio se utilizan en la producción de piezas que deben mantener su forma bajo carga o en condiciones

ambientales exigentes, como soportes industriales, piezas de maquinaria y partes sometidas a desgaste.

3.7.3 Aplicaciones reales

En el sector médico, la impresión 3D con polímeros y compuestos ha permitido la fabricación de prótesis personalizadas, guías quirúrgicas y modelos anatómicos para planificación de cirugías, mejorando la precisión y reduciendo tiempos de intervención, en los cuales han sido los casos más sonados sobre la impresión 3D, la incompatibilidad en la medicina,

En la industria electrónica y de robótica, se emplean materiales compuestos para crear carcasas resistentes, piezas de ensamblaje y componentes funcionales que requieren propiedades específicas como aislamiento térmico o conductividad.

En el ámbito de la fabricación de herramientas, los filamentos compuestos han hecho posible producir utillajes a medida, plantillas de ensamblaje y soportes para líneas de producción, reduciendo el tiempo y costo de desarrollo frente a los métodos convencionales.

Cabe destacar que, en la etapa inicial de este proyecto, se consideró utilizar PEEK (poliéter éter cetona) como material principal. PEEK es un polímero de alto desempeño ampliamente reconocido en la industria por su excelente resistencia térmica, química y mecánica, así como por su biocompatibilidad. De hecho, PEEK se utiliza frecuentemente en aplicaciones médicas, especialmente en implantes ortopédicos y dentales, debido a que su módulo elástico es similar al del hueso humano y su comportamiento es estable en el cuerpo. Sin embargo, su alto costo y la necesidad de equipos de impresión especializados hacen que trabajar con este material implique un riesgo considerable si se producen errores o desperdicios durante el proceso. Por esta razón, se optó por emplear filamentos compuestos más accesibles, como PETG con fibra de carbono, ABS-GF, Ultra

ABS GF25 y GFPC, que permiten mantener la innovación y la calidad en el proyecto, pero con mayor viabilidad económica y operativa.

3.8 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE FILAMENTOS DE FIBRA DE CARBONO Y FIBRA DE VIDRIO

En los últimos años, la investigación sobre filamentos de fibra de carbono y fibra de vidrio para impresión 3D ha mostrado avances notables en el desarrollo de piezas con alto desempeño mecánico. Por ejemplo, un estudio publicado en 2023 por Wang et al. revisó el estado actual de la impresión 3D con fibra de carbono, destacando que la incorporación de este refuerzo mejora considerablemente la rigidez, la resistencia y la reducción de peso de las piezas, lo que ha permitido su adopción en sectores como la automoción y la aeroespacial.

En 2019, Liu (et al). desarrollaron un método de impresión 3D para materiales compuestos de fibra de carbono continua, utilizando una impresora de doble boquilla para insertar capas de fibra en una matriz de PLA. Sus experimentos demostraron que las muestras reforzadas presentaron un aumento significativo en la resistencia a la tracción y la rigidez en comparación con el PLA puro, confirmando el potencial de esta tecnología para aplicaciones estructurales.

Otro trabajo relevante de 2022, realizado por Goh (et al)., analizó la influencia de la orientación de las fibras en la resistencia de compuestos impresos por FFF (Fused Filament Fabrication). Los resultados mostraron que la alineación adecuada de las fibras continuas de carbono en la dirección de la carga puede incrementar notablemente la resistencia y el módulo elástico de las piezas, acercando su desempeño al de materiales compuestos tradicionales.

En cuanto a la fibra de vidrio, investigaciones recientes han evaluado la calidad superficial y el comportamiento mecánico de filamentos reforzados, como el PETG con 20% de fibra de carbono, demostrando que estos materiales no solo mejoran la resistencia, sino que también mantienen una buena maquinabilidad y calidad

superficial durante procesos posteriores, como el mecanizado, según un estudio experimental publicado en 2024.

Además, estudios como el de Zhang (et al, 2023) han investigado el efecto de la concentración de fibra de carbono en compuestos de PA6 (nylon), encontrando que un mayor contenido de fibra refuerza la pieza, pero también puede afectar la homogeneidad y la facilidad de impresión, lo que resalta la importancia de optimizar tanto el material como los parámetros de impresión para cada aplicación.

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen los materiales utilizados y los métodos empleados para la fabricación y caracterización de las muestras.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS

4.1.1 Filamento de Fibra de Carbono

El filamento de **PETG reforzado con fibra de carbono** (PETG-CF) es un material compuesto ampliamente utilizado en impresión 3D FDM para aplicaciones que requieren alta rigidez, resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Este material combina una matriz de PETG —conocido por su facilidad de impresión, resistencia química y baja contracción térmica— con fibras cortas de carbono (generalmente entre 10% y 20% en peso), que actúan como refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas del polímero base.

Características clave (según estudios experimentales):

- **Resistencia a la tracción:** Entre **50-65 MPa** en condiciones óptimas de impresión, dependiendo de la orientación de las fibras y los parámetros utilizados.
- **Módulo de elasticidad:** Aumenta hasta **5-6 GPa**, lo que lo hace hasta tres veces más rígido que el PETG puro.
- **Estabilidad térmica:** Temperatura de transición vítrea (T_g) de **~80-85°C**, lo que permite su uso en entornos moderadamente cálidos.
- **Densidad:** Aproximadamente **1.3 g/cm³**, ofreciendo una relación resistencia-peso favorable para aplicaciones ligeras.

Parámetros de impresión recomendados (basados en literatura):

- **Temperatura de extrusión:** 240-260°C para garantizar una adecuada fluidez y adhesión entre capas.
- **Velocidad de impresión:** 30-50 mm/s para minimizar la desalineación de fibras y evitar defectos.

- **Relleno:** 80-100% con patrón unidireccional o hexagonal para maximizar la resistencia en dirección de carga.
- **Boquilla:** Acero endurecido o de ruby para reducir el desgaste por abrasión de las fibras.

Aplicaciones industriales reportadas:

- **Componentes estructurales ligeros:** Soporte para drones, bastidores de equipos electrónicos y piezas automotrices no críticas.
- **Herramientas y utillajes:** Plantillas de montaje, soportes personalizados para líneas de producción y prototipos funcionales.
- **Piezas sometidas a vibración:** Gracias a su alta relación amortiguación-resistencia, se utiliza en sistemas de sujeción y acoplamientos mecánicos.

Consideraciones para este proyecto:

En esta investigación, el PETG-CF se empleará para fabricar probetas multidireccionales, donde la distribución aleatoria de fibras cortas dentro de la matriz polimérica proporcionará un refuerzo isotrópico. Esto permitirá evaluar su comportamiento bajo cargas complejas y compararlo con otros materiales compuestos seleccionados. Los valores reportados aquí sirven como referencia teórica, mientras que los resultados experimentales obtenidos en el proyecto aportarán datos específicos bajo las condiciones de impresión y ensayo utilizadas

4.1.2 Filamento de Fibra de Vidrio al 10%

El filamento de **ABS reforzado con fibra de vidrio al 10%** (ABS-GF) es un material compuesto utilizado en impresión 3D FDM para aplicaciones que requieren mayor resistencia mecánica y estabilidad dimensional respecto a los polímeros convencionales. Este material combina la matriz de ABS —conocida por su resistencia al impacto, durabilidad y buena estabilidad térmica— con fibras cortas de vidrio (aproximadamente 10% en peso), que actúan como refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas del polímero base. El filamento empleado en este proyecto es fabricado por Siraya Tech.

Características clave (según estudios experimentales y datos de fabricante):

- **Resistencia a la tracción:** Entre **40-55 MPa** en condiciones óptimas de impresión, dependiendo de la orientación de las fibras y los parámetros utilizados.
- **Módulo de elasticidad:** Puede alcanzar valores de **2.5-3.5 GPa**, lo que lo hace más rígido que el ABS puro.
- **Estabilidad térmica:** Temperatura de transición vítrea (T_g) de **~100-105°C**, permitiendo su uso en ambientes con temperaturas moderadamente elevadas.
- **Densidad:** Aproximadamente **1.1-1.2 g/cm³**, lo que mantiene una buena relación resistencia-peso.
- **Resistencia al impacto:** Mejorada respecto al ABS puro, gracias al efecto de las fibras de vidrio en la absorción de energía durante la fractura.

Parámetros de impresión recomendados (basados en recomendaciones de fabricante y experiencia práctica):

- **Temperatura de extrusión:** **250-270°C** para asegurar una buena fusión y adhesión entre capas.
- **Velocidad de impresión:** **30-200 mm/s**, dependiendo del diseño de la pieza y la configuración de la impresora.
- **Relleno:** **80-100%** con patrón unidireccional o hexagonal para maximizar la resistencia en dirección de carga.
- **Boquilla:** **Acero endurecido o de ruby** para reducir el desgaste por abrasión de las fibras de vidrio.
- **Almacenamiento:** Es fundamental **mantener el filamento seco** para evitar problemas de humedad que puedan afectar la calidad de impresión y las propiedades mecánicas finales.

Aplicaciones industriales reportadas:

- **Componentes estructurales:** Piezas sometidas a cargas mecánicas moderadas, como soportes, carcasas y accesorios industriales.
- **Herramientas y utillajes:** Plantillas de montaje, soportes personalizados y prototipos funcionales en líneas de producción.
- **Piezas sometidas a vibración:** Gracias a su mayor amortiguación y resistencia al impacto, se utiliza en sistemas de sujeción y componentes expuestos a esfuerzos dinámicos.

Consideraciones para este proyecto:

En esta investigación, el ABS-GF de Siraya Tech se empleará para fabricar probetas multidireccionales, donde la distribución aleatoria de fibras cortas de vidrio dentro de la matriz polimérica proporcionará un refuerzo isotrópico. Esto permitirá evaluar su comportamiento bajo diferentes tipos de carga y compararlo con otros materiales compuestos seleccionados. Los valores reportados aquí sirven como referencia teórica y de fabricante, mientras que los resultados experimentales obtenidos en el proyecto aportarán datos específicos bajo las condiciones de impresión y ensayo utilizadas.

4.1.3 Filamento de Fibra de Vidrio al 25%

El filamento de **ABS reforzado con fibra de vidrio al 25%** (Ultra ABS GF25) es un material compuesto de alto desempeño diseñado para aplicaciones que requieren una combinación superior de rigidez, resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Este tipo de filamento, fabricado por QIDITECH, integra una matriz de ABS con un refuerzo significativo de fibras cortas de vidrio (aproximadamente 25% en peso), lo que genera una mejora sustancial en las propiedades mecánicas respecto al ABS convencional y a los compuestos con menor porcentaje de fibra.

Características clave (según estudios experimentales y literatura científica):

- **Resistencia a la tracción:** Puede superar los **60 MPa** en condiciones óptimas de impresión, dependiendo de la orientación de las fibras y los parámetros utilizados.
- **Módulo de elasticidad:** Se reportan valores de **4-5 GPa**, lo que representa una rigidez notablemente mayor que el ABS puro o el ABS-GF al 10%.
- **Estabilidad térmica:** Temperatura de transición vítrea (T_g) de **$\sim 105^\circ\text{C}$** , permitiendo su uso en entornos industriales con temperaturas elevadas.
- **Densidad:** Aproximadamente **1.3-1.4 g/cm³**, lo que sigue ofreciendo una buena relación resistencia-peso para aplicaciones estructurales.
- **Resistencia al impacto:** Aunque la rigidez aumenta, el material puede volverse algo más frágil a medida que se incrementa el contenido de fibra, por lo que es ideal para piezas que priorizan estabilidad y resistencia a la deformación sobre la flexibilidad.

Parámetros de impresión recomendados (basados en literatura y experiencia práctica):

- **Temperatura de extrusión:** **250-270°C** para asegurar una buena fusión y adhesión entre capas.
- **Velocidad de impresión:** **40-200 mm/s**, dependiendo de la geometría de la pieza y la configuración de la impresora.
- **Relleno:** **80-100%** con patrón estructural para maximizar la resistencia.
- **Boquilla:** Es recomendable utilizar boquillas de acero endurecido o rubí para evitar el desgaste acelerado por la abrasión de las fibras de vidrio.
- **Almacenamiento:** Mantener el filamento seco es fundamental, ya que la absorción de humedad puede afectar la calidad de impresión y las propiedades mecánicas.

Aplicaciones industriales reportadas:

- **Piezas estructurales de alta exigencia:** Soportes, carcasas, componentes de maquinaria y partes sometidas a cargas constantes o ambientes industriales severos.

- **Herramientas y utillajes robustos:** Plantillas de montaje, soportes personalizados y elementos de fijación en líneas de producción.
- **Componentes resistentes a la deformación:** Especialmente útiles en aplicaciones donde la estabilidad dimensional es crítica, como piezas de precisión o partes sometidas a vibración y calor.

Consideraciones para este proyecto:

En esta investigación, el Ultra ABS GF25 de QIDITECH se empleará para fabricar probetas multidireccionales, aprovechando la alta concentración de fibras de vidrio para evaluar el comportamiento del material bajo diferentes tipos de carga. Los valores reportados aquí sirven como referencia teórica y de literatura científica, mientras que los resultados experimentales obtenidos en el proyecto aportarán datos específicos bajo las condiciones de impresión y ensayo utilizadas.

4.1.4 Filamento de Fibra de Vidrio con Policarbonato

El filamento de **policarbonato reforzado con fibra de vidrio** (GFPC) es un material compuesto avanzado desarrollado para aplicaciones que requieren una combinación de alta resistencia mecánica, rigidez y estabilidad térmica. Este filamento, fabricado por RANKI, integra una matriz de policarbonato —reconocido por su tenacidad y resistencia al impacto— con fibras cortas de vidrio (en porcentajes variables, típicamente entre 10% y 20% en peso), lo que mejora notablemente las propiedades estructurales del material base.

Características clave (según literatura científica y datos de fabricante):

- **Resistencia a la tracción:** Puede situarse en el rango de **60-75 MPa**, dependiendo de la orientación de las fibras y los parámetros de impresión, superando ampliamente al policarbonato puro.
- **Módulo de elasticidad:** Se reportan valores de **3.5-5.5 GPa**, lo que aporta una rigidez considerable para aplicaciones estructurales exigentes.

- **Estabilidad térmica:** El policarbonato tiene una temperatura de transición vítrea (T_g) de ~**140-150°C**, lo que permite su uso en ambientes de alta temperatura sin pérdida significativa de propiedades mecánicas.
- **Densidad:** Aproximadamente **1.3-1.4 g/cm³**, manteniendo una buena relación resistencia-peso.
- **Resistencia al impacto:** El policarbonato es conocido por su excelente tenacidad, y el refuerzo con fibra de vidrio mantiene o incluso mejora esta propiedad, permitiendo su uso en piezas sometidas a esfuerzos dinámicos o impactos.

Parámetros de impresión recomendados (basados en literatura y recomendaciones de fabricante):

- **Temperatura de extrusión:** **260-280°C** para garantizar una adecuada fusión y adhesión entre capas.
- **Velocidad de impresión:** **40-100 mm/s**, ajustable según la complejidad de la pieza y la capacidad de la impresora.
- **Relleno:** **80-100%** con patrón estructural para maximizar la resistencia.
- **Boquilla:** Se recomienda utilizar boquillas de acero endurecido o ruby para prevenir el desgaste acelerado por la abrasión de las fibras de vidrio.
- **Almacenamiento:** Es fundamental mantener el filamento seco, ya que la absorción de humedad puede afectar negativamente la calidad de impresión y las propiedades mecánicas finales.

Aplicaciones industriales reportadas:

- **Componentes estructurales de alta exigencia:** Piezas para maquinaria, carcasas, soportes y elementos sometidos a cargas constantes o ambientes industriales severos.
- **Herramientas y utillajes robustos:** Plantillas de montaje, soportes personalizados y piezas funcionales en líneas de producción.

- **Partes sometidas a calor o impacto:** Gracias a la alta resistencia térmica y al impacto, es ideal para aplicaciones automotrices, eléctricas y de ingeniería avanzada.

Consideraciones para este proyecto:

En esta investigación, el filamento GFPC de RANKI se empleará para fabricar probetas multidireccionales, aprovechando la sinergia entre la tenacidad del policarbonato y la rigidez de la fibra de vidrio. Los valores presentados aquí sirven como referencia teórica y de literatura científica, mientras que los resultados experimentales obtenidos en el proyecto aportarán datos específicos bajo las condiciones de impresión y ensayo utilizadas.

En la práctica, **hay muchas coincidencias** porque todos estos materiales se usan para fabricar componentes estructurales, soportes, herramientas y piezas funcionales en la industria. Sin embargo, **cada uno tiene ventajas específicas según sus propiedades:**

- **PETG-CF** es más ligero y rígido, ideal para aplicaciones donde el peso es crítico.
- **ABS-GF** y **Ultra ABS GF25** se centran en la resistencia y estabilidad dimensional, siendo el segundo más rígido y adecuado para cargas más altas.
- **GFPC** destaca por su resistencia térmica y al impacto, siendo preferido en ambientes extremos o donde se requiere alta durabilidad.

4.2 EQUIPOS Y CONDICIONES DE IMPRESIÓN

En este apartado se describen los equipos y condiciones utilizados para la impresión 3D de las piezas y probetas del presente proyecto. Se detallan las características técnicas de la impresora empleada, el software de diseño 3D utilizado para el modelado de las piezas, así como el software para la generación del código de impresión (G-code). La información presentada en este apartado es

fundamental para garantizar la reproducibilidad de los resultados y la correcta comparación con otros estudios en el área de manufactura aditiva.

Todas las impresiones se realizaron en el Laboratorio de Manufactura Avanzada del Instituto de Ingeniería, bajo condiciones controladas de temperatura ambiente (aproximadamente 20–25°C) y humedad relativa estable. La impresora se mantuvo en una superficie estable y nivelada, alejada de corrientes de aire directas y fuentes de calor externas. Antes de cada impresión, se verificó la nivelación de la cama y la limpieza de la superficie de impresión, y el filamento se almacenó en condiciones secas para evitar la absorción de humedad. Estas condiciones permitieron garantizar la reproducibilidad y calidad de las piezas fabricadas.

4.2.1 Impresora 3D utilizada: Modelo y Características

Durante la etapa inicial del proyecto, se utilizó la impresora 3D Creality Ender 3 debido a su amplia disponibilidad y facilidad de uso en el laboratorio de manufactura. Sin embargo, a medida que avanzó el trabajo y se comenzaron a imprimir filamentos compuestos más exigentes, se observaron dificultades técnicas con la Ender 3, principalmente relacionadas con la estabilidad de la extrusión y la adaptación a materiales reforzados. Estas limitaciones motivaron la transición a una impresora más avanzada, la Creality K1C, que ofrece mayores prestaciones y mejor compatibilidad con los materiales seleccionados para el estudio.

En la *Tabla 1* y *Tabla 2*, se describen las características técnicas de la Ender 3 y de la K1C. Los detalles específicos sobre los problemas encontrados y el impacto de este cambio en el desarrollo experimental se abordan en el apartado **6.3 Limitaciones del estudio.**

Tabla 1. Especificaciones de Creality Ender 3.

Característica	Especificación
Tecnología de impresión	Fused deposition modeling
Volumen	220×220×250mm
Dimensiones del producto	440×410×465mm
Dimensiones del embalaje	600×350×160mm
Peso neto	6.7 kg (según etiqueta del equipo)
Peso bruto	10 kg
Velocidad de impresión	≤180mm/s
Aceleración	No especificada
Precisión de impresión	±0.1mm
Altura de capa	0.1-0.35mm
Extrusora	Sistema Bowden
Diámetro del filamento	1.75mm
Diámetro de la boquilla	0.4mm
Temperatura de la boquilla	≤255°C
Temperatura del lecho térmico	≤110°C
Superficie de construcción	Cama calefactada con superficie extraíble
Modo de nivelación	Nivelación manual
Transferencia de archivos	Tarjeta SD, USB
Pantalla	Pantalla LCD básica
Tensión nominal	100-120V~, 200-240V~, 50/60Hz
Potencia nominal	360W
Filamentos soportados	PLA, ABS, PETG, TPU, filamentos compuestos (con boquilla adecuada)
Formato de archivo imprimible	G-Code
Software de corte	Creality Print, Cura 5.0 y versiones posteriores
Formatos de archivo para el corte	STL, OBJ, 3MF
Idiomas de la interfaz de usuario	Inglés, español, alemán, francés, ruso, portugués, italiano, turco, japonés, chino

Nota: Los datos de la tabla corresponden a las especificaciones técnicas oficiales del fabricante (Creality) y a la etiqueta del equipo utilizado. **Fuente:** Manual de usuario Creality Ender 3, disponible en la web oficial de Creality.

Tabla 2. Especificaciones de Creality K1C

Característica	Especificación
Tecnología de impresión	Fused deposition modeling
Volumen	220 × 220 × 250 mm
Dimensiones del producto	355 × 355 × 482 mm
Dimensiones del embalaje	441 × 441 × 578 mm
Peso neto	12.4 kg
Peso bruto	16 kg
Velocidad de impresión	≤600 mm/s
Aceleración	≤20000 mm/s ²
Precisión de impresión	100 ± 0.1 mm
Altura de capa	0.1 – 0.35 mm
Extrusora	Extrusora de accionamiento directo de doble engranaje
Diámetro del filamento	1.75 mm
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Temperatura de la boquilla	≤300 °C
Temperatura del lecho térmico	≤100 °C
Superficie de construcción	PEI placa de construcción flexible
Modo de nivelación	Nivelación automática sin manos
Transferencia de archivos	Unidad USB, WiFi
Pantalla	Pantalla táctil en color de 4.3 pulgadas
Cámara AI	Sí
Recuperación de pérdida de potencia	Sí
Sensor de desviación del filamento	Sí
Purificador de aire	Sí
Conformación de entrada	Sí
Kit de iluminación	Sí
Modo de reposo	Sí
Tensión nominal	100-120V~, 200-240V~, 50/60Hz

Potencia nominal	350 W
Filamentos soportados	ABS, PLA, PETG, PET, TPU, PA, ABS, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF
Formato de archivo imprimible	G-Code
Software de corte	Creality Print, Cura 5.0 y versiones posteriores
Formatos de archivo para el corte	STL, OBJ, 3MF
Idiomas de la interfaz de usuario	Inglés, español, alemán, francés, ruso, portugués, italiano, turco, japonés, chino

Nota: Los datos de la tabla corresponden a las especificaciones técnicas oficiales del fabricante (Creality) y a la información proporcionada en la documentación técnica del modelo K1C.
Fuente: Especificaciones técnicas Creality K1C, disponible en la web oficial de Creality.

4.2.2 Software de diseño utilizado

En este proyecto, el software CATIA ha sido la principal herramienta utilizada para todo el modelado en 3D de las piezas de análisis y prototipos que se han desarrollado. CATIA es bastante reconocido en la industria por su capacidad para manejar geometrías complejas y por ofrecer una gran gama de opciones de diseño y simulación, lo que me permite crear modelos precisos y adaptados a los requerimientos técnicos de cada pieza. Su uso facilita el proceso de diseño, la revisión de detalles y la preparación de los archivos necesarios para la impresión, asegurando que los prototipos sean funcionales y acordes a las necesidades del proyecto, sumándole a lo sencillo que es adaptarse a sus opciones de diseño.

Para el modelado 3D se seleccionó CATIA como herramienta principal, elegida por su reconocida capacidad para manejar geometrías complejas y su amplia compatibilidad con sistemas CAM industriales. Esta plataforma facilitó la creación precisa de probetas tipo 1B conforme a ISO 527-4 y componentes estructurales de diseño intrincado.

Tinkercad fue empleado de forma complementaria en fases iniciales de conceptualización, permitiendo iteración rápida de diseños geométricos básicos.

Una vez definida la geometría final, se utilizó CATIA para la modelación detallada y la generación de archivos de exportación en formatos STL y STEP.

Esta combinación de herramientas refleja el enfoque práctico y flexible del proyecto, adaptándose a diferentes niveles de complejidad y aprovechando las ventajas de cada software según las necesidades del momento.

4.2.3 Software para generación de código de impresión

En la impresión 3D, uno de los pasos clave es transformar el modelo digital en instrucciones que la impresora pueda entender y ejecutar. Este proceso se realiza mediante la generación del código de impresión, conocido como G-code, que actúa como el lenguaje estándar para controlar todos los movimientos y parámetros de la impresora, el cómo se estará moviendo como tal la boquilla de la impresora y sus parámetros de impresión. El G-code traduce el diseño 3D o archivo CAD en una serie de órdenes precisas que la máquina sigue capa por capa, regulando variables como la velocidad de extrusión, la temperatura, la altura de capa y el patrón de relleno, dependiendo de lo que nosotros vayamos a utilizar o el cómo queramos la estructura de la pieza a imprimir. La calidad final, la precisión y la repetibilidad de las piezas dependen en gran medida de cómo se configuran y generan estas instrucciones.

