

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y A LA FLEXIÓN  
DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA  
FABRICADOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO MECÁNICO**, que presenta el bachiller:

**Héndrick Maz Vargas**

**ASESOR: Francisco Rumiche Zapata**

Lima, noviembre de 2018



## **AGRADECIMIENTO**

Al Doctor Francisco Rumiche Zapata por brindarme su dedicación y paciencia. Al Laboratorio de Manufactura Digital y al CITE Materiales PUCP por el apoyo brindado en la fabricación de los especímenes y desarrollo de los ensayos.

Finalmente, una mención honrosa a mis padres por ser los maestros de mi vida.

## RESUMEN

La tecnología de manufactura aditiva, AM (*additive manufacturing*) se está usando con gran éxito en las diversas aplicaciones del modelado por deposición fundida, FDM (*fused deposition modeling*). Esta es la tecnología más usada en la fabricación 3D principalmente en el área de ingeniería mecánica que la incorpora a sus procesos de producción de prototipos rápidos para pruebas funcionales de bajo costo, componentes complejos, piezas, accesorios, fabricados a partir de modelos digitales.

Debido a la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas de la materia prima usado para la fabricación de componentes, existe la exigencia de buscar nuevos materiales que puedan ser usados con la tecnología de impresión 3D. Uno de los posibles métodos es la adición de refuerzos de nanotubos de carbono y fibras de carbono a materiales poliméricos como el ABS (*acrilonitrilo butadieno styrene*). Así, formar materiales compuestos de matriz polimérica que podrían ser utilizados directamente en aplicaciones reales como en la industria aeronáutica y automotriz.

El presente trabajo tiene como objetivo la fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica usando impresión 3D para luego evaluar y comparar sus propiedades mecánicas. Para la fabricación se utilizó la tecnología de impresión FDM y los siguientes materiales: ABS puro, compuestos de ABS más nanotubos de carbono y ABS más fibra de carbono.

La metodología seguida para el desarrollo del trabajo primero fue el diseño de las muestras, para ello se utilizó la norma ASTM D638 para las probetas de tracción y ASTM D790 para las probetas de flexión; luego se determinó los parámetros de fabricación variando alturas de capas de deposición a 0,4 mm y 0,2 mm; y cinco diferentes tipos de mallado interno variando las orientaciones de deposición de capas a 90°, 0°, 45°, 0°/90° y 45°/-45°. Luego se procedió a la determinación de las propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción y flexión. Finalmente, se realizó una caracterización estructural a la superficie de fractura mediante microscopía electrónica de barrido, SEM (*scanning electron microscope*).

Como resultado final de los ensayos de tracción y flexión se tiene que en general los especímenes fabricados con ABS tienen mayor resistencia que los compuestos de ABS más nanotubos de carbono y ABS más fibra de carbono. Siendo los especímenes fabricados con 0,2 mm de altura de capa más resistentes que los de 0,4 mm.

Además, los especímenes fabricados con 0,2 mm de altura de capa tienen resistencia igual a la del filamento base utilizado para la fabricación. Este caso se cumple solo en el ABS y ABS más nanotubos de carbono. En el compuesto ABS más fibra de carbono se refleja una notable disminución de la resistencia.

Aunque los resultados del módulo de elasticidad tienen una elevada variabilidad, en todos los casos los materiales compuestos tienen una mayor rigidez respecto al ABS; sin embargo, la rigidez del compuesto ABS más fibra de carbono disminuye a la mitad respecto a su filamento base.

Finalmente, los resultados del SEM indican que en el compuesto ABS más fibra de carbono, estas micro partículas no se adhieren de manera correcta a la matriz polimérica creando cavidades entre matriz y aditivo, debilitando la acción del refuerzo al momento de la transferencia de esfuerzos. Resultado que se reflejó durante de los ensayos mecánicos



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TÍTULO** : ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y A LA FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA FABRICADOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

**ÁREA** : Materiales #136

**PROPUESTO POR** : Francisco Rumiche

**ASESOR** : Francisco Rumiche

**TESISTA** : Héndrick Maz Vargas

**CÓDIGO** : 20082129

**FECHA** : 21/03/2018



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO:**

La impresión 3D es una tecnología de manufactura aditiva muy empleada actualmente por empresas relacionadas a la ingeniería mecánica tanto en sus procesos de producción de prototipos, como en la fabricación de componentes complejos y personalizados, accesorios, y piezas en general a partir de modelos digitales. El presente trabajo está enfocado en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica mediante impresión 3D, empleando filamentos novedales en el mercado, constituidos por ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), con nanotubos de carbono y fibra de carbono. La investigación está enfocada en determinar las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los compuestos resultantes y comparar los valores obtenidos con los de aquellas muestras fabricadas con ABS puro.