Para este proyecto, se utilizó el software **Ultimaker Cura**, ampliamente reconocido en la comunidad de manufactura aditiva por su facilidad de uso, su compatibilidad con múltiples impresoras FDM/FFF y su capacidad para personalizar los parámetros de impresión según las necesidades del usuario. Cura permite importar archivos en formatos como STL, OBJ o 3MF, ajustar de manera intuitiva los parámetros de impresión y generar el G-code específico para cada modelo y máquina. Esta flexibilidad ha sido destacada en la literatura científica, donde se ha demostrado que el uso de Cura facilita la adaptación a diferentes materiales y geometrías, optimizando tanto la calidad superficial como las propiedades mecánicas de las piezas impresas, esto también por que cuenta con un interfaz bastante digerible, fácil de adaptarse e intuitivo, donde si tenemos

valores o parámetros de impresión completamente fuera de lo natural para la impresora que nosotros asignemos al programa, se nos notificará con código de color avisando que son parámetros no óptimos.

En la práctica, mi flujo de trabajo consistió en importar el modelo 3D (Modelos que yo mismo diseñaba) a un archivo STL, para poder abrirlo en **Cura**, seleccionar la impresora y el material, y ajustar los parámetros de impresión siguiendo tanto las recomendaciones del fabricante como la experiencia previa y la literatura especializada. Una de las ventajas más útiles de Cura es la posibilidad de pre visualizar las trayectorias de impresión y detectar posibles errores antes de iniciar la fabricación, lo que ayuda a reducir desperdicios y mejorar la eficiencia del proceso. Si bien Cura es compatible con una amplia gama de materiales, la impresión de filamentos reforzados requirió realizar ajustes adicionales en velocidad y temperatura para evitar problemas como obstrucciones en la boquilla.

4.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS PARA PRUEBAS

Para comenzar el proceso de las probetas finales que serían sometidas a la caracterización por pruebas de tensión, el proceso de diseño y fabricación de las muestras para pruebas se llevó a cabo en varias etapas, con el objetivo de caracterizar los materiales y definir la metodología más adecuada para la evaluación de sus propiedades mecánicas.

4.3.1 Preparación de muestras preliminares

Se fabricaron pequeños rectángulos impresos en 3D con cada uno de los cuatro materiales seleccionados:

- PETG con fibra de carbono
- ABS con fibra de vidrio al 10%
- Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%
- Fibra de vidrio con policarbonato

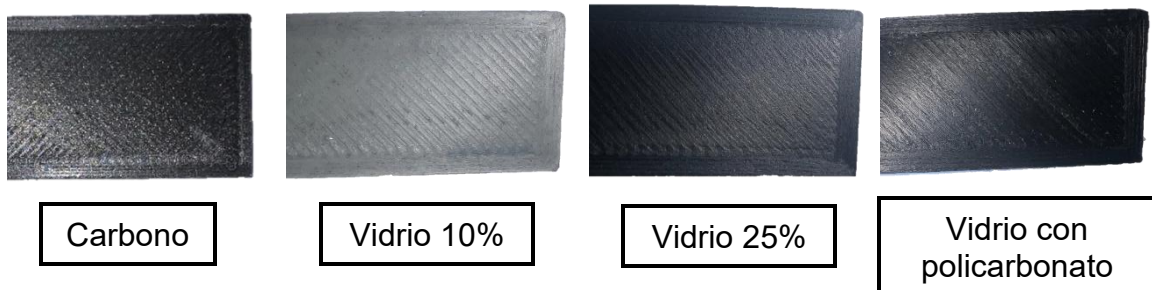


Figura 1 Impresiones rectangulares para corte transversal

Todos los materiales empleados correspondieron a filamento ya extruido, lo que permitió analizar el comportamiento real del material impreso. El objetivo de esta etapa fue analizar la orientación y distribución de las fibras en el material impreso, así como definir la norma de ensayo más adecuada.

4.3.2 Preparación y análisis de cortes para caracterización de fibras

Los rectángulos se unieron uno encima de otro, adheridos con pegamento ultra resistente, para posteriormente comenzar un proceso de corte transversal y continuar con un pulido manual, para finalizar con un pulido final con polvo de alúmina.

Al tener ya un corte transversal bastante pulido evitando imperfecciones o rebaba indeseada, se llevó a caracterización por microscopía SEM para poder ver su dirección de fibras y revisar los diámetros de las fibras que componen el refuerzo como se muestra a continuación.

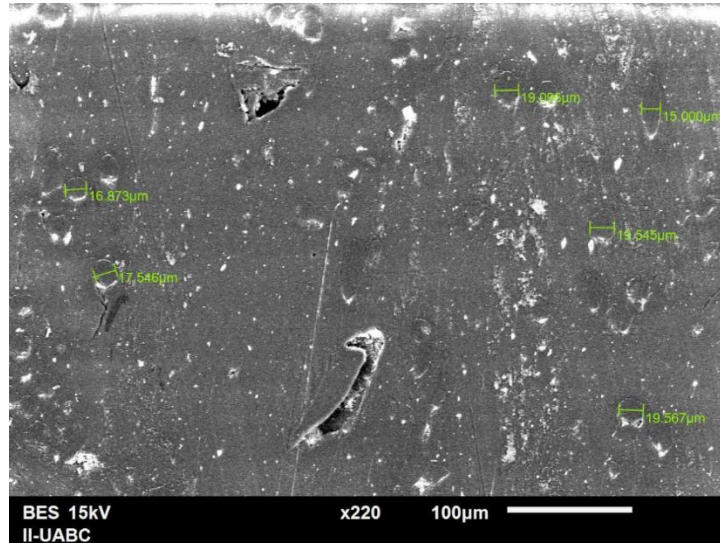


Figura 2 Imagen SEM del corte transversal de PETG con fibra de carbono

En la **figura 2** se observan fibras de carbono (elementos más oscuros) distribuidas de forma multidireccional y aleatoria en la matriz polimérica. Las fibras aparecen cortadas en diferentes ángulos: algunas longitudinalmente, otras transversalmente y en orientaciones intermedias, lo que evidencia una buena dispersión del refuerzo. El diámetro de las fibras se encuentra en el rango de 15.0 a 19.6 µm, con un promedio de 17.6 µm. Escala: 100 µm. Aumento: ×220.

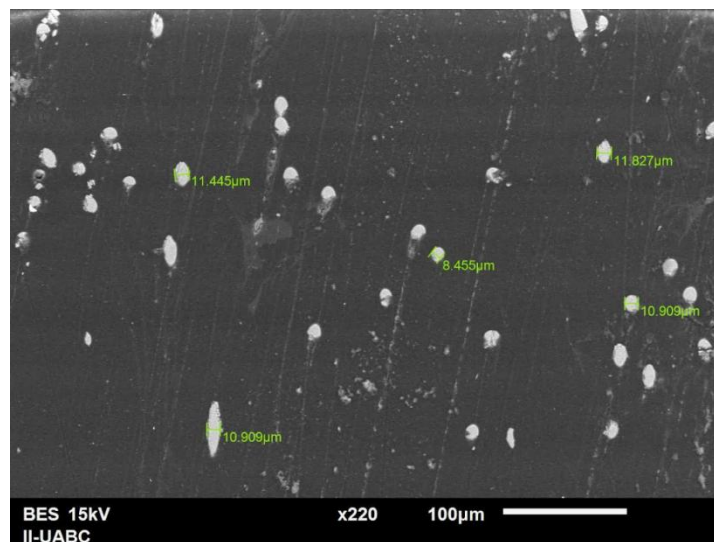


Figura 3 Imagen SEM del corte transversal de ABS con fibra de vidrio al 10%

En la **figura 3** se aprecian fibras de vidrio (elementos más claros) distribuidas de forma multidireccional y aleatoria en la matriz polimérica. Las fibras de vidrio muestran menor densidad que las muestras con mayor porcentaje, coherente con el 10% de refuerzo. Las fibras aparecen cortadas en diferentes ángulos, lo que evidencia una buena dispersión del refuerzo. El diámetro de las fibras se encuentra en el rango de 8.5 a 11.8 μm , con un promedio de 10.5 μm . Escala: 100 μm . Aumento: $\times 220$.

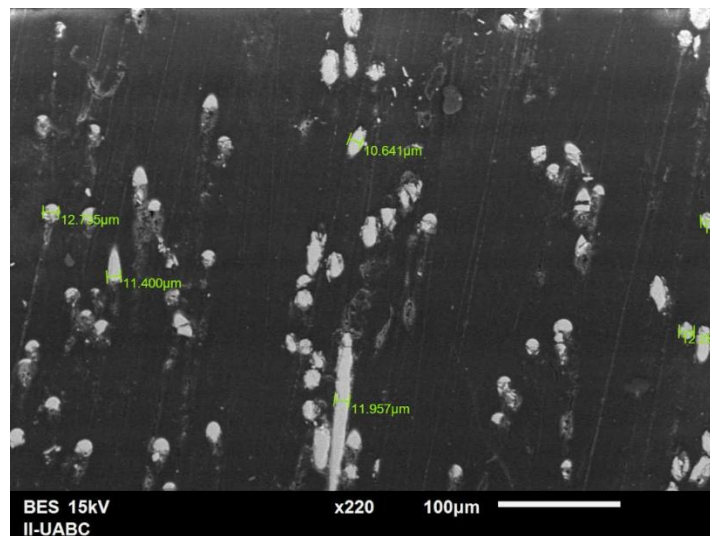


Figura 4 Imagen SEM del corte transversal de ABS con fibra de vidrio al 25%

En la **figura 4** se observan fibras de vidrio (elementos más claros) distribuidas de forma multidireccional y aleatoria en la matriz polimérica. En comparación con la muestra al 10%, la densidad de fibras es notablemente mayor, coherente con el 25% de refuerzo. Las fibras aparecen cortadas en diferentes ángulos: algunas longitudinalmente, otras transversalmente y en orientaciones intermedias, lo que evidencia una buena dispersión del refuerzo. El diámetro de las fibras se encuentra en el rango de 10.6 a 12.7 μm , con un promedio de 11.8 μm . Escala: 100 μm . Aumento: $\times 220$.

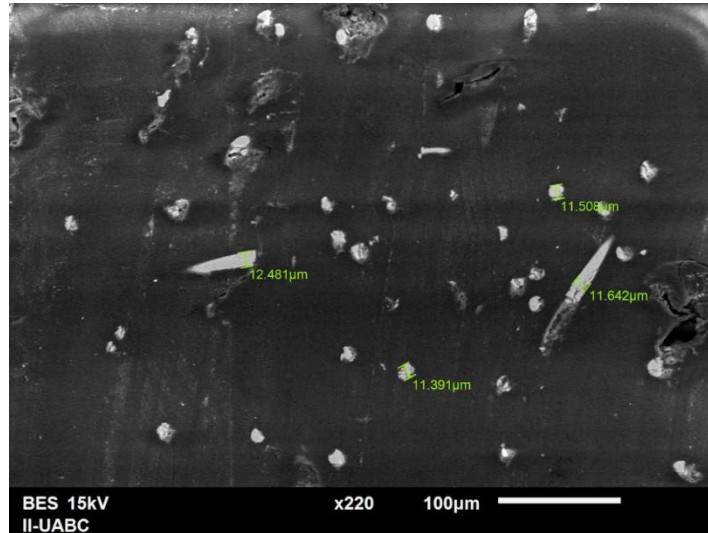


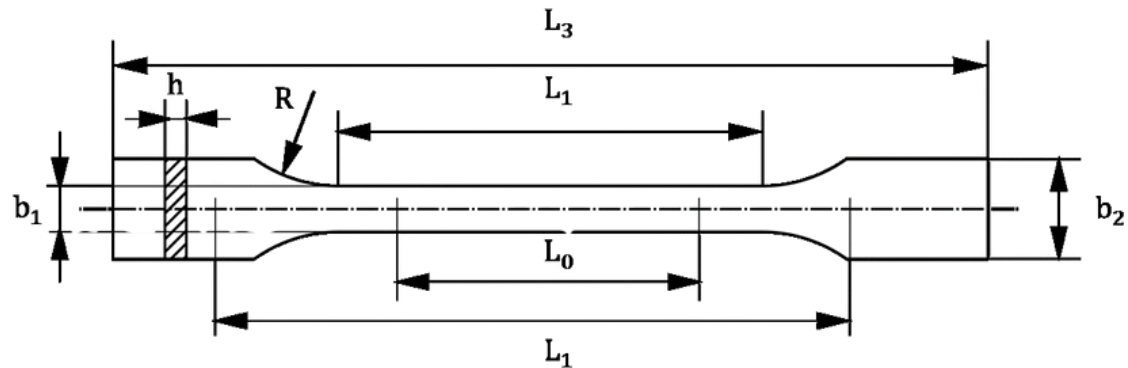
Figura 5 Imagen SEM del corte transversal de policarbonato con fibra de vidrio

En la **figura 5** Se observan fibras de vidrio (elementos más claros) distribuidas de forma multidireccional y aleatoria en la matriz polimérica. Las fibras aparecen cortadas en diferentes ángulos: algunas longitudinalmente, otras transversalmente y en orientaciones intermedias, lo que evidencia una buena dispersión del refuerzo. El diámetro de las fibras se encuentra en el rango de 11.4 a 12.5 μm, con un promedio de 11.8 μm. Escala: 100 μm. Aumento: ×220.

4.3.3 Selección de las normas de ensayo

Con base en estos resultados de análisis SEM, se observó que la distribución de las fibras de refuerzo en todos los materiales fue multidireccional y aleatoria. Por lo tanto, se realizó una revisión bibliográfica para seleccionar la norma más apropiada para el diseño y ensayo de probetas de materiales compuestos impresos 3D.

La revisión bibliográfica determinó que la norma ISO 527-4 es específica para materiales poliméricos compuestos reforzados con fibras multidireccionales, que es el caso de los materiales analizados en este trabajo. De acuerdo a lo anterior, se selecciona a ISO 527-4 como la referencia para el diseño de las probetas que se ensayarán mecánicamente. De esta forma, los resultados obtenidos serían representativos y comparables con los trabajos previos en el área.



Symbol	Name	Dimensions in millimetres
l_3	Overall length ^a	≥ 150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	$60,0 \pm 0,5$
r	Radius ^b	≥ 60
b_2	Width at ends	$20,0 \pm 0,2$
b_1	Width of narrow portion	$10,0 \pm 0,2$
h	Thickness	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	$50,0 \pm 0,5$
L	Initial distance between grips	115 ± 1

Figura 6 Geometría y dimensiones de la probeta tipo 1 según ISO 527-4

Nota: Imagen tomada de: ISO 527-4:2023, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.*

4.3.4 Diseño y fabricación de probetas según la norma ISO 527-4

Una vez que se determinó la norma que se utilizará para realizar las probetas, se procedió a realizar el diseño en 3D de acuerdo a las dimensiones señaladas por la norma. Como se comentó anteriormente se diseñó en el software de CATIA para hacer el modelo CAD y posteriormente poder exportar a archivo STL.

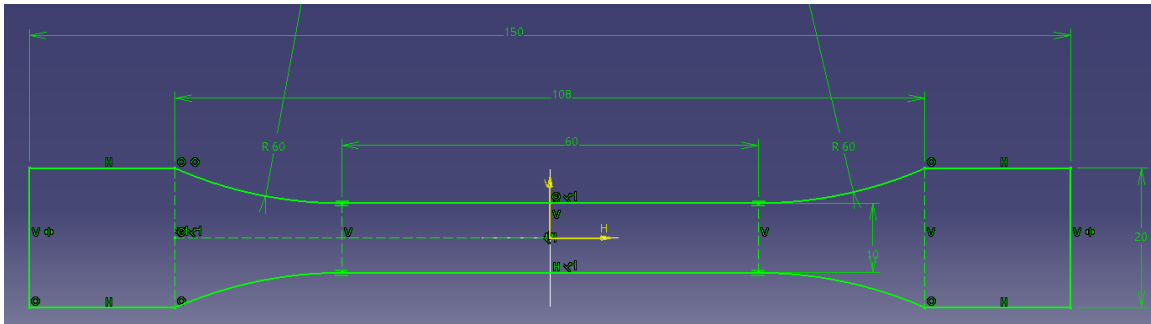


Figura 7 Geometría de diseño de probeta de acuerdo ISO 527-4, probeta tipo 1B

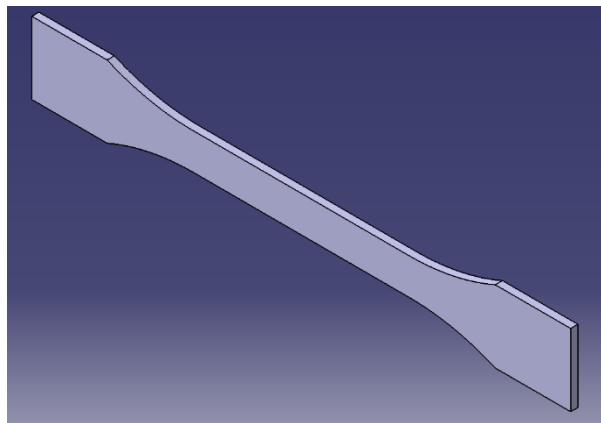


Figura 8 Modelo CAD

4.4 Modelado 3D y preparación para impresión

El modelo 3D de la probeta tipo 1B (*Figura 6*) fue diseñado en CATIA siguiendo las dimensiones y tolerancias establecidas en la norma ISO 527-4 (*Figura 7 y 8*). En este caso se optó por utilizar una dimensión de 2mm de grosor en la probeta, para estar dentro de tolerancias y ahorrar material, respetando la norma. Una vez definida la geometría, el archivo se exportó en formato STL para su posterior uso en la impresión 3D, esto para poderlo meter en el software Cura para hacer el laminado.

4.4.1 Primera metodología de fabricación (FASE 1): Impresión directa con parámetros iniciales

Inicialmente, las probetas se imprimieron directamente en la primera impresora que se estaba trabajando, la cual era la Creality Ender 3 utilizando los parámetros

predefinidos del software Ultimaker Cura, que incluían la opción de 4 paredes en la silueta, como un contorno. Esta configuración fue seleccionada sin la intención específica de incrementar la resistencia superficial, sino simplemente porque correspondía a los valores predeterminados del software. **(En este caso se fabricaron 3 probetas por cada material, Fibra de vidrio al 10%, al 25% y fibra de vidrio con policarbonato a 255 °C y fibra de carbono a 245°C).**



Figura 9 Probeta en impresión directa con paredes laterales.

4.4.1.1 Resultados preliminares

Tras la fabricación, las probetas se sometieron a ensayos mecánicos preliminares. Durante la revisión de los resultados y el proceso experimental, el director de tesis señaló que las paredes adicionales en la silueta hacían que la probeta no estuviera compuesta exclusivamente por relleno al 100% (*Figura 9*). Esto podría afectar la medición de las propiedades mecánicas del material compuesto, ya que la probeta no sería totalmente rellena y podría tener un comportamiento no deseado del material impreso.

4.4.2 Segunda metodología de fabricación (FASE 2): Corte CNC de tabletas impresas

Ante esta observación, se decidió modificar la metodología de fabricación. Para garantizar que la totalidad de la probeta estuviera compuesta por relleno al 100% y sin contornos adicionales, se imprimieron tabletas grandes de cada material compuesto en dimensiones 166 x 36 x 2 mm.

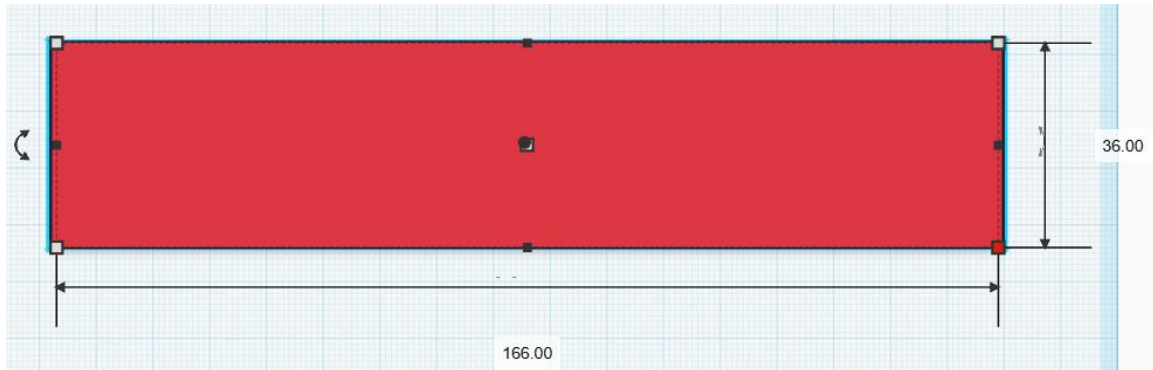


Figura 10 Modelo CAD en tinkercad



Figura 11 Tableta base

Para asegurar una evaluación rigurosa del efecto de la temperatura de impresión en las propiedades de los materiales compuestos, se imprimieron nueve tabletas por cada material (*Figura 11*). Estas se distribuyeron en **tres** grupos de **tres** tabletas cada uno, correspondientes a diferentes temperaturas recomendadas por el proveedor.

- Para el material con fibra de carbono, se imprimieron **tres** tabletas a **240 °C**, **tres** a **250 °C** y **tres** a **260 °C**.
- Para los materiales con fibra de vidrio al 10% y 25%, se imprimieron **tres** tabletas a **250 °C**, **tres** a **260 °C** y **tres** a **270 °C**.
- Finalmente, para el material de vidrio con policarbonato, se imprimieron **tres** tabletas a **260 °C**, **tres** a **270 °C** y **tres** a **280 °C**.

Esto dio un total de **36 tabletas**. Esta estrategia permitió observar posibles variaciones en el comportamiento del material debido a la temperatura de impresión, facilitando la identificación de la configuración óptima para cada material. Una nota importante es que para este caso ya se realizó el **cambio** de la impresora de **Ender a K1C**.

Posterior a esto, se realizó en colaboración con la empresa “**Representaciones Duran**” en Mexicali, B.C, en donde se entregaron las tabletas una máquina router CNC para cortar las tabletas siguiendo la silueta del modelo 3D diseñado previamente de las probetas de acuerdo con la ISO 527-4 (*Figura 12*). Este procedimiento permitió obtener probetas con propiedades mecánicas más representativas del material y adaptadas a los requerimientos de la norma ISO 527-4.

En este caso, se mandó el archivo modelo CAD a DXF, para que la cortadora de CNC lo pudiera traducir el plano en 2D, a puntos de corte, para posteriormente se pudiera comprender la silueta de la probeta, y se pudiera cortar en la misma

tableta. En este caso fue necesario realizar una fixtura para tomar la tableta y evitar movimientos que pudieran alterar la forma final de nuestra probeta.



Figura 12 Probetas cortadas después de CNC.

4.5 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS MECÁNICOS

4.5.1 Ensayos de resistencia a la tracción

Las pruebas de tensión de las probetas se llevaron a cabo en el laboratorio de la empresa PIMS Mitsubishi.

Para los ensayos se utilizó una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X Series, reconocida por su precisión y confiabilidad para pruebas mecánicas en materiales poliméricos y compuestos. El equipo cuenta con un sistema electromecánico y una celda de carga adecuada para el rango de fuerzas esperado en los materiales estudiados.

El procedimiento fue el siguiente: primero, se verificó que cada probeta cumpliera con las dimensiones requeridas y se colocaron cuidadosamente en las mordazas de la máquina, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 527-4 para polímeros compuestos con refuerzo multidireccional. Se configuró la velocidad de ensayo de acuerdo con la norma de **200 mm/min** asegurando todos los

parámetros de la máquina. En este caso la maquina cuenta con mordazas de **500 N** y otras de **50 KN**, por lo cual al desconocer la tensión que podría llegar a soportar la probeta por la naturaleza de su estructura, se decidió utilizar las mordazas de **50KN** (*Figura 13*).