**Objetivo**

Fabricar mediante impresión 3D materiales compuestos de ABS con nanotubos de carbono y fibras de carbono, y evaluar sus propiedades mecánicas de tracción y flexión.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y A LA FLEXIÓN DE  
MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA FABRICADOS  
MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

Introducción

1. Revisión de la Literatura
2. Procedimiento Experimental
3. Resultados y Discusión
4. Conclusiones y Recomendaciones

Bibliografía

Dr. Francisco Rumiche

Asesor

# ÍNDICE

ÍNDICE DE IMÁGENES.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	IX
INTRODUCCION.....	1
<b>1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
1.1 HISTORIA .....	4
1.2 TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA .....	6
1.2.1 Moldeo por deposición fundida (FDM) .....	9
1.2.2 Esterolitografía (SLA).....	10
1.2.3 Sinterizado selectivo por laser (SLS).....	11
1.3 MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA .....	11
1.4 IMPRESORA 3D .....	14
1.4.1 Makerbot Replicator 2X .....	15
1.5 MATERIALES POLIMÉRICOS PARA IMPRESIÓN 3D .....	17
1.5.1 ABS .....	17
1.6 MATERIALES COMPUESTOS .....	19
1.6.1 Nanotubos de carbono .....	22
1.6.2 Fibra de carbono .....	24
<b>2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>26</b>
2.1 METODOLOGÍA .....	26
2.2 MATERIALES.....	28
2.2.1 Filamento ABS .....	29
2.2.2 Filamento ABS + Nanotubo de carbono.....	30
2.2.3 Filamento ABS + Fibra de carbono.....	31
2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES .....	32
2.3.1 Parámetros de impresión.....	33
2.3.2 Impresión de especímenes.....	36
2.4 ENSAYOS DE TRACCIÓN .....	38
2.4.1 Medición de espesor y masa.....	39
2.4.2 Procedimiento de ensayo de muestras.....	41
2.4.3 Procedimiento de ensayo de filamentos.....	44
2.4.4 Cálculos y Expresiones de los Resultados.....	44
2.4.4.1 Esfuerzo de tracción.....	45
2.4.4.2 Módulo de elasticidad .....	45
2.4.4.3 Deformación unitaria o alargamiento a la rotura .....	46
2.5 ENSAYOS DE FLEXIÓN .....	46
2.5.1 Procedimiento de ensayo .....	47
2.5.2 Cálculos y Expresiones de los Resultados.....	49
2.5.2.1 Esfuerzo de flexión .....	49
2.5.2.2 Módulo de elasticidad .....	50

2.6 ESTUDIO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	51
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
3.1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN .....	53
3.1.1 <i>Resultado de ensayos de tracción a filamentos.....</i>	<i>54</i>
3.1.2 <i>Resultado de ensayos de tracción a especímenes de 0,4 mm de altura de capa....</i>	<i>54</i>
3.1.3 <i>Resultado de ensayos de tracción a especímenes de 0,2 mm de altura de capa... 60</i>	<i>60</i>
3.1.4 <i>Resultado total de ensayos de tracción a especímenes de 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa.....</i>	<i>66</i>
3.2 RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN.....	68
3.2.1 <i>Resultado de ensayos de flexión a especímenes de 0,4 mm de altura de capa.....</i>	<i>68</i>
3.2.2 <i>Resultado de ensayos de flexión a especímenes de 0,2 mm de altura de capa.....</i>	<i>73</i>
3.2.3 <i>Resultado total de ensayos de flexión a especímenes de 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa.....</i>	<i>78</i>
3.3 RESULTADOS DE ANALISIS DE MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE BARRIDO .....	81
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>86</b>
4.1 CONCLUSIONES .....	86
4.2 RECOMENDACIONES .....	90
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>93</b>