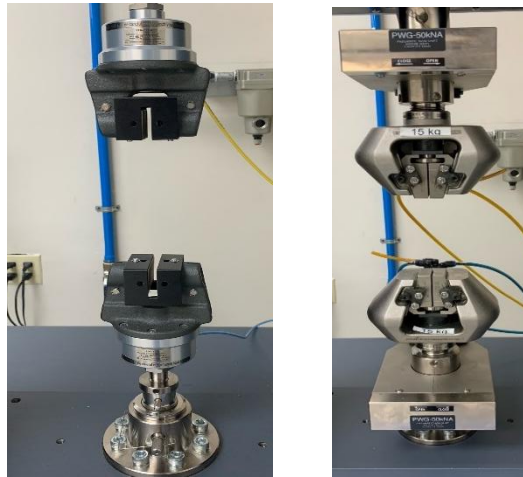


Figura 13 Mordazas de 500 N y 50 KN respectivamente.

Durante el ensayo, la máquina registró automáticamente la fuerza aplicada y el alargamiento de la probeta hasta el punto de ruptura (*Figura 14*), utilizando el software integrado para la obtención y procesamiento de datos que ya trae la máquina predeterminados. Para cada material y configuración de temperatura, se realizaron 3 pruebas, con el objetivo de asegurar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

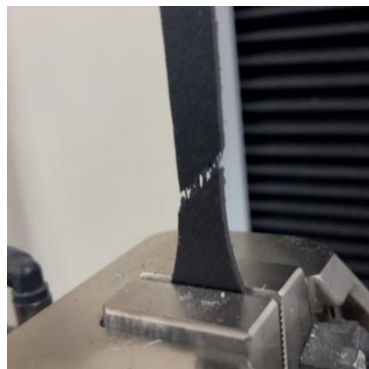


Figura 14 Montaje de la probeta en la máquina Shimadzu AGS-X series en PIMS Mitsubishi.

4.5.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico de los materiales se realizó en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UABC, bajo la supervisión del Dr. Benjamín Valdez. El objetivo de estas pruebas fue obtener información sobre la estabilidad térmica de los compuestos y estimar el contenido efectivo de refuerzo inorgánico presente en cada filamento.

Para cada uno de los cuatro materiales estudiados (PETG con fibra de carbono, ABS con fibra de vidrio al 10% y 25%, y policarbonato con fibra de vidrio) se prepararon dos tipos de muestras: filamento original y material extruido. En el primer caso, simplemente se cortaron pequeños segmentos del filamento comercial; en el segundo, se imprimieron tramos de filamento y posteriormente se extrajeron fragmentos de forma aleatoria, sin un control estricto de longitud o masa previa. En todos los casos se trabajó con porciones representativas del material, de tamaño adecuado para el equipo de TGA.

Las pruebas se llevaron a cabo siguiendo el protocolo estándar del laboratorio del Instituto de Ingeniería, manteniendo las mismas condiciones de ensayo para todos los materiales (mismo rango de temperatura y mismo programa de calentamiento). A partir de las curvas de pérdida de peso obtenidas se determinó el porcentaje de masa residual al final del barrido térmico, que se interpreta como la fracción de fase inorgánica estable (fibra y cenizas), así como las temperaturas aproximadas a las que se inicia y se concentra la degradación térmica de la matriz polimérica. Estos resultados se analizan con mayor detalle en el capítulo 5, en los apartados dedicados al contenido de refuerzo (5.6.1), la estabilidad térmica de los materiales (5.6.2) y efecto del proceso de extrusión en la composición (5.6.3).

4.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental para las pruebas de **tensión** seguido en este trabajo se describe a continuación:

4.6.1 Preparación de muestras

Se seleccionaron los filamentos compuestos que estamos analizando en el proyecto (fibra de carbono, fibra de vidrio al 10% y 25%, y fibra de vidrio con policarbonato).

Fase 1: Ensayos preliminares con probetas impresas directamente

- **Configuración inicial:**

Se imprimieron probetas directamente en la impresora Creality Ender 3 utilizando los parámetros predeterminados del software Ultimaker Cura, que incluían 4 paredes en la silueta.

- **Temperaturas:**

- **PETG con fibra de carbono:** 245 °C.
- **ABS con fibra de vidrio al 10% y 25%, y policarbonato con fibra de vidrio:** 255 °C.

- **Cantidad de muestras:**

Se fabricaron **3 probetas por material** (12 probetas en total).

- **Objetivo:**

Evaluar el comportamiento general de los materiales y detectar posibles problemas en la metodología.

- **Observaciones:**

Tras los ensayos mecánicos, se identificó que la presencia de paredes adicionales podía afectar la medición de las propiedades del material al no ser probetas de relleno al 100%.

Fase 2: Fabricación de probetas con relleno al 100%

- **Cambio metodológico:**

Para garantizar que las probetas fueran 100% relleno, se imprimieron tabletas grandes de cada material, que posteriormente se cortaron con una máquina router CNC siguiendo la geometría de la probeta tipo 1B (norma ISO 527-4).

- **Variables estudiadas:**

Se evaluó el efecto de la temperatura de impresión en las propiedades mecánicas, utilizando los siguientes rangos por material:

- **PETG con fibra de carbono:** 240 °C, 250 °C, 260 °C.
- **ABS con fibra de vidrio al 10% y 25%:** 250 °C, 260 °C, 270 °C.
- **Policarbonato con fibra de vidrio:** 260 °C, 270 °C, 280 °C.

- **Cantidad de muestras:**

Se fabricaron **9 probetas por material** (3 probetas por temperatura), totalizando 36 probetas.

4.6.2 Verificación y etiquetado

Las probetas obtenidas fueron inspeccionadas visualmente y se verificaron sus dimensiones. Cada probeta fue etiquetada para asegurar su trazabilidad durante los ensayos. En este caso, se etiquetaban por material, número de muestra y su temperatura respectiva en ambos extremos, ejemplo en fibra de vidrio al 10%: **Material** (FG10%), **Número de muestra** (S1, Sample 1), **Temperatura** (250 °C)].

4.6.3 Ensayo de tracción

Las probetas se montaron en la máquina Shimadzu AGS-X Series, configurando la velocidad de ensayo y demás parámetros según la norma ISO 527-4. Se realizaron al menos tres repeticiones por cada condición experimental. Durante el ensayo, se registraron los datos de carga (lb.f) y elongación hasta la fractura de la probeta.

4.6.4 Documentación y registro

Todos los datos obtenidos fueron organizados y respaldados para su posterior análisis. A continuación, se presenta el registro fotográfico de las **45 probetas** fracturadas tras los ensayos de tracción (Fase 1 y fase 2). En la totalidad de las muestras se observa que la fractura se produjo en la zona central de la probeta,

lo cual es consistente con el comportamiento esperado según la norma **ISO 527-4**. Este registro visual permite corroborar la correcta realización de los ensayos y la homogeneidad en el modo de falla.

Fase 1: Ensayos preliminares con probetas impresas directamente (Figura 15)

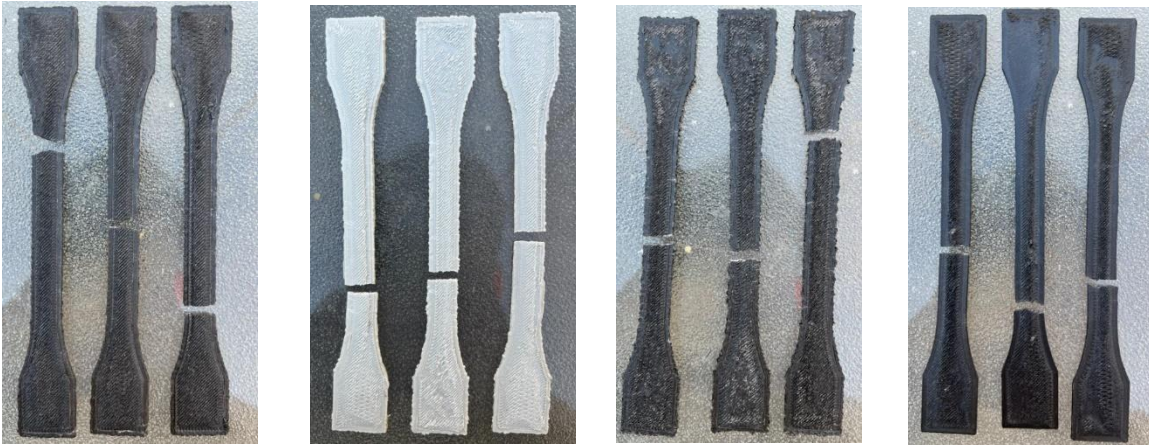


Figura 15 Fibra de carbono a 245 °C, fibra de vidrio al 10%, al 25% y fibra de vidrio con policarbonato a 255 °C respectivamente.

Fase 2: Fabricación de probetas con relleno al 100% (Figura 16, 17, 18 y 19)

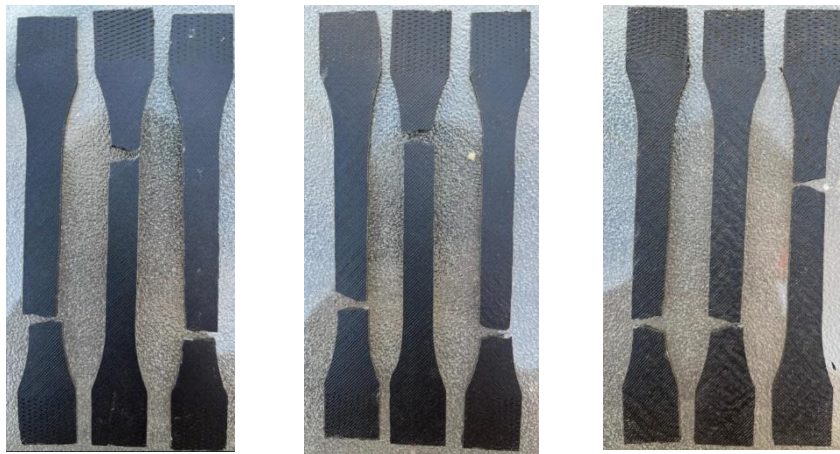


Figura 16 PETG con fibra de carbono (240 °C, 250 °C, 260 °C)

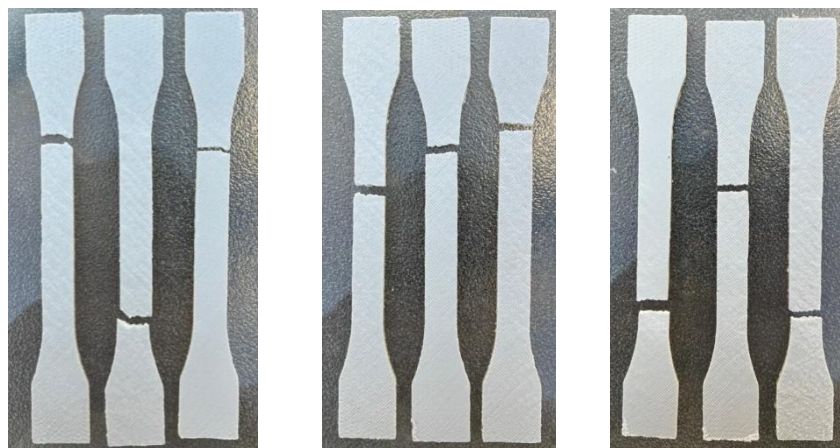


Figura 17 Fibra de vidrio al 10% (Temperatura de: 250 °C, 260 °C, 270 °C)

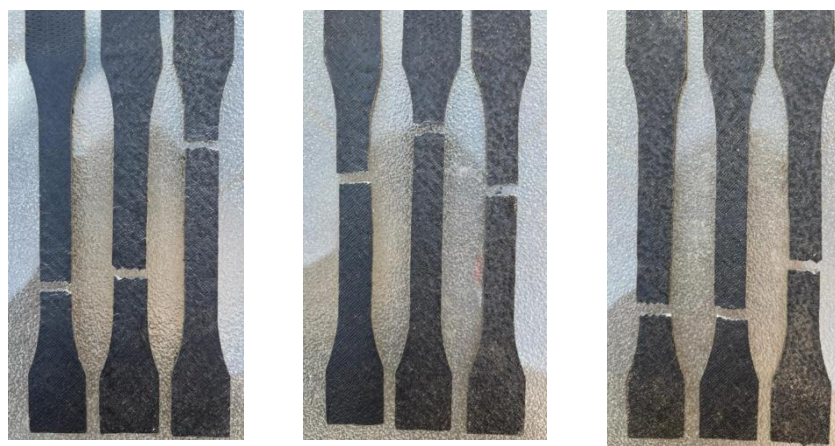


Figura 18 Fibra de vidrio al 25% (Temperatura de: 250 °C, 260 °C, 270 °C)



Figura 19 Fibra de vidrio con policarbonato (Temperatura de: 260 °C, 270 °C, 280 °C).

En este caso se puede observar un comportamiento distinto en la ruptura en 260°C que será abordado con mayor detalle en la sección de resultados.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados sobre las probetas fabricadas con los diferentes materiales compuestos y bajo distintas condiciones de impresión. Los resultados se organizan en dos fases: la primera corresponde a las probetas impresas con 4 paredes (*Figura 15*), y la segunda a las probetas obtenidas a partir de tabletas con relleno al 100% y cortadas mediante CNC (*Figuras 16 a 19*), evaluando además el efecto de la temperatura de impresión. Se incluyen gráficas de esfuerzo–deformación, tablas resumen de las propiedades mecánicas obtenidas y comparaciones entre los distintos materiales y condiciones de fabricación, así como el registro fotográfico de los modos de fractura observados tras los ensayos. Finalmente, se presentan también los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) de los filamentos compuestos, con el fin de evaluar su estabilidad térmica y el contenido efectivo de refuerzo en cada material antes y después de extruir.

5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS

En esta sección se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en ambas fases experimentales. La **Fase 1** evalúa probetas con paredes perimetrales (*Figuras 20 a 23*), mientras que la **Fase 2** analiza probetas sólidas mecanizadas bajo diferentes temperaturas de impresión para cada material (*Figuras 25 a 40*).

5.1.1 Fase 1: Probetas con 4 paredes

- **PETG con fibra de carbono (255°C):**

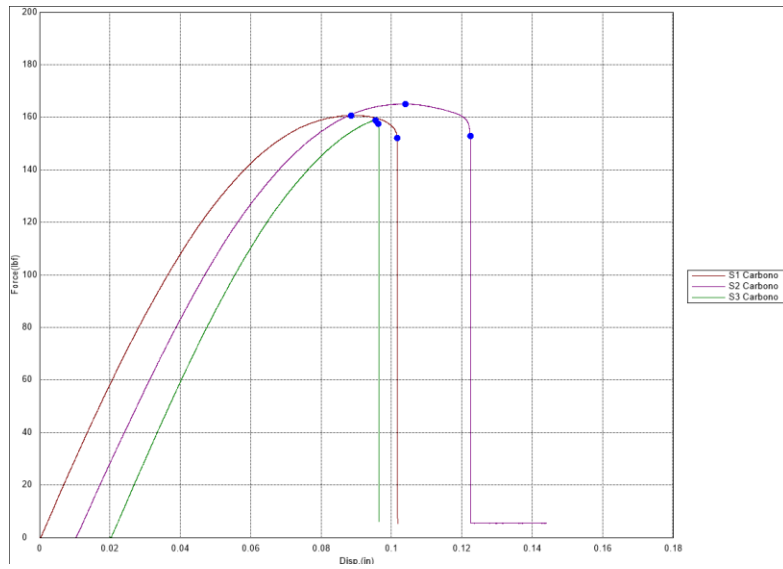


Figura 20 Gráfica de esfuerzo deformación de PETG con fibra de carbono.

- **ABS con fibra de vidrio al 10% (255°C):**

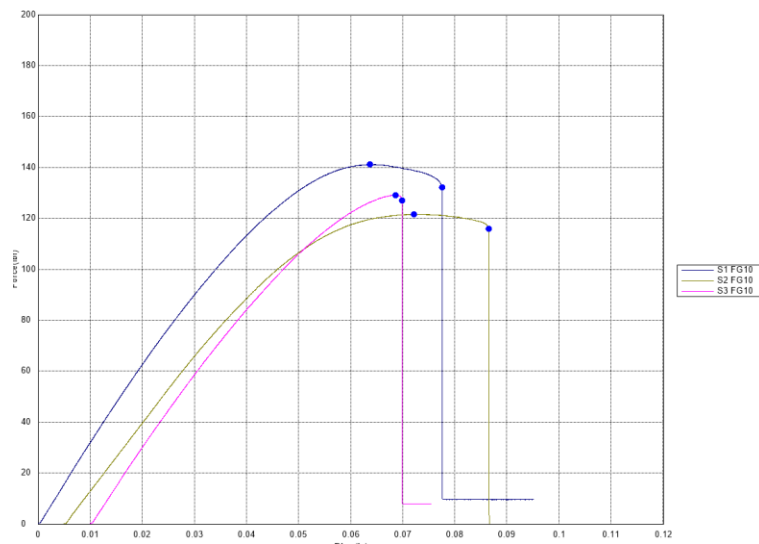


Figura 21 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio 10%.

- **ABS con fibra de vidrio al 25% (255°C):**

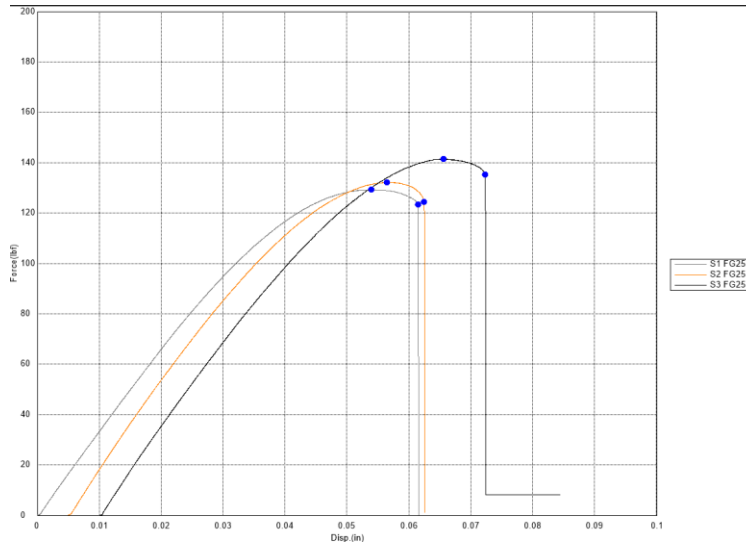


Figura 22 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio 25%.

- **Policarbonato con fibra de vidrio (255°C):**

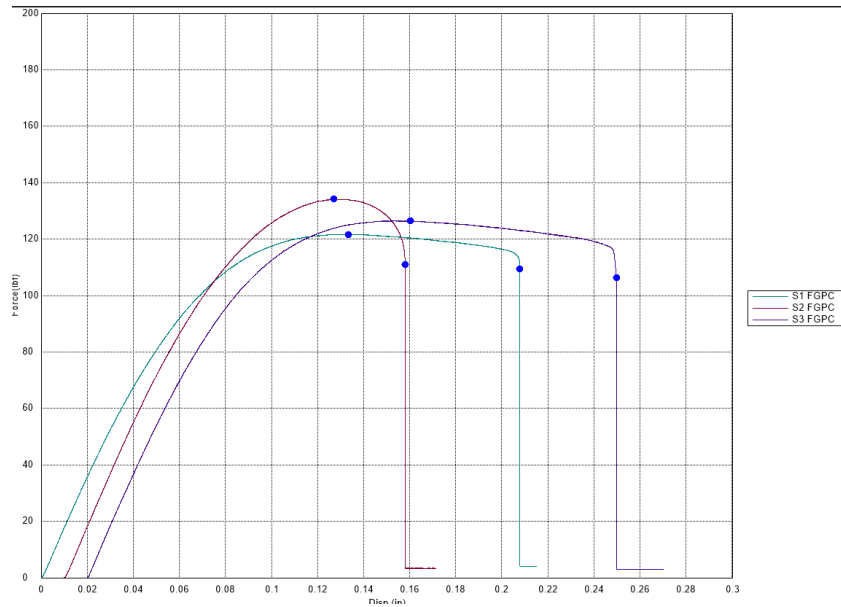


Figura 23 Gráfica de esfuerzo deformación de fibra de vidrio con policarbonato

5.1.1.1 Tabla de resultados Fase 1.

Results(Batch)					
	Name	Max_Force	Break_Force	Max_Displ.	Break_Displ.
	Parameter	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10
	Pass/Fail				
	Unit	lbf	lbf	in	in
<input checked="" type="checkbox"/>	Print	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	S1 Carbono	<input checked="" type="checkbox"/> 160.69	<input checked="" type="checkbox"/> 152.19	<input checked="" type="checkbox"/> 0.09	<input checked="" type="checkbox"/> 0.10
	S2 Carbono	<input checked="" type="checkbox"/> 165.03	<input checked="" type="checkbox"/> 152.75	<input checked="" type="checkbox"/> 0.09	<input checked="" type="checkbox"/> 0.11
	S3 Carbono	<input checked="" type="checkbox"/> 158.78	<input checked="" type="checkbox"/> 157.41	<input checked="" type="checkbox"/> 0.08	<input checked="" type="checkbox"/> 0.08
	S1 FG10	<input checked="" type="checkbox"/> 141.16	<input checked="" type="checkbox"/> 132.23	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06	<input checked="" type="checkbox"/> 0.08
	S2 FG10	<input checked="" type="checkbox"/> 121.61	<input checked="" type="checkbox"/> 115.82	<input checked="" type="checkbox"/> 0.07	<input checked="" type="checkbox"/> 0.08
	S3 FG10	<input checked="" type="checkbox"/> 129.17	<input checked="" type="checkbox"/> 127.12	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06
	S1 FG25	<input checked="" type="checkbox"/> 129.24	<input checked="" type="checkbox"/> 123.27	<input checked="" type="checkbox"/> 0.05	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06
	S2 FG25	<input checked="" type="checkbox"/> 132.18	<input checked="" type="checkbox"/> 124.29	<input checked="" type="checkbox"/> 0.05	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06
	S3 FG25	<input checked="" type="checkbox"/> 141.42	<input checked="" type="checkbox"/> 135.38	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06
	S1 FGPC	<input checked="" type="checkbox"/> 121.66	<input checked="" type="checkbox"/> 109.37	<input checked="" type="checkbox"/> 0.13	<input checked="" type="checkbox"/> 0.21
	S2 FGPC	<input checked="" type="checkbox"/> 134.12	<input checked="" type="checkbox"/> 110.93	<input checked="" type="checkbox"/> 0.12	<input checked="" type="checkbox"/> 0.15
	S3 FGPC	<input checked="" type="checkbox"/> 126.48	<input checked="" type="checkbox"/> 106.42	<input checked="" type="checkbox"/> 0.14	<input checked="" type="checkbox"/> 0.23

Figura 24 Captura de pantalla de los resultados obtenidos directamente del software de la máquina Shimadzu AGS-X Series para las probetas de la Fase 1 (impresas con 4 paredes).

A continuación, se presentan los resultados detallados de cada material en la Fase 1. Las Tablas 3 a 6 muestran los valores individuales de fuerza máxima, fuerza de ruptura y desplazamiento para cada probeta.

La fibra de carbono (**Tabla 3**) obtuvo los valores más altos, entre 158.78 y 165.03 lbf, con una desviación estándar de 3.2 lbf. La fibra de vidrio al 10% (**Tabla 4**) mostró más variabilidad (DS = 4.39 lbf), con fuerzas que van de 121.61 a 141.16 lbf. La fibra de vidrio al 25% (**Tabla 5**) presentó valores intermedios (129.24 - 141.42 lbf) y mejor consistencia. El policarbonato con fibra de vidrio (**Tabla 6**) tuvo fuerzas similares a los otros materiales (121.66-134.12 lbf), pero con mayor elongación a la ruptura (0.12-0.23 in), lo que indica mayor ductilidad.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de PETG reforzado con fibra de carbono (Fase 1)

Fibra de carbón				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 Carb.	160.69	152.19	0.09	0.1
S2 Carb.	165.03	152.75	0.09	0.11
S3 Carbo.	158.78	157.41	0.08	0.08

Tabla 4. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% (Fase 1)

ABS con fibra de vidrio 10%				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FG10	141.16	132.23	0.06	0.08
S2 FG10	121.61	115.82	0.07	0.08
S3 FG10	129.17	127.12	0.06	0.06

Tabla 5. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de Ultra ABS reforzado con fibra de vidrio al 25% (Fase 1)

Ultra ABS con fibra de vidrio 25%				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FG25	129.24	123.27	0.05	0.06
S2 FG25	132.18	124.29	0.05	0.06
S3 FG25	141.42	135.38	0.06	0.06

Tabla 6. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de policarbonato con fibra de vidrio (Fase 1)

Policarbonato con fibra de vidrio				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FGPC	121.66	109.37	0.13	0.21
S2 FGPC	134.12	110.93	0.12	0.15
S3 FGPC	126.48	106.42	0.14	0.23

5.1.2 Fase 2: Probetas con 100% relleno (3 temperaturas por material)

En la **Fase 2**, se evaluaron probetas sólidas mecanizadas para eliminar el efecto de las paredes. Para el PETG con fibra de carbono, se realizaron ensayos a 240°C, 250°C y 260°C. Las curvas resultantes se detallan en las **Figuras 25 a 27**, y su comparación directa se observa en la **Figura 28**.

- **PETG con fibra de carbono:**

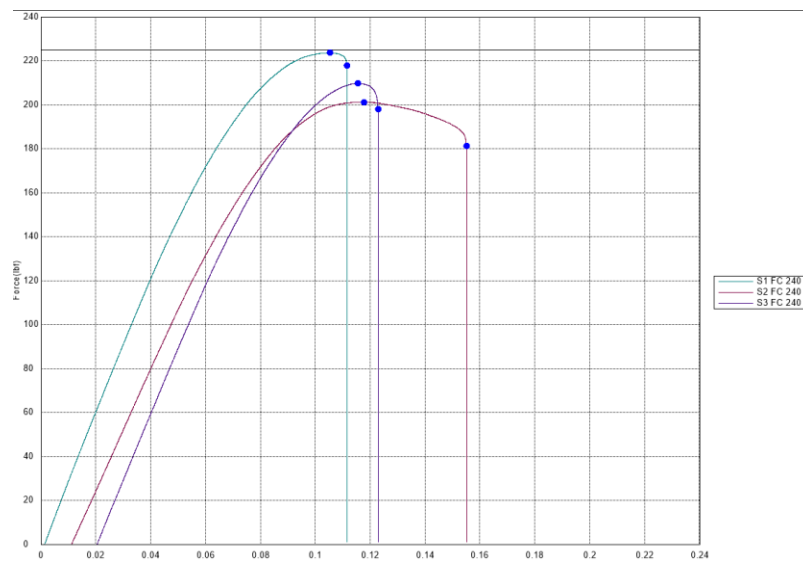


Figura 25 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 240 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

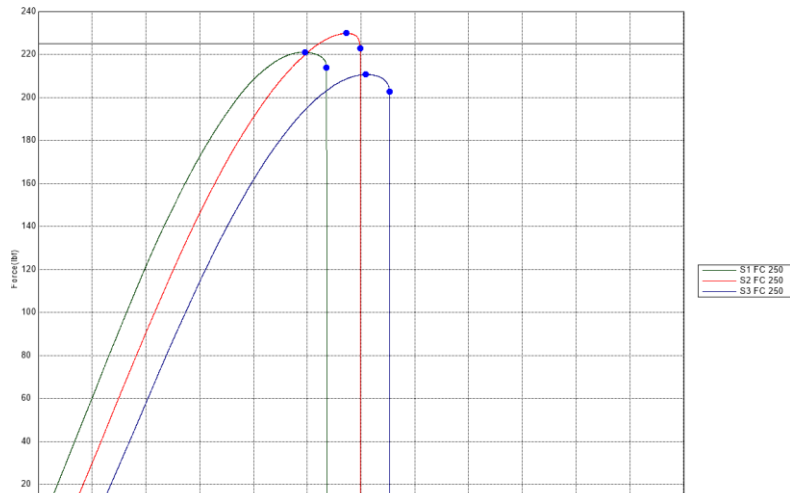


Figura 26 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

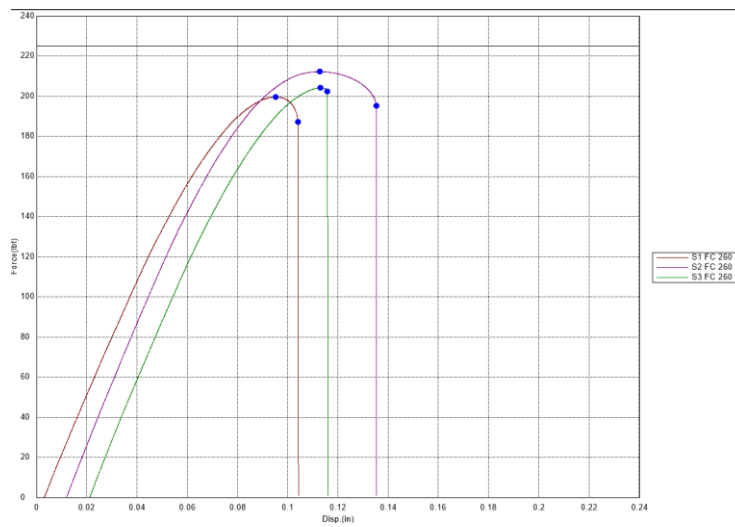


Figura 27 Curvas esfuerzo-deformación para PETG con fibra de carbono impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

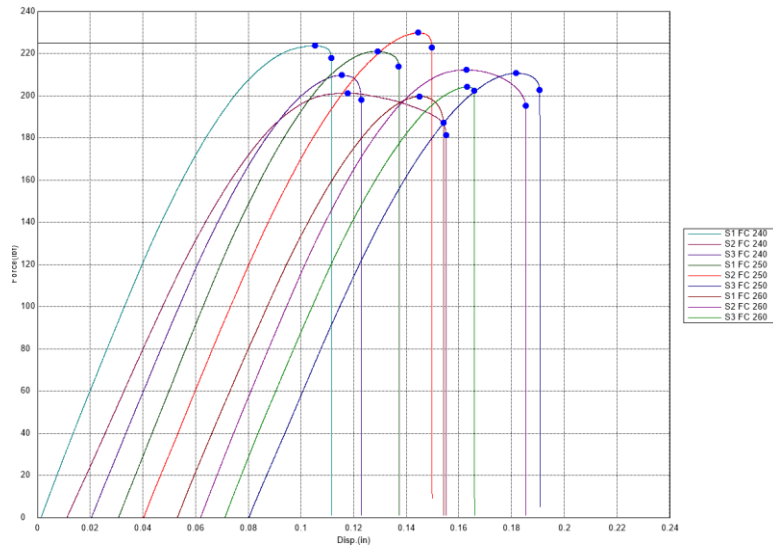


Figura 28 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas PETG con fibra de carbono.

- ABS con fibra de vidrio al 10%:**

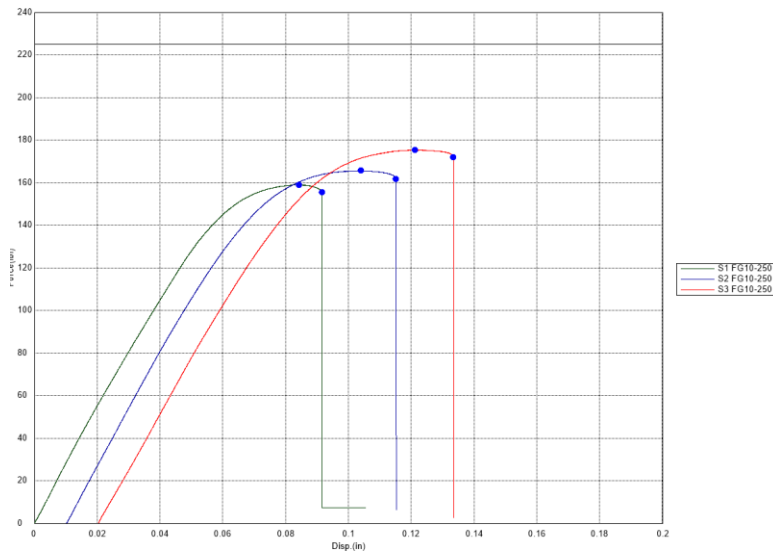


Figura 29 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

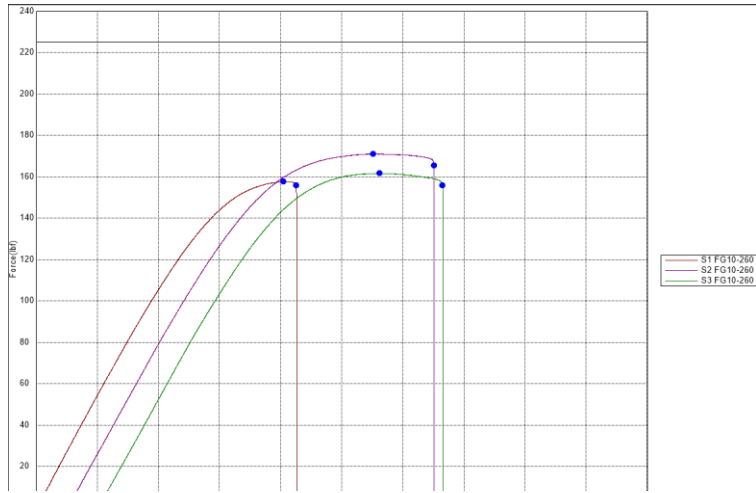


Figura 30 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

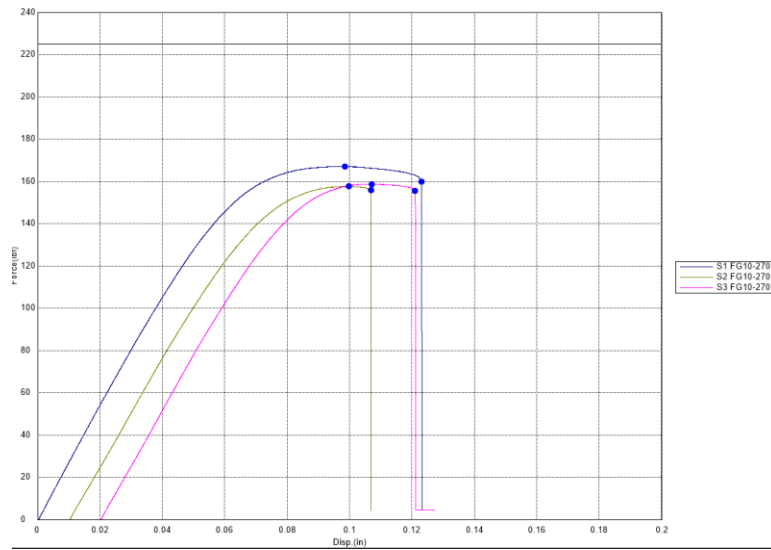


Figura 31 Curvas esfuerzo-deformación para ABS con fibra de vidrio al 10% impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

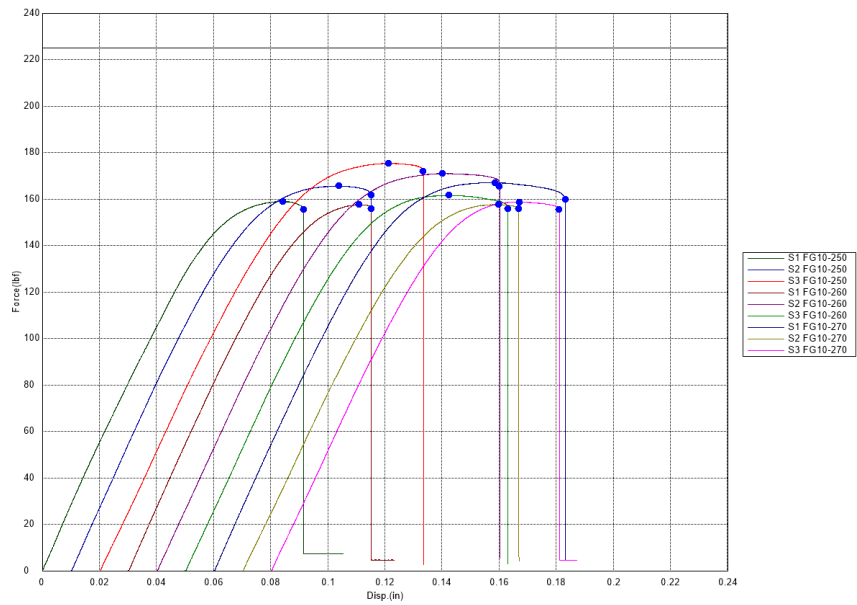


Figura 32 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas ABS con fibra de vidrio al 10%.

- **Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%:**

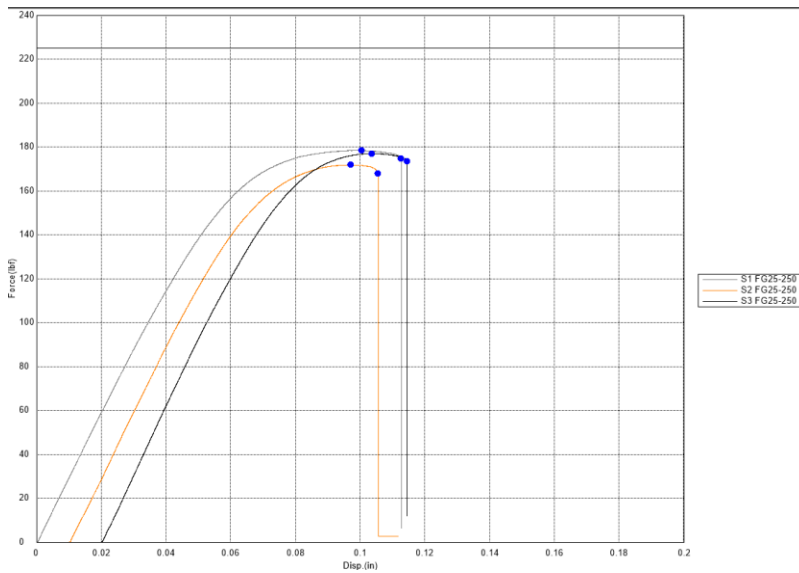


Figura 33 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 250 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

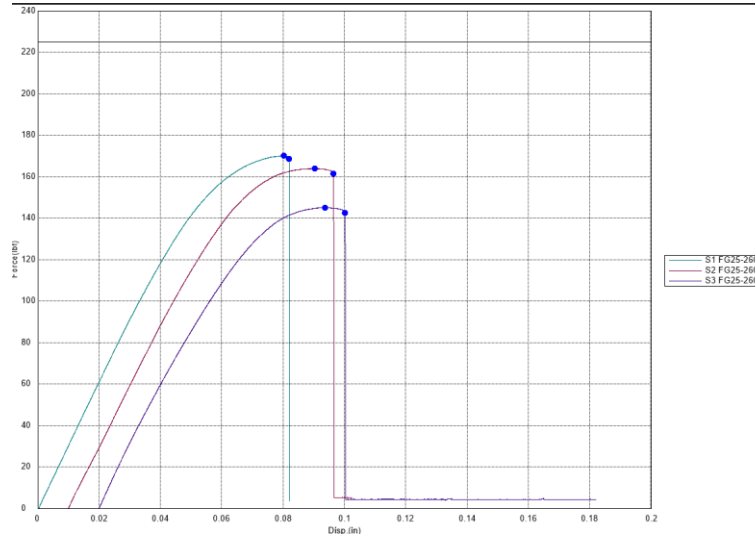


Figura 34 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

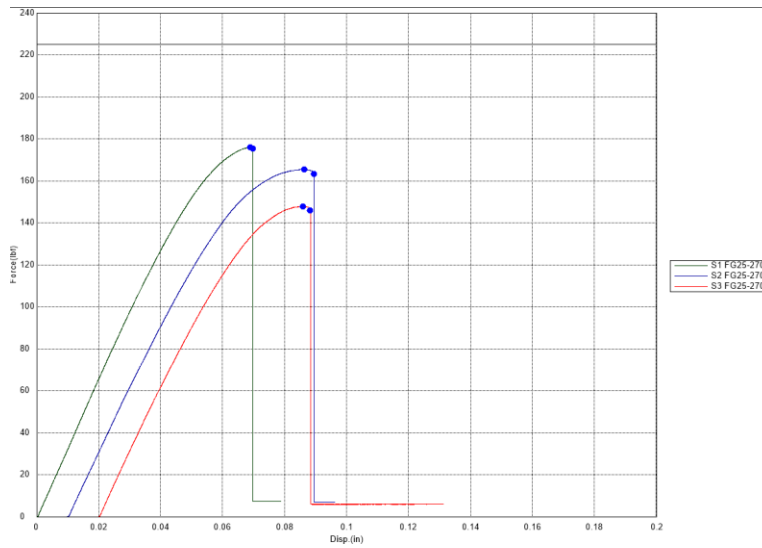


Figura 35 Curvas esfuerzo-deformación para Ultra ABS con fibra de vidrio al 25% impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

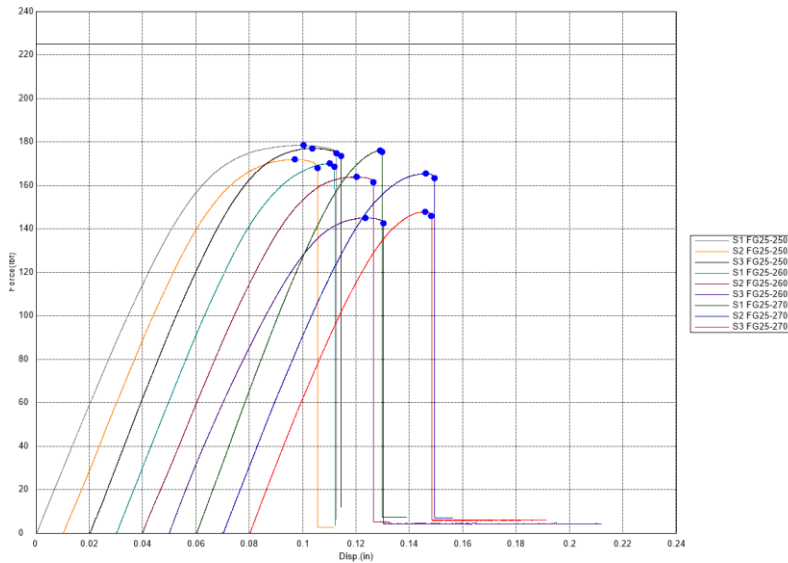


Figura 36 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%.

- Fibra de vidrio con policarbonato:**

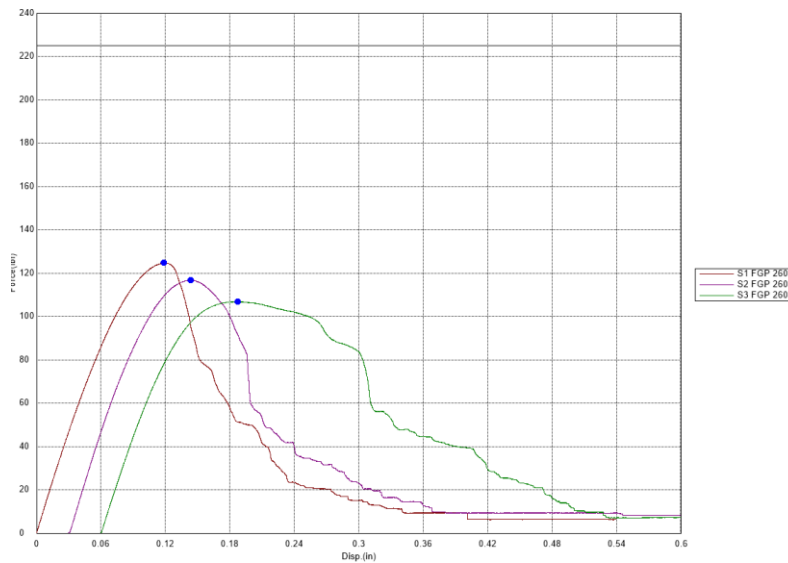


Figura 37 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 260 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

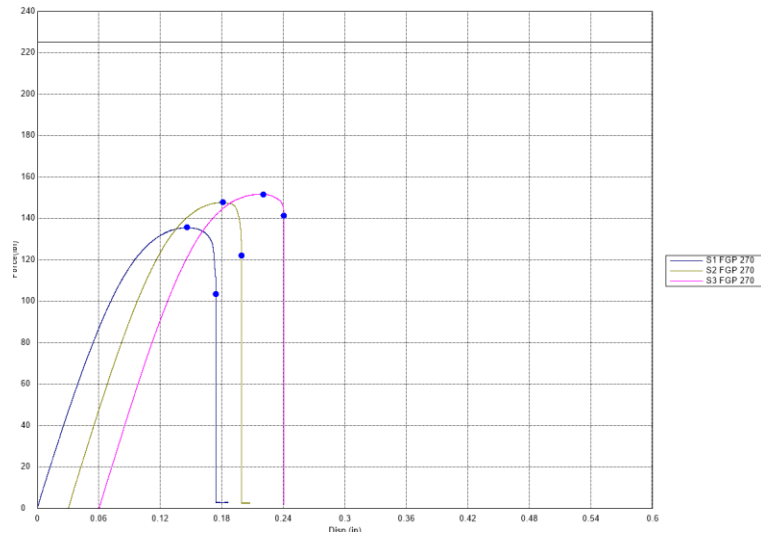


Figura 38 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 270 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

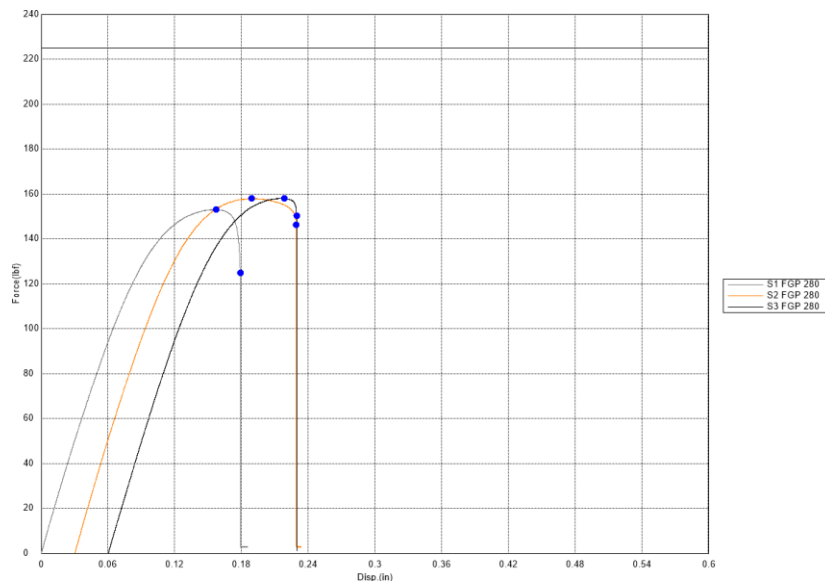


Figura 39 Curvas esfuerzo-deformación para Fibra de vidrio con policarbonato impresas a 280 °C. Se muestran los resultados de tres probetas.

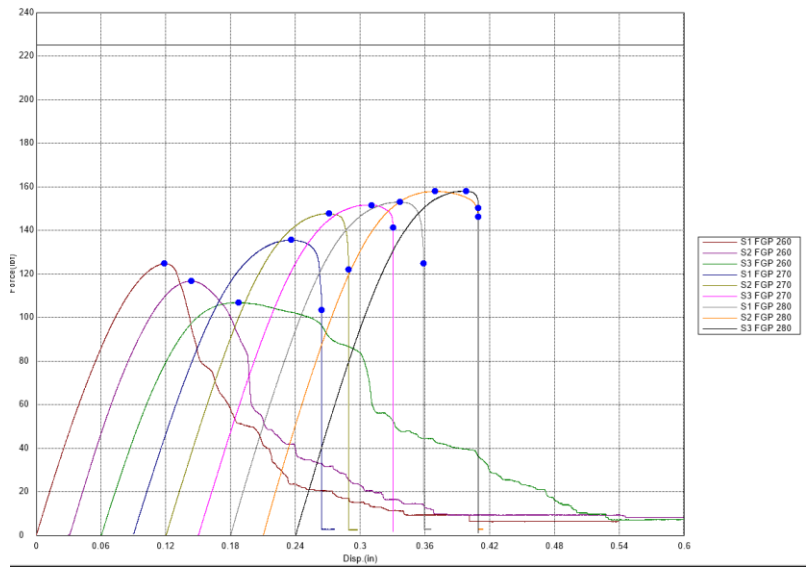


Figura 40 Gráfica comparativa: Superposición de las 3 temperaturas de fibra de vidrio con policarbonato.