## ÍNDICE DE IMÁGENES

FIGURA 1.1. MÉTODO BLANTHER DE FABRICACIÓN POR APILADO DE CAPAS .....	5
FIGURA 1.2. TOMA DE IMÁGENES EN EL CUARTO CIRCULAR DE WILLEME .....	5
FIGURA 1.3. ENGRANAJE PLANETARIO FABRICADO MEDIANTE PROTOTIPADO RÁPIDO.....	9
FIGURA 1.4. TECNOLOGIA DE MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA (FDM).....	10
FIGURA 1.5. TECNOLOGIA DE ESTEREOLITOGRAFIA (SLA).....	10
FIGURA 1.6. TECNOLOGIA DE SINTERIZADO SELECTIVO POR LAZER (SLS) .....	11
FIGURA 1.7. DIAGRAMA DE SISTEMA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.....	12
FIGURA 1.8. FIGURAS EN FORMATO .STL .....	13
FIGURA 1.9. DIAGRAMA DE FLUJO DE INFORMACIÓN PARA CONTROL DEL SISTEMA .....	13
FIGURA 1.10. PROCESO DE MODELAMIENTO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA .....	14
FIGURA 1.11. PRIMERA IMPRESORA 3D REPRAP .....	15
FIGURA 1.12. MAKERBOT REPLICATOR 2X.....	16
FIGURA 1.13. ENGRANAJES IMPRESOS CON ABS.....	18
FIGURA 1.14. TIPOS DE MATERIAS PRIMAS Y COMPUESTOS .....	19
FIGURA 1.15. NANOTUBO DE CARBONO .....	23
FIGURA 1.16. MANIFOLD DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA HECHO DE FIBRA DE CARBONO .....	25
FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE PROCESO EXPERIMENTAL .....	28
FIGURA 2.2. BOBINA DE ABS.....	29
FIGURA 2.3. BOBINA DE ABS + CNT .....	30
FIGURA 2.4. BOBINA DE ABS + CF .....	31
FIGURA 2.5. ESPÉCIMEN DE TRACCIÓN SEGÚN NORMA ASTM D638 .....	32
FIGURA 2.6. ESPÉCIMEN DE FLEXIÓN SEGÚN NORMA ASTM D790 .....	33
FIGURA 2.7. DIFERENTES ESPESORES DE CAPA PARA UNA MISMA PIEZA .....	34
FIGURA 2.8. ORIENTACIÓN DE CAPA 0°/90° ALTERNADO .....	34
FIGURA 2.9. PROCESO DE FABRICACIÓN DE MUESTRAS .....	37
FIGURA 2.10. ESPECÍMENES DE TRACCIÓN.....	38
FIGURA 2.11. ESPECÍMENES DE FLEXIÓN.....	38
FIGURA 2.12. MEDICIÓN DE ESPESOR DE LAS MUESTRAS DE TRACCIÓN.....	39
FIGURA 2.13. TOMA DE MASA DE LAS MUESTRAS.....	40
FIGURA 2.14. MÁQUINA DE TRACCIÓN UNIVERSAL ZWICK/ROELL Z050 .....	42
FIGURA 2.15. MUESTRA ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN .....	43
FIGURA 2.16. MUESTRAS DE TRACCIÓN ENSAYADAS.....	43
FIGURA 2.17. ENSAYO DE TRACCIÓN DE FILAMENTOS .....	44
FIGURA 2.18. MUESTRA ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN .....	48
FIGURA 2.19. MUESTRAS DE FLEXIÓN ENSAYADAS.....	48
FIGURA 2.20. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO QUANTA 650.....	51
FIGURA 2.21. DISTRIBUCIÓN DE ESPECÍMENES EN EL SEM.....	52
FIGURA 3.1. DIFERENCIAS ESFUERZOS PROMEDIOS MÁXIMOS POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	56
FIGURA 3.2. DIFERENCIAS PORCENTAJE DE ELONGACIÓN PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	56
FIGURA 3.3. DIFERENCIAS MÓDULOS DE ELASTICIDAD PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL	57
FIGURA 3.4. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 90° TRACCIÓN 0,4 MM .....	58
FIGURA 3.5. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 0° TRACCIÓN 0,4 MM.....	58