5.1.2.1 Tabla de resultados Fase 2.

Name	Max_Force	Break_Force	Max_Displ.	Break_Displ.
Parameter	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10
Pass/Fail				
Unit	lbf	lbf	in	in
Print	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
S1 FC 240	223.58	217.96	0.11	0.11
S2 FC 240	201.24	181.19	0.11	0.15
S3 FC 240	209.69	198.11	0.10	0.10
S1 FC 250	220.99	213.77	0.10	0.11
S2 FC 250	229.80	222.93	0.10	0.11
S3 FC 250	210.69	202.51	0.10	0.11
S1 FC 260	199.69	187.09	0.10	0.10
S2 FC 260	212.21	195.31	0.10	0.13
S3 FC 260	204.16	202.21	0.09	0.10
S1 FG10-250	158.96	155.43	0.08	0.09
S2 FG10-250	165.58	161.56	0.09	0.11
S3 FG10-250	175.33	172.07	0.10	0.11
S1 FG10-260	157.54	155.70	0.08	0.09
S2 FG10-260	170.97	165.28	0.10	0.12
S3 FG10-260	161.55	155.95	0.09	0.11
S1 FG10-270	167.09	159.75	0.10	0.12
S2 FG10-270	157.58	155.77	0.09	0.10
S3 FG10-270	158.70	155.37	0.09	0.10
S1 FG25-250	178.42	174.73	0.10	0.11
S2 FG25-250	171.81	167.94	0.09	0.10
S3 FG25-250	177.04	173.59	0.08	0.09
S1 FG25-260	169.96	168.41	0.08	0.08
S2 FG25-260	163.84	161.32	0.08	0.09
S3 FG25-260	145.01	142.51	0.07	0.08
S1 FG25-270	175.94	175.40	0.07	0.07
S2 FG25-270	165.43	163.15	0.08	0.08
S3 FG25-270	147.86	145.97	0.07	0.07
S1 FGP 260	124.70	--	0.12	--
S2 FGP 260	116.80	--	0.11	--
S3 FGP 260	106.84	--	0.13	--
S1 FGP 270	135.58	103.53	0.15	0.17
S2 FGP 270	147.69	121.93	0.15	0.17
S3 FGP 270	151.61	141.23	0.16	0.18
S1 FGP 280	153.03	124.82	0.16	0.18
S2 FGP 280	157.91	146.07	0.16	0.20
S3 FGP 280	158.00	150.12	0.16	0.17

Figura 41 Captura de pantalla de los resultados obtenidos directamente del software de la máquina Shimadzu AGS-X Series para las probetas de la Fase 2 (Impresa en tableta en relleno 100% y cortada con CNC).

Los datos individuales de cada material en la **Fase 2** se presentan en las **Tablas 7 a 10**.

Tabla 7. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de PETG reforzado con fibra de carbono (Fase 2)

Fibra de carbono				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FC 240	223.58	217.96	0.11	0.11
S2 FC 240	201.24	181.19	0.11	0.15
S3 FC 240	209.69	198.11	0.1	0.1
S1 FC 250	220.99	213.77	0.1	0.11
S2 FC 250	229.8	222.93	0.1	0.11
S3 FC 250	210.69	202.51	0.1	0.11
S1 FC 260	199.69	187.09	0.1	0.1
S2 FC 260	212.21	195.31	0.1	0.13
S3 FC 260	204.16	202.21	0.09	0.1

Tabla 8. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% (Fase 2)

ABS con fibra de vidrio 10%				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FG10-250	158.96	155.43	0.08	0.09
S2 FG10-250	165.58	161.56	0.09	0.11
S3 FG10-250	175.33	172.07	0.1	0.11
S1 FG10-260	157.54	155.7	0.08	0.09
S2 FG10-260	170.97	165.28	0.1	0.12
S3 FG10-260	161.55	155.95	0.09	0.11
S1 FG10-270	167.09	159.75	0.1	0.12
S2 FG10-270	157.58	155.77	0.09	0.1
S3 FG10-270	158.7	155.37	0.09	0.1

Tabla 9. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de Ultra ABS reforzado con fibra de vidrio al 25% (Fase 2)

Ultra ABS con fibra de vidrio 25%				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)

S1 FG25-250	178.42	174.73	0.1	0.11
S2 FG25-250	171.81	167.94	0.09	0.1
S3 FG25-250	177.04	173.59	0.08	0.09
S1 FG25-260	169.96	168.41	0.08	0.08
S2 FG25-260	163.84	161.32	0.08	0.09
S3 FG25-260	145.01	142.51	0.07	0.08
S1 FG25-270	175.94	175.4	0.07	0.07
S2 FG25-270	165.43	163.15	0.08	0.08
S3 FG25-270	147.86	145.97	0.07	0.07

Tabla 10. Propiedades mecánicas de tensión en probetas de policarbonato con fibra de vidrio (Fase 2)

Policarbonato con fibra de vidrio				
Name	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Max_Displacement (in)	Break_Displacement (in)
S1 FGP 260	124.7	--	0.12	--
S2 FGP 260	116.8	--	0.11	--
S3 FGP 260	106.84	--	0.13	--
S1 FGP 270	135.58	103.53	0.15	0.17
S2 FGP 270	147.69	121.93	0.15	0.17
S3 FGP 270	151.61	141.23	0.16	0.18
S1 FGP 280	153.03	124.82	0.16	0.18
S2 FGP 280	157.91	146.07	0.16	0.2
S3 FGP 280	158	150.12	0.16	0.17

5.2 COMPARACIÓN ENTRE MATERIALES

En esta sección se presenta la comparación directa del comportamiento mecánico de los diferentes materiales compuestos evaluados. La **Figura 42** muestra la gráfica comparativa de las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a la condición óptima de cada material en todos sus rangos de temperaturas.

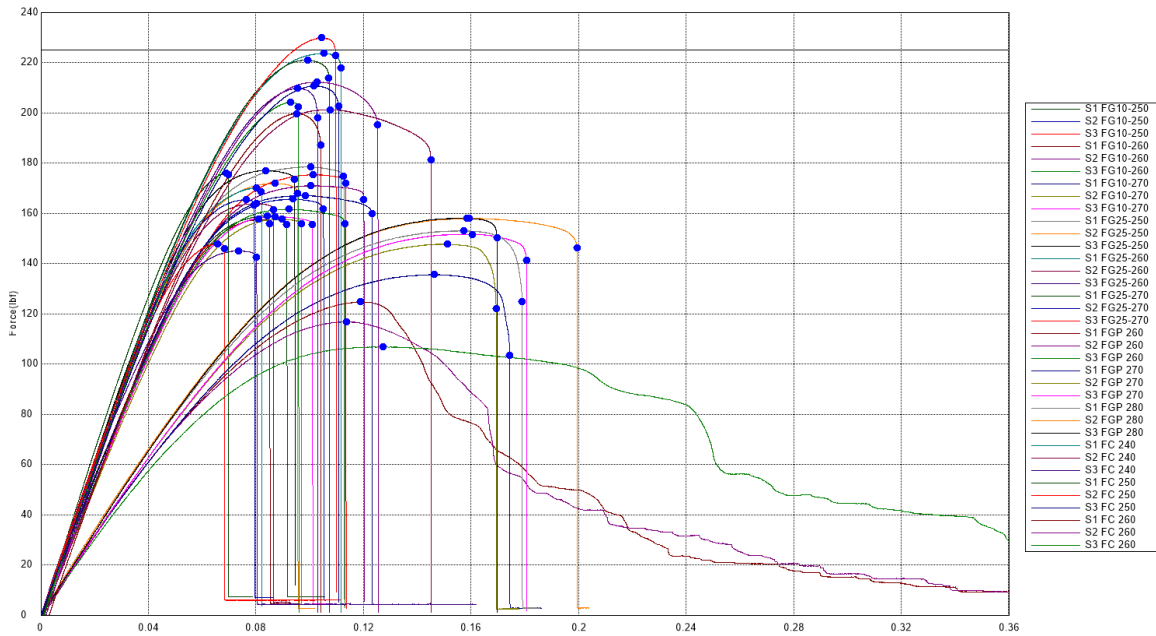


Figura 42 Gráfica de esfuerzo deformación de las 36 probetas utilizadas en fase 2.

5.2.1 Comparación general entre materiales

En este apartado se presenta una comparación directa de las propiedades mecánicas obtenidas en las pruebas de tensión para los diferentes materiales evaluados, considerando las dos fases experimentales del estudio. La Fase 1 corresponde a las probetas impresas directamente con la impresora Creality Ender 3, utilizando una configuración de 4 paredes, mientras que la Fase 2 involucra la fabricación de tabletas con relleno al 100% en la impresora Creality K1C, las cuales posteriormente fueron cortadas en probetas mediante CNC.

Esta comparación permite observar el impacto que tienen tanto la metodología de fabricación como el tipo de impresora sobre el desempeño mecánico de los materiales compuestos. Para facilitar la comparación entre metodologías de fabricación, la **Tabla 11** presenta los valores promedio y desviación estándar obtenidos en la Fase 1 (probetas impresas directamente con 4 paredes), mientras que la **Tabla 12** consolida los resultados de la Fase 2 (probetas cortadas con CNC desde tabletas con relleno al 100%).

Tabla 11. Propiedades mecánicas de tensión: promedio y desviación estándar de probetas impresas directamente (Fase 1, n=3 por material)

Material	Tem p (°C)	N muestr ras	Prom Max_For ce (lbf)	DS Max_For ce	Prom Break_Fo rce (lbf)	Prom Break_Di sp (in)	DS Break_Di sp
Fibra de carbono	245	3	161.5	3.2	154.12	0.09	0.01
Fibra de vidrio 10%	255	3	126.67	4.39	122.07	0.07	0.01
Fibra de vidrio 25%	255	3	133.23	7.33	122.03	0.12	0.095
Fibra de vidrio con policarbon ato	255	3	127.42	6.28	108.91	0.197	0.042

Nota: n=3 por material. **Prom**=Promedio; **DS**=Desviación Estándar. **Equipo:** Shimadzu AGS-X Series. *Probetas impresas directamente con 4 paredes*

Tabla 12. Propiedades mecánicas de tensión: promedio y desviación estándar de probetas cortadas con CNC (Fase 2, n=9 por material)

Material	N muestra s	Prom Max_For ce (lbf)	DS Max_For ce	Prom Break_For ce (lbf)	Prom Break_Dis p (in)	DS Break_Dis p
Fibra de carbono	9	212.45	10.4	202.34	0.113	0.017
Fibra de vidrio 10%	9	163.7	6.43	159.65	0.106	0.011
Fibra de vidrio 25%	9	166.15	12.24	163.67	0.086	0.013
Fibra de vidrio con policarbona to	9	139.13	19.02	131.28	0.178	0.012

Nota: n=9 por material. **Prom**=Promedio; **DS**=Desviación Estándar. **Equipo:** Shimadzu AGS-X Series. *Probetas cortadas con CNC desde tabletas impresas.*

Al comparar los resultados promedio de las pruebas de tensión entre la Fase 1 (**Tabla 11**) y la Fase 2 (**Tabla 12**), se observan mejoras significativas en todas las propiedades mecánicas evaluadas. La Fase 2 empleó probetas obtenidas de tabletas con relleno al 100% y corte CNC fabricadas con la impresora K1C, mientras que la Fase 1 utilizó probetas impresas directamente con 4 paredes usando Ender 3.

En este mismo sentido, al analizar de manera particular el comportamiento de los materiales, se observa que la **fibra de carbono** incrementó su fuerza máxima promedio de **161.5 lbf en Fase 1 a 212.45 lbf en Fase 2**, lo que representa un aumento aproximado del **31%**. De manera similar, la **fibra de vidrio al 10%** pasó de **126.67 lbf a 163.7 lbf**, un incremento del **29%**, y la **fibra de vidrio al 25%** subió de **133.23 lbf a 166.15 lbf**, es decir, un **25% más** de fuerza máxima. El **policarbonato con fibra de vidrio** también mostró una mejora, aumentando de **127.42 lbf a 139.13 lbf** (aproximadamente **9%**), aunque con mayor dispersión en los resultados de Fase 2.

En cuanto a la **elongación de ruptura**, la mayoría de los materiales también presentaron valores superiores en la Fase 2, lo que indica una mayor ductilidad y capacidad de deformación antes de la fractura. Por ejemplo, la fibra de carbono aumentó de **0.09 in a 0.113 in**, y la fibra de vidrio al 10% de **0.07 in a 0.106 in**. La excepción fue la fibra de vidrio al 25%, donde la elongación disminuyó ligeramente en la Fase 2, posiblemente debido a una mayor rigidez estructural por el mayor contenido de fibra.

Finalmente, se observa que las **desviaciones estándar** tienden a ser mayores en la Fase 2, especialmente en los materiales con policarbonato, lo que podría indicar una mayor variabilidad en la fabricación o en la respuesta del material bajo las nuevas condiciones. Sin embargo, el aumento generalizado en la resistencia y la ductilidad sugiere que la metodología de fabricación de la Fase 2 ofrece ventajas claras en el desempeño mecánico de los materiales compuestos evaluados.

5.2.2 Comparación por temperaturas entre materiales

En este sentido, la influencia de la temperatura de impresión en las propiedades mecánicas de cada material compuesto fue evaluada. Dado que la temperatura es un parámetro crucial en la fabricación aditiva y la manipulación de materiales compuestos en general, los resultados de cada material a diversas temperaturas se muestran en la figura para tener una vista general. A su vez, se infiere la

temperatura óptima para maximizar la resistencia, la ductilidad y la resistencia de materiales, al igual que se explica qué tendencias y variaciones son cualesquiera en términos de este parámetro. En este sentido, los resultados presentados contienen la información necesaria para la optimización de los procesos y las condiciones de manufactura aplicados en ingeniería, en correspondencia con la importancia de los parámetros térmicos en la literatura relevante.

La **Tabla 13** muestra cómo cambia la resistencia con la temperatura para cada material.

Tabla 13. Efecto de la temperatura de impresión en las propiedades mecánicas de tensión por material (Fase 2, n=3 por temperatura)

Material	Temp (°C)	N muestras	Prom Max_Force (lbf)	DS Max_Force	Prom Break_Force (lbf)	Prom Break_Displacement (in)	DS Break_Displacement
Fibra de carbono	240	3	211.5	11.28	199.09	0.12	0.026
	250	3	220.49	9.56	213.07	0.11	0
	260	3	205.35	6.34	194.87	0.11	0.017
Fibra de vidrio 10%	250	3	166.62	8.23	163.02	0.103	0.012
	260	3	163.35	6.89	158.98	0.107	0.015
	270	3	161.12	5.2	156.96	0.107	0.012
Fibra de vidrio 25%	250	3	175.76	3.49	172.09	0.1	0.01
	260	3	159.6	13	157.41	0.083	0.006
	270	3	163.08	14.19	161.51	0.073	0.006
Fibra de vidrio con policarbonato	260	3	116.11	8.95	--	--	--
	270	3	144.96	8.36	122.23	0.173	0.006
	280	3	156.31	2.84	140.34	0.183	0.015

Nota: **N** = Número de muestras por temperatura; **Prom** = Promedio; **DS** = Desviación Estándar. **Total:** n=9 probetas por material (3 temperaturas × 3 probetas). Temperaturas según especificaciones del fabricante. Máquina: Shimadzu AGS-X Series.

1. Fibra de carbono (240°C, 250°C, 260°C)

- **Temperatura óptima:** 250°C con **220.49 lbf** de fuerza máxima.
- **Tendencia:** La resistencia aumenta un **4.2%** de 240°C a 250°C (de 211.5 lbf a 220.49 lbf), pero disminuye un **6.9%** de 250°C a 260°C (de 220.49 lbf a 205.35 lbf).
- **Elongación de ruptura:** Se reduce ligeramente de **0.12 in** a **0.11 in** al aumentar la temperatura, manteniéndose estable en 250°C y 260°C.
- **Consistencia:** La desviación estándar mejora significativamente a 260°C (6.34 vs 11.28 a 240°C), indicando mayor reproducibilidad a temperaturas altas.

2. Fibra de vidrio 10% (250°C, 260°C, 270°C)

- **Tendencia decreciente:** La fuerza máxima disminuye consistentemente con el aumento de temperatura: **166.62 lbf** (250°C) → **163.35 lbf** (260°C) → **161.12 lbf** (270°C).
- **Reducción total:** **3.3%** de pérdida de resistencia entre 250°C y 270°C.
- **Elongación estable:** Se mantiene prácticamente constante alrededor de **0.105 in**, con ligero aumento a temperaturas mayores.
- **Mejora en consistencia:** La desviación estándar se reduce de 8.23 a 5.2 al aumentar de 250°C a 270°C.

3. Fibra de vidrio 25% (250°C, 260°C, 270°C)

- **Comportamiento no lineal:** La fuerza máxima cae drásticamente un **9.2%** de 250°C a 260°C (de 175.76 lbf a 159.6 lbf), pero se recupera ligeramente a 270°C (163.08 lbf).
- **Temperatura óptima:** 250°C con **175.76 lbf**, siendo el valor más alto de este material.
- **Elongación decreciente:** Disminuye consistentemente de **0.1 in** a **0.073 in** conforme aumenta la temperatura, sugiriendo mayor fragilidad.
- **Mayor variabilidad:** Presenta las desviaciones estándar más altas, especialmente a 260°C y 270°C (13.0 y 14.19 respectivamente).

4. Fibra de vidrio con policarbonato (260°C, 270°C, 280°C)

- **Tendencia creciente clara:** La fuerza máxima aumenta consistentemente: **116.11 lbf** (260°C) → **144.96 lbf** (270°C) → **156.31 lbf** (280°C).
- **Mejora significativa:** **34.7%** de incremento total entre 260°C y 280°C, siendo el material que más se beneficia del aumento de temperatura.
- **Mayor ductilidad:** La elongación aumenta de **0.12 in** a **0.183 in**, siendo el material más dúctil del estudio.
- **Mejora en consistencia:** La desviación estándar se reduce considerablemente a 280°C (2.84 vs 8.95 a 260°C).

5.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA DE VIDRIO

En este apartado se analiza el efecto del porcentaje de fibra de vidrio (10% y 25%) en las propiedades mecánicas de los compuestos, considerando exclusivamente los resultados de la Fase 2. Esta decisión se justifica porque, como se demostró en los apartados anteriores, la metodología basada en tabletas con relleno al 100% y corte CNC proporciona resultados más consistentes y reproducibles, permitiendo una evaluación más precisa de la influencia del refuerzo.

Comparación de propiedades mecánicas por porcentaje de fibra de vidrio

La **Tabla 14** consolida los resultados de ambos porcentajes de fibra de vidrio (10% vs 25%) a diferentes temperaturas de impresión, facilitando la comparación directa de sus propiedades mecánicas.

Tabla 14. Comparación de propiedades mecánicas entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio a diferentes temperaturas de impresión (Fase 2)

Material	Temp (°C)	Max_Force (lbf)	Break_Force (lbf)	Break_Displacement (in)
Fibra de vidrio 10%	250	166.62	163.02	0.103
Fibra de vidrio 10%	260	163.35	158.98	0.107

Fibra de vidrio 10%	270	161.12	156.96	0.107
Fibra de vidrio 25%	250	175.76	172.09	0.1
Fibra de vidrio 25%	260	159.6	157.41	0.083
Fibra de vidrio 25%	270	163.08	161.51	0.073

Teniendo esta información un poco más desglosada, podremos interpretar dichos resultados de las probetas de fibra de vidrio a distintas concentraciones y concluir sobre distintos aspectos lo siguiente:

a) Fuerza máxima por temperatura

La **Tabla 15** presenta la comparación directa de fuerza máxima entre ambos porcentajes de refuerzo a cada temperatura:

Tabla 15. Comparación de fuerza máxima entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio por temperatura

Temperatura	FV 10% (lbf)	FV 25% (lbf)	Diferencia (%)	Ventaja
250°C	166.62	175.76	5.50%	FV 25%
260°C	163.35	159.6	-2.30%	FV 10%
270°C	161.12	163.08	1.20%	FV 25%

Observaciones clave:

- A **250°C**, la fibra de vidrio al 25% muestra una **ventaja del 5.5%** sobre el 10%.
- A **260°C**, inesperadamente, la fibra de vidrio al 10% **supera al 25% por 2.3%**.
- A **270°C**, la diferencia es mínima (**1.2%** a favor del 25%).

b) Promedio general por concentración

La **Tabla 16** consolida los valores promedio de todas las temperaturas por cada concentración de fibra de vidrio:

Tabla 16. Promedio general de fuerza máxima y desviación estándar según porcentaje de fibra de vidrio

Concentración	Promedio (lbf)	DS promedio	Mejor temperatura
FV 10%	163.7	6.77	250°C (166.62)
FV 25%	166.15	10.23	250°C (175.76)

Diferencia general: *El 25% de fibra de vidrio muestra **1.5% más** de resistencia promedio que el 10%.*

c) Elongación de ruptura

La **Tabla 17** presenta la comparación de ductilidad entre ambos porcentajes de refuerzo:

Tabla 17. Comparación de elongación a la ruptura entre compuestos con 10% y 25% de fibra de vidrio por temperatura

Temperatura	FV 10% (in)	FV 25% (in)	Diferencia (%)	Ventaja
250°C	0.103	0.1	-2.9%	FV 10%
260°C	0.107	0.083	-22.4%	FV 10%
270°C	0.107	0.073	-31.8%	FV 10%

Tendencia clara: *El aumento de fibra de vidrio del 10% al 25% **reduce significativamente la ductilidad**, especialmente a temperaturas altas, donde la reducción alcanza hasta **31.8%**.*

d) Consistencia de resultados (Desviación estándar)

La **Tabla 18** evalúa la reproducibilidad mediante el análisis de desviación estándar:

Tabla 18. Desviación estándar y consistencia de resultados según porcentaje de fibra de vidrio y temperatura (10% y 25%)

Temperatura	DS FV 10%	DS FV 25%	Variabilidad
250°C	8.23	3.49	FV 25% más consistente
260°C	6.89	13	FV 10% más consistente
270°C	5.2	14.19	FV 10% más consistente

Análisis de consistencia:

- A **250°C**, el 25% de fibra muestra **mejor reproducibilidad** (DS = 3.49 vs 8.23).
- A **260°C y 270°C**, el 10% de fibra es **más consistente** (DS menores).

Conclusión en FG10% vs FG25%

Resumiendo, todos los resultados, tablas y análisis previos, los resultados muestran que incrementar la concentración de fibra de vidrio de 10% a 25% no garantiza una mejora en todas las propiedades mecánicas. Si bien a 250 °C el 25% de fibra de vidrio ofrece una resistencia máxima ligeramente superior (5.5% más), esta ventaja se reduce o incluso desaparece a temperaturas mayores. Además, un mayor contenido de fibra disminuye significativamente la ductilidad del material y puede aumentar la variabilidad de los resultados en condiciones térmicas elevadas. Por lo tanto, más fibra no siempre significa un mejor desempeño global: la elección del porcentaje de refuerzo debe basarse en el equilibrio entre resistencia, ductilidad y estabilidad requerido para cada aplicación específica. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar la formulación del compuesto según las necesidades del uso final, en lugar de asumir que una mayor concentración de fibra siempre será preferible.

5.4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FILAMENTO DE POLICARBONATO CON FIBRA DE VIDRIO

La **Tabla 19** presenta los valores consolidados de las propiedades mecánicas del policarbonato con fibra de vidrio, incluyendo promedio y desviación estándar de todas las probetas evaluadas en la Fase 2.

Tabla 19. Concentrado general de propiedades mecánicas de policarbonato con fibra de vidrio

Parámetro	Valor promedio	Desviación estándar
Fuerza máxima (lbf)	139.13	19.02
Fuerza de ruptura (lbf)	131.28	17.73
Elongación de ruptura (in)	0.178	0.012

Los puntos clave a tomar en cuenta y que se pueden concluir una vez analizado por exámenes de tensión este filamento son los siguientes:

- **Alta ductilidad:** Presenta la mayor elongación de ruptura entre los materiales evaluados (0.178 in), lo que indica una capacidad excepcional para deformarse antes de fracturarse.
- **Resistencia moderada:** Su fuerza máxima (139.13 lbf) es inferior a la de los compuestos con fibra de carbono o vidrio, fue el que menor resultado tuvo, pero no significa que es malo.
- **Variabilidad en resultados:** Ya que calculamos la desviación estándar en fuerza máxima (19.02) tal vez puede ser por afectación en los parámetros de impresión, que sea sensible a los cambios de los parámetros.

Su resistencia es **inferior** a la de los compuestos reforzados solo con fibra de carbono o fibra de vidrio, por lo que no es recomendable para aplicaciones estructurales o de alta carga mecánica.

Tal vez algunas aplicaciones viables por el que puede optar este material son:

- Componentes flexibles, protectores, piezas que requieran deformación controlada, prototipos y piezas de bajo esfuerzo, para evitar fracturas.
- Sectores como automotriz (retenes, soportes flexibles), biomédico (guías quirúrgicas, prótesis no estructurales) y consumo (envases resistentes a impacto, juguetes).

Esto porque vimos que puede tener mayor ductilidad que los demás materiales evaluados, pero no para una carga mayor, entonces la recomendación que se puede tener sobre este material es que es viable cuando se busca ductilidad y facilidad de impresión, pero no debe seleccionarse para piezas que requieran alta resistencia mecánica o precisión dimensional bajo carga. Un factor que se debe tomar en cuenta es que, al necesitar una temperatura relativamente alta en comparación de los otros materiales, siendo entre 260 °C a 280 °C podría requerir un equipo un poco más avanzado para la impresión, además de exigir mejor rendimiento a la impresora.

5.5 OBSERVACIONES SOBRE LA CALIDAD DE IMPRESIÓN Y ACABADO

5.5.1 Comparación de las condiciones de impresión: Ender 3 vs. K1C

La elección del tipo y la configuración de la impresora tienen un impacto crucial en las condiciones de impresión y, por lo tanto, en la calidad de las probetas impresas. Dado que la Creality Ender 3 mantiene un área de impresión abierta, mientras que la Creality K1C mantiene una cámara cerrada asegurando un mejor control de la temperatura ambiente, este punto resulta ser el más relevante. Cabe señalar que esta condición térmica es particularmente crucial para los materiales de PC y compuestos reforzados con fibra, ya que reduce las tensiones residuales en el sólido y minimiza la probabilidad de los defectos causados por un enfriamiento demasiado instantáneo o contracción.

5.5.1.1 Defectos de Fase 1: Ender 3

En las probetas impresas por la impresora Ender 3, se pueden identificar varios defectos que han afectado la calidad de la superficie superior de las muestras, así como las propiedades mecánicas que fueron bastante notables en los ejemplos y resultados anteriores, como se describen a continuación:

- **Porosidad alta.** Las muestras indicaron la estructura interna y de superficie con numerosos vacíos y huecos. El fenómeno indicado se debe a la falta de fusión adecuada de los filamentos, lo que a su vez es causado por las fluctuaciones en la temperatura del filamento y la impresión y presión de ambiente inestables. La porosidad hace que las piezas no sean lo suficientemente fuertes y duraderas, reduciendo la reproducibilidad de los resultados de los ensayos mecánicos.
- **Adherencia entre capas.** Las capas tienden a fusionarse mal, lo que puede verse en las líneas visibles en las probetas impresas, indicando las áreas donde las capas se despegan unas de otras. Este defecto también se debe a la temperatura de filamento inadecuada, enfriamiento rápido y mala calibración de la impresión.
- **Superficie rugosa y con marcas de puntos:** En lugar de marcas de superficie que salen lisas, las capas que se van formando mostraron capas con puntos y marcas de líneas a lo largo y ancho de misma. Que las capas se vean así puede deberse a la variación en la extrusión, la cual puede darse debido a bloqueos parciales de la boquilla, la velocidad intermitente del motor o el nivelado discontinuo de la cama. (Se habían realizado pruebas a distintas velocidades, pero seguía generando estos puntos al pasar por las capas)

A continuación, se describe la mejora en la **Fase 2** con la K1C:

- **Optimización de la porosidad:** Con la cámara cerrada y el ambiente estable, se logra disminuir la inestabilidad térmica al rededor del gcode, generando

menor cantidad de vacíos y una estructura interna más uniforme que permitieron una mejor lectura estructural y repetitividad de los resultados.

- **Mejor adherencia de capas:** Realmente se alcanza a distinguir mientras avanza de una capa a otra, que, si está pisándola de manera correcta y pueden tener una mejor adherencia, aunque sean los mismos parámetros de impresión, cuenta con el activo del ambiente controlado, el nivel de temperatura ambiente estable y la presión por extrusión en estado normal se logra tener una mejor fusión de capas, con menos zonas de dentado y una mancha menor por el mismo proceso de extrusión.
- **Resultados con menor variabilidad:** La desviación estándar de la fuerza máxima y la elongación de ruptura fue significativamente más baja en las muestras impresas con la K1C, demostrando que los ensayos fueron más confiables y repetibles. Resultados con mayor resistencia y ductilidad: las piezas impresas con la K1C obtuvieron valores más altos de fuerza máxima y elongación de ruptura en comparación con las impresas con la Ender 3, evidenciando la importancia de la calidad de impresión en la optimización del comportamiento mecánico de los compuestos.

5.6 CARACTERIZACIÓN TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

En esta sección se presenta el análisis termogravimétrico (TGA) de los materiales compuestos antes y después de la extrusión. Las **Figuras 43 a 50** muestran las curvas de descomposición térmica de cada material, identificando las temperaturas críticas de degradación y el contenido de fibra residual

- **PETG con fibra de carbono**

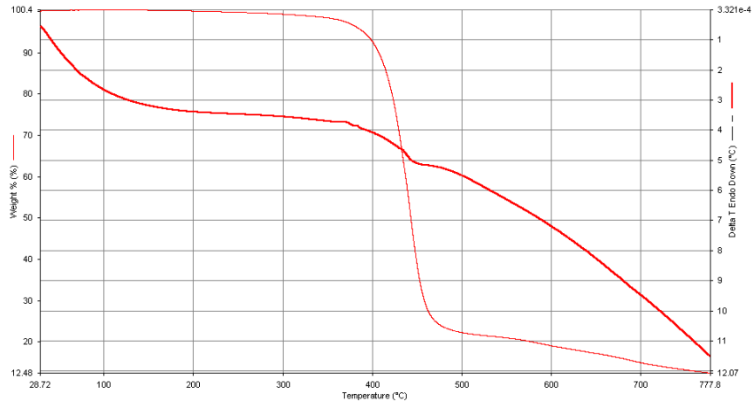


Figura 43 Curvas TGA del filamento de PETG con fibra de carbono antes de extruir. Se muestra la descomposición de la matriz y el residuo asociado al contenido de fibra de carbono.

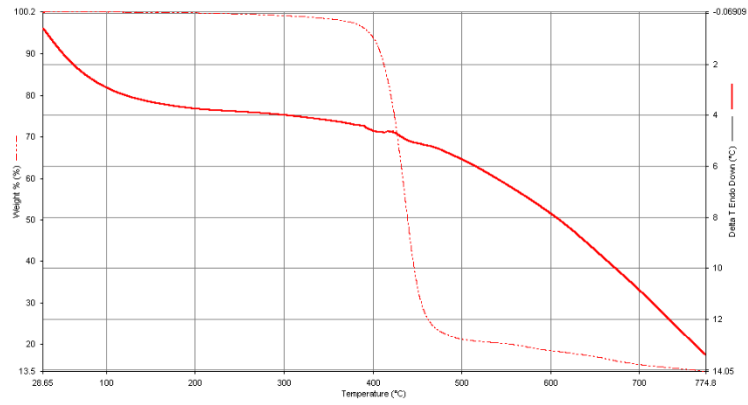


Figura 44 Curvas TGA del filamento de PETG con fibra de carbono después de extruir a 240°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se observa el comportamiento térmico del material extruido y el porcentaje de residuo.

- **ABS con fibra de vidrio al 10%:**

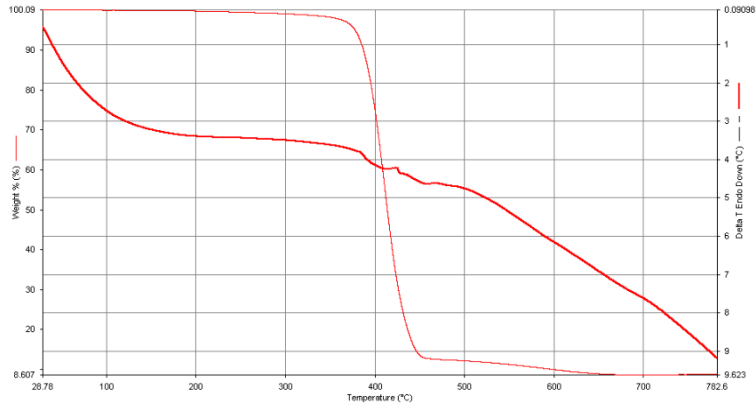


Figura 45 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 10 % antes de extruir. Se observa la pérdida de masa de la matriz polimérica y el residuo asociado al contenido de fibra de vidrio.

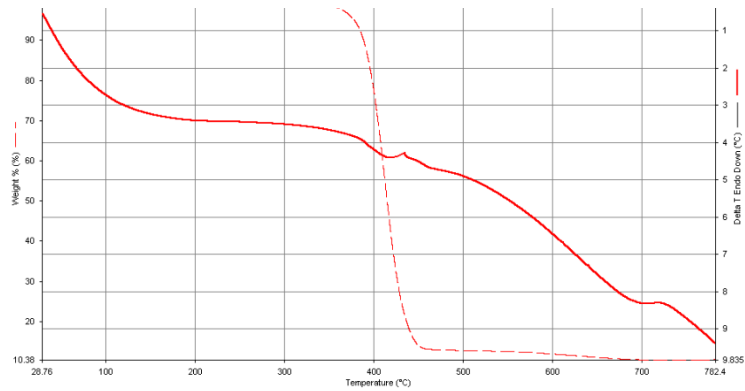


Figura 46 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 10 % después de extruir a 250°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se muestra el comportamiento de degradación térmica y el residuo final del material extruido.

- **Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%:**

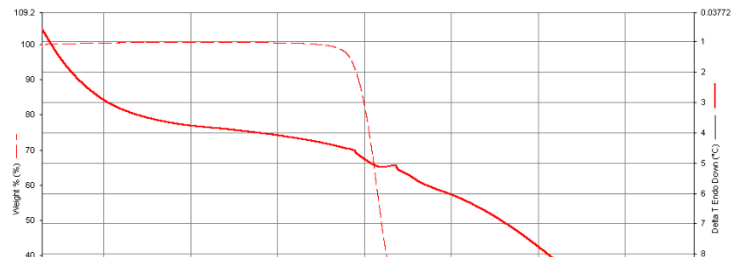


Figura 47 Curvas TGA del filamento de ABS con fibra de vidrio al 25 % antes de extruir. Se aprecia la variación de masa en función de la temperatura y el residuo correspondiente al refuerzo inorgánico.

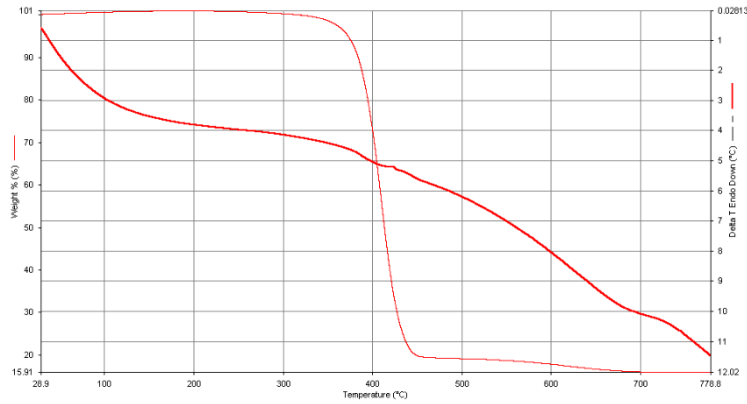


Figura 48 Curvas TGA del filamento de Ultra ABS con fibra de vidrio al 25 % después de extruir a 250°C través de una boquilla de 0.4 mm. Se observa el perfil de degradación térmica del material procesado y su residuo final.

- Fibra de vidrio con policarbonato:**

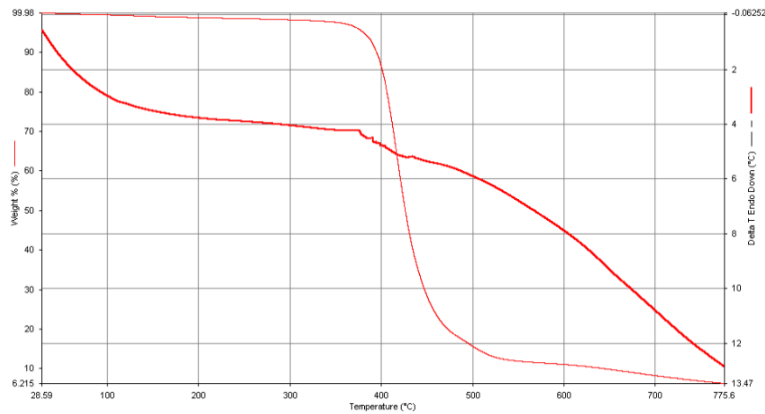


Figura 49 Curvas TGA del filamento de policarbonato con fibra de vidrio antes de extruir. Se aprecia la estabilidad térmica de la matriz de policarbonato y el residuo de fibra de vidrio.

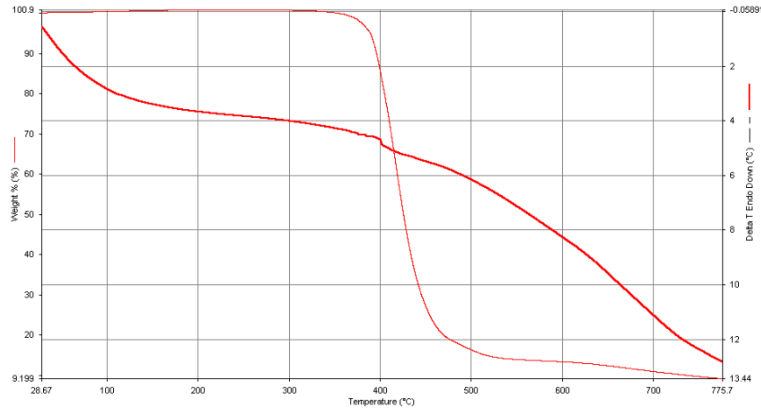


Figura 50 Curvas TGA del filamento de policarbonato con fibra de vidrio después de extruir 260°C a través de una boquilla de 0.4 mm. Se muestra el comportamiento de degradación térmica del material extruido y su residuo final.

5.6.1 Contenido del refuerzo determinado por TGA

Para determinar el contenido efectivo de refuerzo en cada material, se analizó el comportamiento de la curva de pérdida de peso (TG) en el rango completo de temperatura comprendido entre aproximadamente 28–30 °C y 775–780 °C. En estas gráficas, el eje vertical izquierdo representa el porcentaje de masa remanente (Weight %) en función de la temperatura, mientras que el eje horizontal indica la temperatura de ensayo en grados Celsius.

El procedimiento de análisis consistió en identificar el valor de masa residual al final del barrido térmico (≈ 775 °C). A esta temperatura extrema, se asume que la matriz polimérica orgánica se ha degradado y volatilizado casi en su totalidad, por lo que la masa que permanece corresponde exclusivamente a la fase inorgánica térmicamente estable, compuesta principalmente por las fibras de refuerzo (vidrio o carbono) y posibles residuos minerales o carbonosos generados durante la descomposición. Por lo tanto, el valor porcentual que marca la curva TG al final del ensayo se interpreta técnicamente como el contenido efectivo de refuerzo presente en cada muestra.

Para cada uno de los cuatro materiales evaluados, se comparó el residuo final en dos condiciones: filamento original (muestra "gruesa", antes de extruir) y filamento

procesado (muestra "delgada", después de pasar por la boquilla de 0.4 mm). Esta comparación permite evaluar si el proceso de extrusión FDM altera la composición o el contenido de refuerzo del material.

5.6.1.1 PETG con fibra de carbono

En el material de PETG reforzado con fibra de carbono, el análisis de las curvas TGA permite estimar con claridad la fracción inorgánica presente. Al finalizar el barrido térmico, cerca de los 775 °C, el filamento original conserva alrededor de un 14% de su masa, mientras que el material extruido a través de la boquilla de 0.4 mm muestra un residuo cercano al 12% (*Figuras 43 y 44*). Este porcentaje residual corresponde técnicamente a la fase de refuerzo fibra de carbono y posibles cenizas minerales, ya que para esa temperatura la matriz de PETG se ha degradado y volatilizado por completo.

La diferencia de aproximadamente dos puntos porcentuales entre ambas condiciones sugiere que, aunque el nivel de refuerzo se mantiene en el mismo orden de magnitud, existe una ligera variación en la proporción de fase inorgánica tras el proceso de extrusión. Esto podría deberse a cierta heterogeneidad natural a lo largo del carrete de filamento o a pequeñas diferencias en la cantidad de residuo carbonoso que deja la matriz al descomponerse. De todas formas, los valores confirman que el material conserva su carga de refuerzo de manera consistente, lo cual concuerda con el desempeño mecánico observado, donde la estabilidad de las propiedades depende más de los parámetros de impresión que de cambios drásticos en la composición del material.

5.6.1.2 ABS con fibra de vidrio al 10%

En el caso del material reforzado con fibra de vidrio al 10%, las curvas TGA muestran un comportamiento muy estable antes y después del procesado. Al finalizar el barrido térmico, alrededor de 782 °C, el filamento original conserva aproximadamente un 9.6% de su masa, mientras que el material extruido a través de la boquilla de 0.4 mm deja un residuo cercano al 9.9% (*Figura 45 y 46*). Este

porcentaje residual corresponde técnicamente a la fase inorgánica del compuesto —fibra de vidrio y posibles cargas minerales, mientras que el resto de la masa se atribuye a la matriz de ABS, que se degrada y volatiliza durante el calentamiento.

El hecho de que ambos valores sean prácticamente idénticos, con una diferencia mínima de apenas 0.3%, indica que el contenido efectivo de refuerzo se mantiene constante a lo largo del proceso de extrusión. No se aprecia una pérdida significativa de fase inorgánica ni variaciones marcadas en la composición, lo cual sugiere que la cantidad de fibra de vidrio en el material extruido es fiel a la del filamento original. Esto respalda la idea de que las diferencias observadas en las propiedades mecánicas de este material están más asociadas a las condiciones de impresión —temperatura, velocidad, orientación de capas— que a cambios en el porcentaje de refuerzo durante el procesado FDM.

5.6.1.3 Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%

En el material de Ultra ABS reforzado con fibra de vidrio al 25%, las curvas TGA confirman una notable estabilidad en el contenido de refuerzo antes y después del procesado. Al término del barrido térmico, cerca de los 778 °C, el filamento original conserva aproximadamente un 12.0% de su masa, mientras que la muestra extruida a través de la boquilla de 0.4 mm deja un residuo cercano al 11.7% (*Figura 47 y 48*). Este porcentaje residual corresponde a la fase inorgánica —fibra de vidrio y posibles cenizas—, mientras que el resto de la masa se atribuye a la matriz de ABS que se degrada térmicamente.

La diferencia de apenas 0.3 puntos porcentuales entre ambas condiciones indica que el contenido efectivo de refuerzo se mantiene prácticamente constante tras el proceso de extrusión. A diferencia de lo que podría ocurrir en compuestos con baja cohesión o segregación de fases, aquí no se observa una pérdida apreciable de fibra al pasar por la boquilla. Esto sugiere que, para este material, cualquier variación en las propiedades mecánicas finales dependerá más de la calidad de

la impresión y de la orientación de las capas que de cambios en la composición interna del filamento durante el proceso FDM.

Nota: Es importante notar que este valor experimental (12%) difiere significativamente del contenido nominal del 25% especificado para el producto comercial, esto se tocara un poco más en el **capítulo 6**.

5.6.1.4 Policarbonato con fibra de vidrio

En el compuesto de policarbonato con fibra de vidrio, las curvas TGA muestran un comportamiento muy consistente entre el filamento original y el material extruido. Al finalizar el barrido térmico, alrededor de 775 °C, el filamento sin procesar conserva aproximadamente un 13.5% de su masa, mientras que la muestra extruida a través de la boquilla de 0.4 mm deja un residuo cercano al 13.4% (*Figura 49 y 50*). Este porcentaje residual corresponde a la fase inorgánica del sistema —principalmente la fibra de vidrio y posibles cenizas minerales asociadas a la formulación—, mientras que el resto de la masa se atribuye a la matriz de policarbonato, que se descompone de forma gradual durante el calentamiento.

El hecho de que los valores de residuo antes y después de la extrusión sean prácticamente idénticos indica que el contenido efectivo de refuerzo se mantiene estable a lo largo del proceso FDM. No se aprecia una pérdida ni un enriquecimiento significativo de fase inorgánica, por lo que la cantidad global de fibra de vidrio en el compuesto puede considerarse constante independientemente de si el material se analiza en forma de filamento o ya extruido. Este resultado es coherente con la función estructural del material: bajo condiciones térmicas extremas la matriz de policarbonato se sacrifica casi por completo, mientras que la fibra de vidrio permanece como esqueleto inorgánico. Desde la perspectiva del diseño mecánico, esto sugiere que las variaciones en el desempeño de este material están más ligadas a los parámetros de impresión

(temperatura, estrategia de relleno, orientación de capas) que a cambios en el porcentaje de refuerzo durante la extrusión.

5.6.2 Estabilidad térmica de los materiales evaluados

La estabilidad térmica de los materiales compuestos se evaluó identificando las temperaturas críticas de degradación a partir de las curvas termogravimétricas (TG) y sus derivadas (DTG). En este análisis se consideran dos parámetros fundamentales: la temperatura de inicio de degradación (Tonset), que marca el punto donde comienza una pérdida de masa significativa asociada a la descomposición de la matriz polimérica, y la temperatura de máxima velocidad de degradación (Tmax), que corresponde a la región donde la descomposición es más intensa y se observa el máximo de la curva derivada de pérdida de peso.

Estos valores permiten determinar el rango de temperatura seguro para el procesamiento y uso de los materiales. Si la Tonset es considerablemente superior a la temperatura de extrusión utilizada en la impresión 3D (240–280 °C), se confirma que el material no sufre degradación térmica durante su fabricación. Asimismo, comparar estos valores entre los distintos compuestos permite identificar cuál ofrece mayor resistencia térmica para aplicaciones de ingeniería que requieran operar en ambientes de temperatura elevada.

A continuación, se detalla el comportamiento térmico observado para cada uno de los cuatro materiales estudiados.

5.6.2.1 PETG con fibra de carbono

El análisis de estabilidad térmica del PETG reforzado con fibra de carbono, en ambas muestras (antes y después de extruir), la curva TG muestra una pérdida de masa leve y gradual hasta aproximadamente 380 °C, punto que marca el inicio de la degradación significativa de la matriz polimérica (**Tonset** ≈ 380 °C). A partir de esta temperatura, la pérdida de masa se acelera notablemente, con la zona de

máxima velocidad de degradación (**Tmax**) ocurriendo en el rango de 400–480 °C, (*Figuras 43 y 44*). donde la curva presenta su mayor pendiente.

Este comportamiento es favorable desde la perspectiva del procesamiento por impresión 3D, ya que la **Tonset** (~380 °C) es significativamente superior a las temperaturas de extrusión utilizadas en los ensayos (240 °C), lo que confirma que el material mantiene su integridad estructural durante la fabricación y no sufre degradación térmica durante el proceso FDM. La fibra de carbono, como fase inorgánica, permanece estable a lo largo de todo el rango de temperatura analizado, proporcionando un refuerzo consistente incluso cuando la matriz se degrada.

Comparando ambas condiciones (filamento original y extruido), las curvas presentan formas prácticamente idénticas y la **Tonset** se mantiene en el mismo rango, lo que indica que el proceso de paso por la boquilla no altera las características de degradación térmica del compuesto. Este material, por lo tanto, es termalmente confiable para su uso en aplicaciones FDM estándar, con márgenes de seguridad adecuados entre su temperatura operativa de procesamiento y el punto donde comienza a degradarse.

5.6.2.2 ABS con fibra de vidrio al 10%

El comportamiento térmico del ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% es bastante consistente. Mirando las curvas, se puede ver que el material empieza a perder masa de forma más acelerada alrededor de 370–380 °C, lo cual indica dónde comienza la degradación de verdad. Después de ese punto, entre 400 y 450 °C es donde la pérdida se hace más fuerte y la curva cae más rápido (*Figuras 45 y 46*).

Lo bueno es que esa temperatura donde comienza a degradarse (380 °C) está bastante lejos de los 250 °C que usamos para extruir el material en la impresora. Eso significa que el ABS-GF10% no se quema ni se daña durante el proceso de

impresión 3D, lo cual es lo que queremos. La fibra de vidrio se queda ahí estable todo el tiempo, sin problemas.

Cuando comparo las dos muestras (antes y después de extruir), ambas se ven muy parecidas en el gráfico. No hay cambios importantes en dónde empieza la degradación ni en cómo se comportan. Esto sugiere que pasar el material por la boquilla no lo afecta térmicamente. El material aguanta bien el calor del proceso sin que algo extraño suceda.

5.6.2.3 Ultra ABS con fibra de vidrio al 25%

En el caso del ABS Ultra reforzado con fibra de vidrio al 25%, el análisis térmico muestra un comportamiento similar al del ABS estándar con 10%, pero con diferencias interesantes en el rango de degradación. La degradación significativa de la matriz comienza alrededor de 370–380 °C, muy similar al material con menor contenido de fibra. Sin embargo, lo que destaca es que el rango donde ocurre la pérdida más rápida se extiende desde aproximadamente 400 hasta 450 °C (*Figuras 47 y 48*), un intervalo ligeramente más amplio que el del ABS 10%.

Esta diferencia en el rango de degradación probablemente está relacionada con la formulación específica que da el proveedor sobre el "Ultra ABS", esto podría permitir una descomposición más gradual en un intervalo de temperatura más amplio, en lugar de concentrarse en un punto único. Además, el mayor contenido de carga inorgánica (fibra de vidrio y residuos) puede actuar como barrera térmica durante el calentamiento, ralentizando la velocidad de degradación y distribuyéndola a lo largo de un rango más extenso.

Lo importante es que ambos materiales mantienen márgenes de seguridad adecuados respecto a la temperatura de extrusión (250 °C), por lo que no existe riesgo de degradación durante el procesado FDM. Al comparar el filamento original con el extruido, las curvas son prácticamente idénticas, lo cual confirma que el proceso de extrusión no compromete la estabilidad térmica. Este material

sigue siendo seguro y estable para aplicaciones de impresión 3D convencional, incluso considerando que el contenido real de refuerzo medido por TGA (12%) es menor al nominal del 25%.

5.6.2.4 Policarbonato con fibra de vidrio

En el caso del policarbonato reforzado con fibra de vidrio, las curvas TGA muestran un material térmicamente muy estable. La pérdida de masa apreciable comienza alrededor de los 380–390 °C, lo que indica que la matriz de policarbonato empieza a degradarse a temperaturas algo más altas que las observadas en los compuestos de ABS. A partir de ese punto, la descomposición se vuelve más marcada y se concentra principalmente en el intervalo aproximado de 400 a 500 °C (*Figuras 49 y 50*), donde la curva presenta la caída más pronunciada.

Este comportamiento es favorable desde el punto de vista del uso práctico. La temperatura a la que el material empieza a degradarse está bastante por encima de la temperatura de impresión utilizada para este filamento (260 °C), por lo que se puede concluir que el policarbonato con fibra de vidrio no sufre degradación térmica durante el proceso de extrusión en la impresora 3D. La fibra de vidrio se mantiene estable en todo el rango de temperatura evaluado y queda como residuo al final del ensayo, actuando como fase rígida que sostiene la estructura cuando la matriz ya se ha descompuesto.

Si se comparan las curvas del filamento original y del material extruido, el comportamiento es prácticamente el mismo: comienzan a degradarse en el mismo rango de temperatura y siguen trayectorias muy parecidas. Esto indica que el paso por la boquilla de 0.4 mm no altera la estabilidad térmica del compuesto. En conjunto, los resultados confirman que el policarbonato con fibra de vidrio es el material más robusto térmicamente dentro de los evaluados, y que ofrece un margen de seguridad amplio entre las temperaturas de procesamiento y las temperaturas a las que realmente empieza a descomponerse, lo que lo hace

especialmente atractivo para aplicaciones donde las piezas impresas estarán sometidas a condiciones de servicio más exigentes en temperatura.

5.6.3 Efecto del proceso de extrusión en la composición

Para analizar si el proceso de extrusión modifica la composición de los materiales, se comparó el porcentaje de residuo obtenido en las pruebas TGA para cada compuesto, antes y después de pasar por la boquilla del extrusor de 0.4 mm. En cada ensayo, el equipo de TGA toma la masa inicial de la muestra como 100% (aunque un poco mayor en las imágenes) y registra cuánto porcentaje de esa masa permanece al final de la prueba, ese residuo final corresponde a la fracción que no se descompone (principalmente la fibra de refuerzo ya sea vidrio o carbono y las cenizas de los aditivos), mientras que el resto de la masa se pierde en forma de gases durante la degradación de la matriz polimérica.

Debido a que el residuo se expresa como porcentaje relativo de la masa inicial, aquí en este caso si es posible comparar directamente los valores obtenidos para muestras distintas del mismo material, aunque la cantidad exacta de muestra no haya sido la misma en todos los ensayos. Las diferencias pequeñas en el residuo se pueden atribuir a la variabilidad normal del muestreo y del método, mientras que variaciones más grandes podrían indicar cambios reales en la cantidad de fase inorgánica después de la extrusión.

En la **Tabla 20** se resumen los valores de residuo final obtenido en las pruebas TGA para cada material en las dos condiciones evaluadas (filamento original y material extruido), así como la diferencia entre ambos casos.

Tabla 20. Porcentaje de residuo inorgánico antes y después de la extrusión: verificación de estabilidad composicional

Material	Residuo antes (%)	Residuo después (%)	Diferencia
PETG con fibra de carbono	~12	~14	+2
ABS con fibra de vidrio 10%	~9.6	~9.9	+0.3
ABS Ultra con fibra de vidrio 25%	~11.7	~12.0	+0.3
PC con fibra de vidrio	~13.47	~13.44	-0.03

Si se analiza la tabla, lo que puede resaltar es que en la mayoría de los materiales prácticamente no hay cambio, en el ABS con vidrio al 10%, la diferencia es de apenas 0.3 de diferencia (*Figuras 45 y 46*), mientras que en el ABS Ultra con vidrio al 25%, es prácticamente lo mismo 0.3 (*Figuras 47 y 48*). El policarbonato con fibra de vidrio es aún más estable, con una diferencia de solo 0.03, lo que es básicamente nada (*Figuras 49 y 50*).

El PETG con fibra de carbono presenta una diferencia más notable: el residuo aumenta de 12% en el filamento original a 14% en el material extruido, representando un incremento de 2.0 (*Figuras 43 y 44*). Este comportamiento es interesante porque, contrario a lo que podría esperarse si hubiera pérdida de fibra durante la extrusión, el residuo se incrementa ligeramente. Esto podría deberse a que el fragmento de material extruido provenía de una sección del filamento con un contenido de refuerzo ligeramente superior al del fragmento original muestreado, reflejando la variabilidad natural en la distribución de fibra a lo largo del carrete comercial. En cualquier caso, el aumento en el residuo no indica degradación del material, sino simplemente que las muestras tenían composiciones ligeramente diferentes.

En conjunto, los resultados indican que el proceso de extrusión FDM **no** modifica de manera significativa la composición global de los materiales compuestos. Las pequeñas variaciones observadas (menores a 0.3 en la mayoría de los casos, y

de 2 puntos en el PETG) se encuentran dentro de la variabilidad esperada del método y del muestreo, y no evidencian pérdida real de refuerzo durante la impresión 3D. La cantidad de fibra de carbono o de vidrio presente en el filamento comercial se mantiene prácticamente igual después de la extrusión a través de la boquilla de 0.4 mm.

Este resultado es importante porque permite atribuir las diferencias en el comportamiento mecánico de las probetas impresas principalmente a factores propios del proceso de impresión como la orientación de las capas, la calidad de adhesión entre ellas y la distribución interna del refuerzo y no a cambios en el porcentaje de refuerzo durante la fabricación. En otras palabras, si una probeta resulta más rígida o resistente que otra, eso se debe a cómo se imprimió, no a que haya perdido o ganado fibra en el camino.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se realiza un análisis crítico de los resultados obtenidos a lo largo del estudio, con el propósito de comprender los factores que influyeron en el comportamiento mecánico de los materiales evaluados. Esta reflexión permite no solo validar los resultados obtenidos, sino también proponer ajustes que fortalezcan la confiabilidad y el desempeño en futuros experimentos o aplicaciones de ingeniería.

El análisis se estructura a partir de cinco ejes principales, los cuales abordan los aspectos más relevantes que influyeron en los resultados del proyecto que se describen a continuación.

6.1.1 Impacto de la metodología de fabricación (Fase 1 vs. Fase 2)

Como se observó anteriormente a lo largo de los resultados se contaba con 2 fases de metodologías para la creación de la probeta designada de acuerdo a la norma ISO 5278-4

En contraste, la reducción de defectos microestructurales es lo que marcó la diferencia más significativa entre la **Fase 1 y 2**. Durante la impresión directa con 4 paredes que se implementó en la Ender 3, hubo una tendencia obvia a la porosidad. Como se documenta ampliamente en la investigación, la porosidad es un defecto importante que perjudica la integridad de la pieza, ya que los espacios vacíos son un punto débil donde las grietas pueden iniciar bajo carga. Incluso ha habido estudios recientes que han ilustrado que la porosidad puede reducir la resistencia a la tracción en comparación con el diseño de impresión hasta en un 30%, dependiendo de la configuración de la impresora y del material. En este caso, la presencia de porosidad se relaciona directamente con los valores más bajos de resistencia máxima y elongación en la fase 1.

Al aplicar la metodología de las tabletas CNC con relleno 100% en la K1C, la estructura de la probeta mejoró de manera significativa. Estos factores no solo optimizaron la transferencia de la carga interna en el compuesto, sino que también mejoraron la resistencia máxima y la ductilidad. La investigación de Wang (et al., 2020) afianza estos resultados, ya que sugieren que el mecanizado post-proceso y la eliminación de defectos de la superficie pueden aumentar la fuerza de las piezas impresas en 3D en un 40%. Por ejemplo, en nuestro estudio, las tabletas de fibra de carbono aumentaron su carga de fuerza máxima de 161.5 lbf a 212.45 lbf, es decir, un 31% fue la mejora. Comparativamente, la fibra de vidrio 10% de relleno desecho tuvo una mejora del 29%. La reducción de la porosidad no fue el único factor, además, la distribución homogénea de las fibras fue clave en la mejora del material. Durante la fabricación de impresión directa, las fibras se alinean naturalmente con el patrón de depósito, lo que puede resultar en debilidades anisotrópicas inherentes. Nuestro mecanizado CNC en la Fase 2 podría orientar las fibras de manera más organizada y aleatoria, lo que conduciría a un comportamiento isotrópico en lugar de la tracción. Este fenómeno ha sido demostrado por estudios recientes como el de Kováč y Kováčová, 2023, quienes demostraron que la orientación de las fibras juega un papel crítico en el módulo de elasticidad y la carga de ruptura de los compuestos impresos.

El ambiente controlado en la K1C también fue vital. La cámara cerrada mantuvo una temperatura de ambiente constante a lo largo de la impresión, evitando un enfriamiento repentino como en el caso de la Ender 3. Este control térmico redujo tensiones residuales y mejoró la adherencia entre capas, produciendo superficies más suaves y menos delaminaciones. Estudios como el de Lui (et al, 2022) sugieren que ambientes térmicos estables pueden reducir la variabilidad en propiedades mecánicas por hasta un 30%, y este resultado es congruente con la evidencia observada en nuestro estudio ya que la desviación estándar para la fuerza máxima se redujo de manera notoria en la Fase 2.

6.1.2 Efecto del porcentaje de fibra de vidrio en pruebas mecánicas (10% vs. 25%)

El segundo punto por discutir fue un tema bastante relevante al momento de crear el proyecto, utilizar un filamento que es de fibra de vidrio pero que cuente con distintas concentraciones para poder revisar cuales son las diferencias entre los materiales.

En base a las pruebas anteriores, puede concluirse que, en general, el aumento de la fracción de fibra de vidrio **no** se traduce automáticamente en un mejor rendimiento del material. En este particular, a 250 °C, un compuesto con un 25% de fibra mostró una resistencia máxima aproximadamente 5.5% mayor que en el caso de un compuesto con un 10% de fibra. Esta mejora en la rigidez se puede explicar por la mayor capacidad del segundo compuesto para soportar una carga sin degradarse. Sin embargo, también resultó en una resistencia a la extensión significativamente menor: el material se volvió mucho más frágil y menos flexible. A 260 °C y 270 °C, el beneficio del 25% de compuesto se redujo significativamente: a 260 °C, el compuesto con un 10% de fibra fue incluso ligeramente más fuerte que el de 25%, mientras que a 270 °C la diferencia fue mínima y los resultados fueron más variables.

Esto puede explicarse por un deterioro térmico de la matriz, durante el cual los altos niveles de fibra y temperatura generan defectos en la interfaz fibra-matriz. La eficacia del refuerzo se reduce debido a una adhesión significativamente peor.

Uno de los hallazgos relevantes fue que, aunque el material del 25% se comercializa nominalmente con esa concentración, el análisis termogravimétrico (TGA) reveló un contenido real de refuerzo inorgánico aproximadamente del 12%, es decir, significativamente menor al nominal. El material del 10%, por su parte, mostró un residuo cercano al 9.6–9.9%, lo que también sugiere una variación respecto a lo declarado. Esta discrepancia entre el contenido nominal y el experimental es importante porque explica parcialmente por qué las mejoras en

propiedades mecánicas no fueron tan dramáticas como se esperaría. Un aumento de 3% en fibra real (de 9.6% que muestra experimentalmente tener supuestamente el de fibra de vidrio con 10% a un 12% que experimentalmente obtuvimos del filamento de fibra de vidrio supuestamente es de 25%) no produce los mismos beneficios que un aumento de 15 puntos porcentuales (de 10% nominal a 25% nominal).

Además, el análisis de estabilidad térmica mediante TGA mostró que ambos materiales comienzan su degradación significativa alrededor de 370–380 °C, lo que confirma que ninguno de ellos se degrada durante el procesado FDM (a 250–270 °C). Sin embargo, la distribución de la degradación en el rango de 400–450 °C fue ligeramente más extendida en el material del 25%, probablemente porque la formulación "Ultra ABS" incluye aditivos estabilizantes que ralentizan la descomposición de la matriz.

Además, el mayor nivel de fibra significa que el material no se incorpora uniformemente, lo que provoca una adhesión peor y una mayor variabilidad de los resultados. Estos hallazgos concuerdan con otras investigaciones recientes. Por ejemplo, Dizon (et al.) sostienen que, mientras que el nivel de compuesto aumentado puede resultar en una mayor resistencia y rigidez, también tiene un efecto negativo en la flexibilidad y sensibilidad al daño si el nivel de temperatura o la calidad de la interfaz no se controlan completamente. S, Valdez (2022), de manera similar, ilustran cómo los niveles superiores de temperatura y compuesto dañan la interfaz matriz-refuerzo, lo que reduce la capacidad mecánica del material. Por lo tanto, el nivel de fibra de vidrio debe elegirse sobre la base de un equilibrio entre la resistencia y la flexibilidad y el rango de temperatura de impresión. Un nivel mayor no siempre se traduce en beneficio, especialmente en áreas cercanas al límite de densidad del material. Por tanto, su optimización debe realizarse en base a los criterios de uso especiales, enfocados en la reproducibilidad y el funcionamiento bajo circunstancias reales.

6.1.3 Comportamiento del filamento de fibra de vidrio con policarbonato

Esta combina flexibilidad del polímero con la fibra de vidrio, por lo tanto, como se pudo observar con el material impreso en 3D del policarbonato reforzado con fibra de vidrio, su capacidad para deformarse considerablemente antes de fracturarse, siendo un claro ejemplo la elongación de ruptura extraordinariamente alta en comparación con otros compuestos que se han probado a lo largo de este estudio, pero no llegando a un punto de estrés mecánico bastante elevado.

Esta característica se ve respaldada también por su desempeño térmico. El análisis termogravimétrico mostró que el policarbonato con fibra de vidrio es el material más robusto térmicamente de los evaluados, iniciando su degradación significativa alrededor de 380–390 °C, ligeramente superior a la del ABS (~370–380 °C). Esto permite que el PC pueda procesarse con márgenes de seguridad más amplios respecto a la temperatura de extrusión, lo que facilita una mejor fusión entre capas y una interfaz fibra-matriz más coherente. Además, el residuo de TGA (~13.5%) fue prácticamente idéntico antes y después de la extrusión, confirmando que el contenido de refuerzo se mantiene estable durante el procesado, lo que contribuye a la consistencia de las propiedades mecánicas en este material.

Se atribuye esta característica al policarbonato, que de por sí es un termoplástico resistente con una gran capacidad de absorción de energía a través de la deformación plástica, incluso si es reforzado con fibra. Sin embargo, la interacción entre la matriz de policarbonato y fibra de vidrio **no es perfecta**: por un lado, la fibra proporciona rigidez y resistencia, pero por otro lado se desarrollan manchas en las que la transferencia de esfuerzos entre dos materiales está comprometida, especialmente en áreas con distribución de fibras dispereja o defectos en interfaz.

Lo que sucede en la práctica es que, al aplicar una carga, el policarbonato se deforma de manera elástica al principio, pero al superar un cierto umbral, comienza a deformarse plásticamente, permitiendo que la energía se desprenda

por su matriz. Mientras tanto, las fibras de vidrio intentan frenar la propagación de grietas planas y distribuir los esfuerzos alrededor, y si la interfaz entre fibra y matriz no es óptima porque no está bien impregnada o temperaturas de impresión son muy bajas, micro grietas y huecos aparecen. actuar como concentradores de esfuerzo.

Además, puede explicar la razón de los valores de resistencia máxima para el compuesto, ya que, a pesar de su manejabilidad, los valores no pueden llegar a la magnitud de la fibra de carbono o ABS reforzada con fibra de vidrio. Además, también señala la razón de la variabilidad en los resultados.

La presencia de estos defectos se ve agravada por la sensibilidad del policarbonato a los parámetros de impresión, en particular al engrosamiento que sufre el material impreso. Por un lado, si la temperatura es insuficiente, la fusión entre capas no es total y la adhesión entre capas se ve comprometida, favoreciendo la porosidad y la delaminación. Por otro, si la temperatura es demasiado alta y el policarbonato se degrada, se reduce aún más la integridad de la interfaz fibra-matriz. Además, la fibra de vidrio es considerablemente más rígida que la matriz, lo que genera zonas de concentración del esfuerzo donde la matriz se deforma más fácilmente. Pueden ocurrir prematuramente si la carga se concentra en esos puntos fracturas.

Esto supone, de manera práctica, que el policarbonato reforzado con fibras de vidrio es ideal para aplicaciones en las que la resistencia máxima no es la única o la más relevante. Por ejemplo, componentes expuestos a golpes repetidos, como pueden ser protectores, coberturas de dispositivos electrónicos, juntas flexibles, piezas biomédicas que han de experimentar un cierto grado de deformación antes de la fractura. Para aprovechar al máximo estas ventajas, se debe entonces optimizar los parámetros de impresión, especialmente la temperatura y la velocidad de extrusión, y plantearse posibles tratamientos posteriores como el

lijado o la cobertura superficial, para reducir la porosidad y mejorar la integridad de la interfaz.

Entre las posibles mejoras estaría la exploración de tipos de “agentes de acoplamiento” que favorezcan la interacción entre las superficies de fibra de vidrio y la matriz de policarbonato, reduciendo así la probabilidad de la aparición de micro grietas y vacíos. Otra posibilidad podría ser un control estricto de la densidad de las fibras a lo largo de cada caso, por ejemplo, con mezcladores en la extrusora o con filamentos pre impresos con fibras pre orientadas. Por último, tener en cuenta las condiciones de temperatura de impresión y humedad circular para minimizar los defectos y aumentar la reproducibilidad de los resultados. En términos de aplicaciones industriales, este tipo de compuesto definitivamente tiene un alto valor adicional en la automoción, electrónica y biomecánica, sabiendo que los requisitos básicos son la alta resistencia, baja densidad y capacidad de absorber golpes. Sin embargo, el comportamiento relativamente variable en proporcionar resultados de los experimentos indica que la aplicación precisa de durabilidad y propiedades mecánicas debería ser la prioridad de futuros estudios.

6.1.4 Influencia de la temperatura de impresión

En este punto vamos a centrarnos en por que la temperatura si afecta, a la impresión, ya que se pudieron dar cuenta en cada caso de las probetas, al analizar las gráficas de tensión de los cuatro materiales evaluados (PETG-CF, ABS-GF10, ABS-GF25 y GFPC), se observa con claridad que la temperatura de impresión es un factor decisivo en el desempeño mecánico de cada uno. No se trata solo de un parámetro técnico más: su correcto ajuste puede marcar la diferencia entre una pieza robusta y otra con defectos evidentes.

Desde la perspectiva térmica, el análisis TGA confirmó que todos los materiales evaluados son térmicamente estables a las temperaturas de extrusión utilizadas en este trabajo (240–280 °C). El PETG y el ABS comienzan su degradación significativa aproximadamente a 370–380 °C, mientras que el policarbonato es

más robusto, iniciando su degradación alrededor de 380–390 °C. Esto significa que existe un margen de seguridad suficiente entre las temperaturas de procesamiento y el punto donde realmente comienza el daño térmico de la matriz. Por lo tanto, la degradación térmica no es el factor limitante en este rango de impresión. Sin embargo, el análisis TGA también mostró que, dentro de ese margen seguro, cambios pequeños en temperatura sí pueden afectar la calidad de la interfaz fibra-matriz y la adhesión entre capas, no porque el material se esté quemando, sino porque la matriz sufre cambios en su estructura molecular que comprometen la cohesión interna.

En el caso del PETG reforzado con fibra de carbono, la resistencia máxima se alcanzó a temperaturas cercanas a 250 °C. Sin embargo, al superar este valor, la matriz comenzó a mostrar signos de degradación, lo que se tradujo en una caída de la resistencia. Esto coincide con lo reportado por Valdez et al. (2022), quienes encontraron que temperaturas superiores a 250 °C pueden afectar negativamente la cohesión interna del PETG, generando micro grietas y reduciendo la capacidad de carga del material. Para este material, la recomendación principal es mantener la temperatura de impresión en el rango **óptimo** y evitar sobrecalentamientos que comprometan la integridad de la matriz.

Para el ABS reforzado con fibra de vidrio al 10% y al 25%, la situación es similar, aunque con matices. El ABS es especialmente sensible a la temperatura: mientras que a 250 °C la resistencia es aceptable, el incremento a 260 °C generó una caída notable en la resistencia del compuesto con 25% de fibra. Esto se explica porque el ABS, al igual que el PETG, comienza a degradarse a altas temperaturas, lo que afecta la adhesión entre la fibra y la matriz y propicia la formación de defectos internos. Estudios recientes, como el de Efecto de los parámetros de impresión 3D en la resistencia mecánica del ABS, destacan que la temperatura de impresión debe estar cuidadosamente controlada para evitar la pérdida de propiedades mecánicas y asegurar una buena adhesión intercapas. Además, la literatura

señala que la adhesión entre capas de ABS es un factor determinante para que las propiedades finales del producto sean las esperadas.

El policarbonato reforzado con fibra de vidrio presentó un comportamiento distinto: su resistencia mejoró progresivamente hasta los 280 °C, lo que se atribuye a la necesidad de una mayor fluidez para asegurar la compactación y la eliminación de poros. Sin embargo, este material mostró una variabilidad elevada en los resultados, lo que sugiere que la distribución de las fibras y la homogeneidad de la matriz pueden verse afectadas por pequeños cambios en la temperatura o en la velocidad de impresión. Investigaciones como la de Liu et al. (2022) confirman que el policarbonato requiere condiciones térmicas estrictas para maximizar sus propiedades y minimizar la aparición de defectos.

En general, la experiencia y los datos obtenidos indican que cada material tiene una “ventana térmica” específica dentro de la cual su desempeño es óptimo. Temperaturas demasiado bajas generan fusión incompleta y defectos internos, mientras que temperaturas excesivas degradan la matriz y debilitan la interfaz fibra-matriz. Además, la alta variabilidad observada en algunos casos refleja la importancia de controlar no solo la temperatura, sino también otros parámetros como la velocidad de impresión y el secado previo del filamento.

6.1.5 Variabilidad y reproducibilidad de los resultados

Lo más relevante al realizar el análisis comparativo entre los resultados de la Fase 1, obtenidos con la Ender 3, y los de la Fase 2, realizados con la K1C, fue la notable diferencia en la consistencia de los datos. La Ender 3, que es una impresora abierta sin cámara cerrada, tenía un ambiente de impresión muy inestable en cuanto a temperatura. Como resultado, las piezas salían mucho más defectuosas: algunas veces porosas, a menudo separadas entre capas, y esto se reflejaba notoriamente en resistencia y ductilidad. Por ejemplo, con 25 % de fibras de vidrio, los valores de resistencia entre probetas variaban bastante, lo que lleva a notar ciertas deficiencias sobre si la calidad de la impresión era buena. Además,

la Ender presentaba problemas técnicos: a veces el filamento se atoraba, a veces la cama no estaba perfectamente nivelada, y esto hizo que fuese imposible sacar todas las piezas si no eran viables, adicional de que se detuviera la impresión. Lo que limitó la cantidad de datos viables y, aunque intenté compensar, deformó la fiabilidad de los resultados con esta impresora.

Sin embargo, trabajar con la K1C fue una experiencia muy diferente, con cámara cerrada, la temperatura era mucho más estable, lo que significaba que las capas se unían mejor y tenían menos deficiencias. Incluso al imprimir más de una muestra de varias pruebas, los resultados eran más consistentes, la variabilidad disminuyó drásticamente. Eso inspiró mucha más confianza en los resultados. Sin embargo, el de fibra de vidrio con policarbonato, aun mostrando cierta variabilidad, incluso con la K1C. Supongo que debido a la sensibilidad del material al proceso de impresión. Cualquier cambio de temperatura, velocidad, o humedad que el filamento absorbe, puede deformar la pieza final con una burbuja o poro.

Al final, se argumentó que la variabilidad no solo es cosa del material, sino también del control que puedes ejercer al imprimir. Por ende, para impresiones más confiables y reproducibles, es esencial una impresora cerrada, cámara húmeda y térmica, y usar post-procesos. Por consiguiente, no solo las piezas saldrían mejor, sino que podrán confiar realmente para usarlas en aplicaciones donde la consistencia sea necesaria.

6.2 IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPADO

Durante el proceso de prototipado, uno de los principales problemas fue la enorme diferencia de desempeño entre las impresoras utilizadas. Esta brecha no solo afectó la calidad y la consistencia de las piezas, sino que también significó un costo importante: Se adquirió una nueva impresora para poder mejorar los resultados y garantizar la confiabilidad del proceso. Además, el desperdicio de filamento debido a impresiones fallidas o defectuosas representó un gasto

adicional considerable, ya que cada error implicaba volver a imprimir y consumir más material.

Sin embargo, el reto más grande estuvo en el post-procesado. Al cortar las piezas con CNC, las tabletas no salían con la silueta exacta al 100%, lo que obligaba a reimprimirlas para intentar un nuevo corte preciso. Este ciclo repetitivo de impresión y corte incrementó aún más el consumo de filamento y el tiempo invertido en el proyecto, generando costos adicionales y retrasos importantes. Esto dejó claro que tener equipos de impresión confiables y procesos de post-procesado precisos es fundamental para optimizar recursos y tiempos en el desarrollo de prototipos funcionales, y que cualquier falla en estos aspectos puede tener un impacto significativo en el presupuesto y en la eficiencia del proyecto.

6.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el desarrollo de este proyecto, se identificaron varias limitaciones técnicas al trabajar con la Ender 3, las cuales influyeron directamente en el proceso de impresión y en la calidad de las probetas. Una de las principales dificultades fue la temperatura del extrusor: simplemente no podía superar los 250 °C sin que la máquina comenzara a tener problemas. El termistor, que es el sensor de temperatura, a veces detectaba un supuesto sobrecalentamiento y apagaba la impresora automáticamente, lo que me obligaba a reiniciar y perder tiempo valioso. También intenté usar boquillas más finas, como las de 0.1, 0.2 y 0.3 mm, pero el filamento se atascaba constantemente y no fluía bien, haciendo imposible continuar con la impresión. Por eso, terminé usando una boquilla estándar de 0.4 mm, que me permitió un flujo más estable y menos problemas durante el proceso.

Además, la velocidad de impresión estaba bastante limitada: tenía que imprimir a 50 mm/s para evitar que las piezas salieran mal, pero esto hacía que cada probeta tardara hasta una hora en fabricarse. Otra limitación importante fue la calidad superficial de las piezas impresas con la Ender 3: las probetas quedaban con

superficies muy irregulares, con puntos y rayones visibles, lo que afectaba no solo la estética, sino también la integridad superficial y posiblemente la resistencia mecánica.

Otro problema que enfrenté fue la humedad en los rollos de filamento. Durante los primeros intentos, noté que el filamento absorbía humedad del ambiente, lo que provocaba ruidos de burbujeo durante la impresión y afectaba la calidad de las piezas. Para solucionar este problema, tuve que adquirir un deshumidificador y almacenar los rollos en un ambiente controlado, lo que mejoró notablemente la estabilidad del proceso y redujo la aparición de defectos internos.

Todas estas restricciones hicieron que el proceso fuera más lento y menos eficiente, y también afectaron la consistencia de los resultados, sobre todo cuando comparé estos resultados con los obtenidos en la K1C, donde las condiciones de impresión eran mucho mejores y más controladas.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las siguientes conclusiones responden al objetivo general y a los cuatro objetivos específicos planteados en esta investigación, destacando los hallazgos experimentales y su relevancia para la industria manufacturera de Baja California.

La evaluación de las propiedades mecánicas y térmicas de los cuatro materiales compuestos avanzados para impresión 3D analizados —fibra de carbono (PETG-CF), fibra de vidrio al 10% (ABS-GF10), fibra de vidrio al 25% (Ultra ABS GF25) y policarbonato con fibra de vidrio (PC-GF)— se llevó a cabo de manera satisfactoria mediante la caracterización bajo la norma ISO 527-4 a tres temperaturas de procesamiento (250 °C, 260 °C y 270 °C), así como a través del análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados validaron la viabilidad de estos materiales para aplicaciones de diseño mecánico. Asimismo, la metodología experimental en dos fases permitió optimizar la reproducibilidad de los datos, demostrando que el control preciso de los parámetros de impresión y del post-procesado es un factor crítico para obtener propiedades consistentes. Los análisis térmicos confirmaron que las temperaturas de procesamiento empleadas (240–280 °C) se encuentran dentro de márgenes seguros, garantizando la integridad estructural de la matriz polimérica sin evidencia de degradación prematura.

El análisis comparativo de desempeño permitió identificar los materiales más adecuados en función de requerimientos específicos de diseño. El PETG-CF se consolidó como la opción óptima para aplicaciones de alto desempeño al alcanzar la mayor resistencia promedio a la tracción (212.45 lbf). El ABS-GF10 se validó como una alternativa confiable para aplicaciones industriales estándar que demandan consistencia y reproducibilidad, reflejada en una desviación estándar inferior a 5.2 lbf. Por su parte, el policarbonato con fibra de vidrio se identificó como el material preferente para entornos de alta temperatura, debido a su elevada estabilidad térmica (Tonset \approx 410 °C). De manera adicional, se obtuvo un hallazgo relevante en términos de control de calidad: el filamento Ultra ABS GF25, a pesar de su denominación comercial, presenta un contenido real aproximado

del 12% de fibra de vidrio en lugar del 25% nominal. Esta discrepancia, detectada mediante TGA (residuo real: 12.02%), explica su desempeño mecánico inferior al esperado y subraya la necesidad de validar las especificaciones de los proveedores mediante técnicas de caracterización analítica antes de su implementación en procesos industriales.

Los materiales seleccionados se incorporaron de manera satisfactoria en la fabricación de probetas funcionales. La transición metodológica de la Fase 1 — basada en extrusión directa con una impresora Ender 3— a la Fase 2 —mediante extrusión de alta velocidad en la impresora K1C complementada con post-procesado por corte CNC— resultó determinante para mejorar la calidad final de los prototipos. Los resultados confirman que la implementación de procesos de post-procesado de precisión y el uso de equipamiento confiable permiten superar las limitaciones propias de la tecnología FDM de bajo costo, posibilitando la producción de componentes funcionales con tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones de ingeniería.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se establecieron criterios técnicos sólidos para la selección y uso de materiales avanzados en impresión 3D, concebidos como una referencia para la toma de decisiones en empresas manufactureras de Baja California. Estos criterios incluyen la selección basada en evidencia experimental, priorizando materiales validados frente a opciones con especificaciones nominales no verificadas; la validación de insumos mediante protocolos de caracterización como el TGA para confirmar el contenido real de refuerzo en materiales compuestos; la adecuación tecnológica del equipamiento de impresión y post-procesado en función de los requisitos de precisión y reproducibilidad de la aplicación final; y la contextualización térmica del material, considerando la estabilidad térmica (Tonset) como un factor crítico para componentes expuestos a ambientes industriales severos. En conjunto, estos lineamientos contribuyen a la mejora continua de los procesos de diseño y prototipado en la región, facilitando la adopción de tecnologías de manufactura aditiva con un enfoque de calidad, confiabilidad técnica y pertinencia industrial.

Durante las pruebas funcionales del primer prototipo, se identificó una deficiencia estructural: debido al espesor reducido del cuerpo de la llave, el cabezal tendía a deformarse y abrirse al aplicar torque (*Figura 53*). Esto ocasionaba que la herramienta perdiera su ajuste geométrico y se deslizara sobre la boquilla, expandiendo la parte de rotación en la llave impidiendo su correcto funcionamiento.

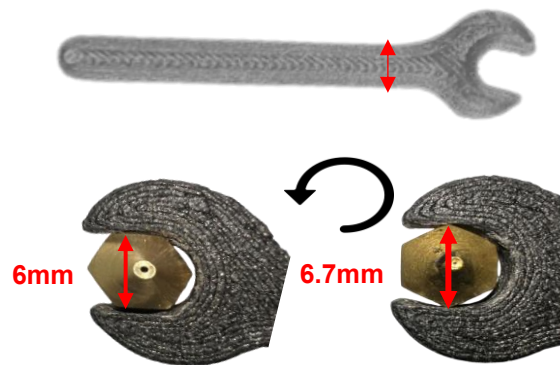


Figura 53 Apertura por falta de cuerpo

Para corregir esta falla, se optimizó el diseño incrementando el cuerpo estructural de la llave para evitar la deformación (*Figura 54*). Como se observa en el prototipo final, la pieza resultante es funcional para operaciones de mantenimiento estándar. Se propone para **futuras etapas** realizar ensayos de ciclo de vida y fatiga para determinar la durabilidad máxima de esta herramienta bajo uso continuo.



Figura 54 Prototipo con mayor cuerpo aplicado.

- **Desarmador con puntas intercambiables**

Adicionalmente, se desarrolló un sistema de desarmador con puntas intercambiables mediante un diseño integral propio. Para este prototipo, se modelaron y fabricaron dos tipos de conexión, hembra y macho (*Figuras 56 y 57*), con el objetivo de validar la precisión del ensamble y la versatilidad de los materiales compuestos en herramientas manuales (*Figura 55*).

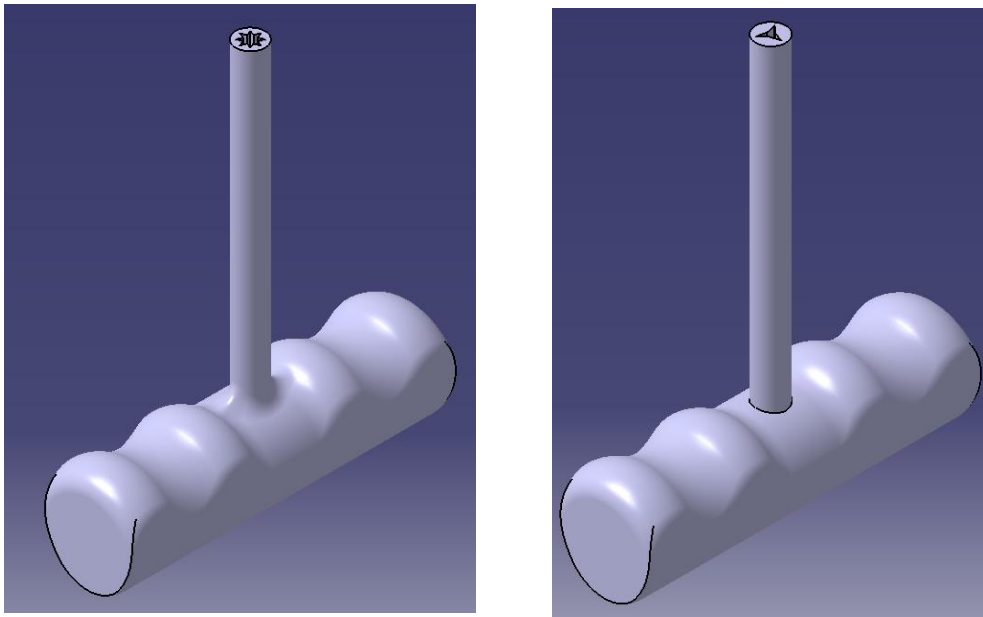


Figura 55 Prototipos de desarmador

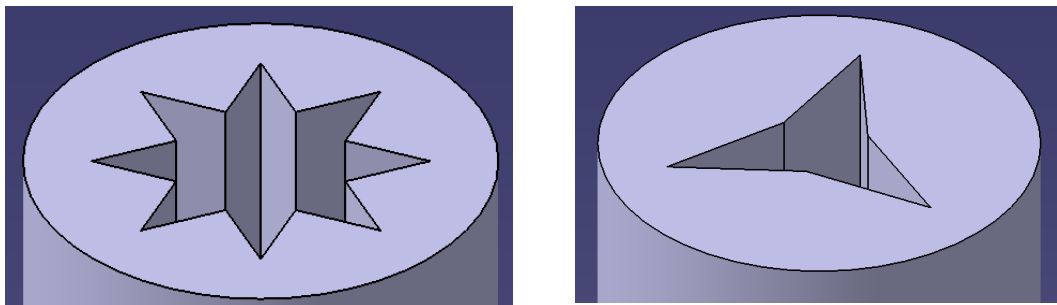


Figura 56 Puntas de desarmador (Hembra)

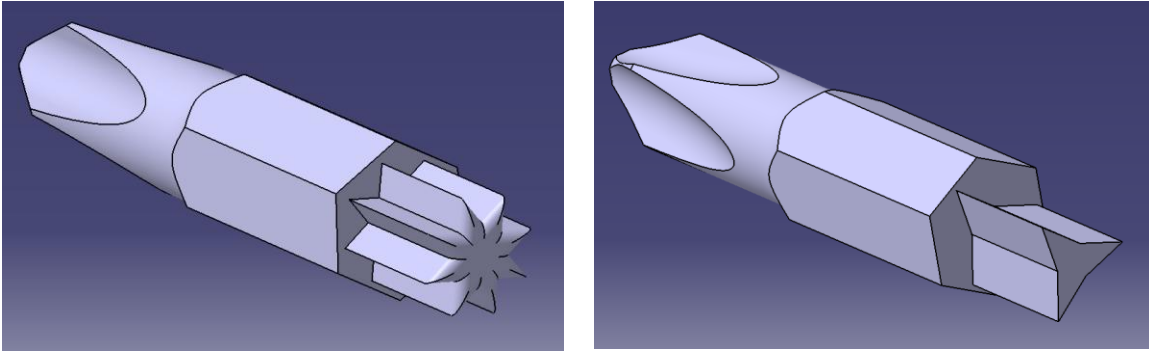


Figura 57 Puntas intercambiables (Macho)

Los prototipos iniciales mostraron que las tolerancias de diseño deben ajustarse para compensar la expansión del filamento durante la impresión. Se propone, para etapas posteriores, comenzar con prototipos de solo los conectores hembras y machos para revisar el punto de la expansión lateral del material con el fin de caracterizar cómo se comporta cada material y optimizar el diseño de manera que las piezas encajen de forma precisa sin holguras.

Una vez definidos los parámetros óptimos, se fabricarán prototipos completos del desarmador utilizando los cuatro materiales evaluados en esta investigación (PETG-CF, ABS-GF10, Ultra ABS GF25 y PC-GF). Esto permitirá determinar cuál material es más adecuado probando principalmente la resistencia al desgaste. Los resultados serán comparados con los datos obtenidos en los ensayos de tensión, validando si el desempeño teórico coincide con el comportamiento real en herramientas de uso práctico.

REFERENCIAS

1. Alarifi, M (2022). Estudio de evaluación del rendimiento de materiales compuestos de nailon/fibra de vidrio y nailon/fibra de carbono impresos en 3D: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>
2. AMT, Tecnológico de Monterrey, UNAM, & MADIT. (2023). *Estado de adopción de la manufactura aditiva en México* [Encuesta nacional]. MMS México. <https://www.mms-mexico.com/columnas/iniciativa-para-acelerar-adopcion-de-manufactura-aditiva-en-mexico>
3. C Babis et, al (2024). Determining the mechanical characteristics of some tensile specimens, depending on the material and the printing position: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1303/1/012031/pdf>
4. Cluster Industrial. (2025, 22 de mayo). *Con Meltio, llega a México una nueva era de impresión 3D para piezas metálicas industriales*. <https://clusterindustrial.com.mx/con-meltio-llega-a-mexico-una-nueva-era-de-impresion-3d-para-piezas-metalicas-industriales/>
5. Chaudhery M. (2025). Additive Manufacturing of Functional Polymers and Nanocomposites: https://www.google.com.mx/books/edition/Additive_Manufacturing_of_Functional_Pol/r4QmEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=3d+printing+glass+fiber+academic+article&pg=PA46&printsec=frontcover
6. Development of Thermal Resistant FDM Printed Blends (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13092057>
7. Dey, A., & Yodo, N. (2019). A Systematic Survey of Fused Filament Fabrication: Materials, Dimensional Accuracy, and Sustainability. *Additive Manufacturing*, 23, 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.020>
8. Dimitrescu et, al (2024). Theoretical and experimental research on the mechanical tests of 3D printed samples from various materials: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1303/1/012034/pdf>

9. Dynapro 3D. (s.f.). *La impresión 3D en la industria manufacturera*. Disponible en: <https://dynapro3d.com/la-impresion-3d-en-la-industria-manufacturera/>
10. D'Urso, G., Longo, M., & Petrone, G. (2022). *Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts*. *Polymers*, 14(13), 2630.
[Enlace PMC: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9269443/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9269443/)
11. Ferreira, R. T. L., Amatte, I. C., Dutra, T. A., & Bürger, D. (2017). Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 124, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>
12. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (3rd ed.). Springer.
13. Gupta, M. K., & Srivastava, R. K. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, 24(9), 2668. [Additive Manufacturing: A Comprehensive Review | MDPI](#)
14. Hartomacioğlu, S. (2024). *Optimization of production parameters for impact strength of 3D-printed carbon/glass fiber-reinforced nylon composite in critical ZX printing orientation*. *Polymers*, 16(21), 3006. <https://doi.org/10.3390/polym16213006>
15. Holsworth Rios, A. V. (2020). *Uso de la impresión 3D como instrumento de diseño arquitectónico [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California]*. Repositorio Institucional UABC. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/entities/publication/c6139019-a557-469f-9565-954c766c197b>
16. Caminero, M. Á., Chacón, J. M., García-Plaza, E., Núñez, P. J., & García-Moreno, I. (2021). Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication.

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06997-5>
17. InduMex. (2025, 4 de marzo). *¿Qué es la manufactura aditiva y cómo está revolucionando la industria en México?* InduMex Blog. <https://indumex.blog/industria-general/que-es-la-manufactura-aditiva-y-como-esta-revolucionando-la-industria-en-mexico/>
 18. INEGI. (2025). *Estadística del Programa de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX)*. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2025/immex/immex2025_02.pdf
 19. Interempresas. (2024, 25 de octubre). *Meltio M600: “La impresora 3D industrial más potente que mejora la productividad de la cadena de producción”*. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/576939-Meltio-M600-impresora-3D-industrial-mas-potente-mejora-productividad-cadena-produccion.html>
 20. International Organization for Standardization. (2021). *Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-4:2021)*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80369/84acd6f0ad8f4521b9678d0bc16f345/ISO-527-4-2021.pdf>
 21. Liu, Y., Zhao, Y., & Chen, J. (2022). Color Changes and Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate Composites after Thermal Aging. *Polymers*, 14(1), 120. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35054629/>
 22. Marabello, G., Borsellino, C., & Di Bella, G. (2023). Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review. *Materials (Basel)*, 16(23), 7311. <https://doi.org/10.3390/ma16237311>
 23. Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T. K., Asahara, H., Horiguchi, K., Nakamura, T., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2016). Three-dimensional

- printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports*, 6, 23058. <https://www.nature.com/articles/srep23058>
24. MMS México. (2025, 27 de mayo). *¿Qué esperar de la manufactura aditiva durante 2025 en México?* MMS México. <https://www.mms-mexico.com/columnas/que-esperar-de-la-manufactura-aditiva-durante-2025-en-mexico>
25. Metal Mecánica. (2023). *Manufactura aditiva: la tecnología que está transformando la producción*. Disponible en: <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/manufactura-aditiva-la-tecnologia-que-esta-transformando-la-produccion>
26. México Industry. (2024). *Impresión 3D, el nuevo reto de la industria manufacturera*. Disponible en: <https://mexicoindustry.com/noticia/impresion-3d-el-nuevo-reto-de-la-industria-manufacturera>
27. Monteiro, S. N., Calado, V., Rodríguez, R. J. S., & Margem, F. M. (2012). Thermogravimetric stability of polymer composites reinforced with less common lignocellulosic fibers - An overview. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 17(2), 1-21. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785412700212>
28. Nemak. (2024). *Annual Report 2023: Driving Mobility Forward*. Nemak, S.A.B. de C.V. Recuperado de <https://www.nemak.com/media/3065/ia-2023-en.pdf>
29. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
30. Ram, M. (2024). Performance Evaluation of Carbon Fiber Reinforced with PETG for 3D Printing Applications. *E3S Web of Conferences*, 588, 01014. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/118/e3sconf_sne2-2024_01014.pdf

31. Rodríguez, E., & Villegas, E. (2012). Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. *Métodos y Materiales*, 2, 26-32. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6240939.pdf>
32. Saba, N., Jawaid, M., & Asim, M. (2024). *Additively Manufactured Carbon Fibre PETG Composites: Effect of Print Parameters on Mechanical Properties*. *Polymers*, 16(11), 1356.
Enlace PMC: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11644710/>
33. Sadek, M. G., Dewidar, M., & Abdelhaleem, A. M. M. (2019). Investigation of the properties of polycarbonate filled with short glass fiber. *International Journal of Applied Energy Systems*, 1(2), 63–68. https://ijaes.journals.ekb.eg/article_169952_35bbdfeda835531bd6437f27419e4a47.pdf
34. Secretaría de Economía de Baja California. (2024, octubre). *Panorama Económico de Baja California [Reporte mensual]*. Recuperado de <https://www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/economia/Panorama-Economico-de-Baja-California-33.pdf>
35. TecScience. (2023, 22 de junio). Instituto de Materiales Avanzados para la Manufactura Sostenible: Ciencia de vanguardia. Tecnológico de Monterrey. <https://tecscience.tec.mx/es/negocios-innovacion/instituto-de-materiales-sostenibles/>
36. Tecnológico Nacional de México. (2022, 6 de mayo). *El TecNM Tijuana desarrolla soluciones para fabricar equipo ortopédico en 3D mediante nanocompositos*. Dirección de Comunicación y Difusión. Recuperado de <https://www.cdcuauhtemoc.tecnm.mx/el-tecnm-tijuana-desarrolla-soluciones-para-fabricar-equipo-ortopedico-en-3d/>
37. Torontech. (2025). Thermogravimetric analysis for material stability. Recuperado de <https://torontech.com/es/articles/thermogravimetric-analysis-for-material-stability/>
38. Valvez, S., Reis, P. N. B., Silva, M. P., & Santos, P. (2022). *Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties*

- of 3D-printed PETG-based composites.
Polymers,
<https://doi.org/10.3390/polym14132564>
39. Wevolver. (2023, December 1). PETG vs PLA: Differences and Comparison. *Wevolver*. <https://www.wevolver.com/article/petg-vs-pla-how-do-they-compare>
40. Wu, Z., et al. (2021). Effect of Thermal Aging on Mechanical Properties and Color Changes of Glass Fiber Reinforced PEI Composites. *Polymers*, 14(1), 120. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8747404/>
41. Xiaoyong T. (2025). Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: https://www.google.com.mx/books/edition/Additive_Manufacturing_of_Continuous_Fib/oVsmEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=3d+printing+glass+fiber+academic+article&pg=PA23&printsec=frontcover
42. Zhang, Y., et al. (2023). Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review. *Polymers*, 15(12), 2630. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10707234/>
43. 3D Partner México. (2025, 30 de abril). *Impresión 3D y Sostenibilidad: Un Vínculo Más Fuerte de lo que Imaginas*. <https://blog.3dpartner.mx/blog/2025/04/30/impresion-3d-y-sostenibilidad-un-vinculo-mas-fuerte-de-lo-que-imaginas/>