FIGURA 3.6. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 45° TRACCIÓN 0,4 MM .....	59
FIGURA 3.7. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 0°/90° TRACCIÓN 0,4MM .....	59
FIGURA 3.8. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 45°/-45° TRACCIÓN 0,4 MM .....	59
FIGURA 3.9. DIFERENCIAS ESFUERZOS PROMEDIOS MÁXIMOS POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	62
FIGURA 3.10. DIFERENCIAS PORCENTAJE DE ELONGACIÓN PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	62
FIGURA 3.11. DIFERENCIAS MÓDULOS DE ELASTICIDAD PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL .....	63
FIGURA 3.12. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 90° TRACCIÓN 0,2 MM .....	64
FIGURA 3.13. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 0° TRACCIÓN 0,2 MM .....	64
FIGURA 3.14. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 45° TRACCIÓN 0,2 MM .....	65
FIGURA 3.15. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 0°/90° TRACCIÓN 0,2 MM .....	65
FIGURA 3.16. ESFUERZO VS ELONGACIÓN 45°/-45° TRACCIÓN 0,2 MM.....	65
FIGURA 3.17. RESULTADOS TOTALES DE ESFUERZOS MÁXIMOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	66
FIGURA 3.18. RESULTADOS TOTALES DE PORCENTAJE DE ELONGACION DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	66
FIGURA 3.19. RESULTADOS TOTALES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	67
FIGURA 3.20. DIFERENCIAS ENTRE ESFUERZOS PROMEDIOS MÁXIMOS POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL .....	70
FIGURA 3.21. DIFERENCIAS ENTRE DEFORMACIONES PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL	70
FIGURA 3.22. DIFERENCIAS ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL .....	71
FIGURA 3.23. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 90° FLEXIÓN 0,4 MM .....	72
FIGURA 3.24. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 0° FLEXIÓN 0,4 MM.....	72
FIGURA 3.25. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 45° FLEXIÓN 0,4 MM .....	72
FIGURA 3.26. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 0°/90° FLEXIÓN 0,4 MM.....	72
FIGURA 3.27. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 45°/-45° FLEXIÓN 0,4 MM.....	73
FIGURA 3.28. DIFERENCIAS ENTRE ESFUERZOS PROMEDIOS MÁXIMOS POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	75
FIGURA 3.29. DIFERENCIAS ENTRE DEFORMACIÓN MÁXIMA PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	75
FIGURA 3.30. DIFERENCIAS ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDAD PROMEDIO POR ORIENTACIÓN DE CAPA Y MATERIAL.....	76
FIGURA 3.31. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 90° FLEXIÓN 0,2 MM .....	77
FIGURA 3.32. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 0° FLEXIÓN 0,2 MM.....	77
FIGURA 3.33. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 45° FLEXIÓN 0,2 MM .....	77
FIGURA 3.34. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 0°/90° FLEXIÓN 0,2 MM.....	77
FIGURA 3.35. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 45°/-45° FLEXIÓN 0,2 MM.....	78
FIGURA 3.36. RESULTADOS TOTALES DE ESFUERZOS MÁXIMOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	79
FIGURA 3.37. RESULTADOS TOTALES DE PORCENTAJE DE ELONGACION DE ENSAYOS DE FLEXIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	79
FIGURA 3.38. RESULTADOS TOTALES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DE ENSAYOS DE FLEXIÓN DE ESPECÍMENES CON 0,4 MM Y 0,2 MM DE ALTURA DE CAPA.....	80

FIGURA 3.39. SEM DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE ABS 50X.....	81
FIGURA 3.40. SEM DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE ABS+CNT 50X.....	82
FIGURA 3.41. SEM DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE ABS+CF 50X.....	83
FIGURA 3.42. SEM DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE ABS+CNT 800X.....	84
FIGURA 3.43. SEM DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE ABS+CF 800X.....	85



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA MANUFACTURA ADITIVA .....	7
TABLA 1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO .....	8
TABLA 1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE MATERIALES PARA REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS .....	20
TABLA 1.4. TIPOS DE PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS Y MATERIALES COMPUESTOS .....	21
TABLA 2.1. PROPIEDADES ABS NATURAL 3DXTECH .....	29
TABLA 2.2. PROPIEDADES ABS + NANOTUBO DE CARBONO 3DXTECH .....	30
TABLA 2.3. PROPIEDADES ABS + FIBRA DE CARBONO 3DXTECH .....	31
TABLA 2.4. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN .....	35
TABLA 2.5. DISTRIBUCIÓN TOTAL DE ESPECÍMENES .....	36
TABLA 2.6. ESPESOR PROMEDIO DE ESPECÍMENES DE TRACCIÓN.....	40
TABLA 3.1. RESULTADO PROMEDIO DE ESFUERZO MÁXIMO, ELONGACIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DE TRACCIÓN EN FILAMENTOS .....	54
TABLA 3.2. RESULTADOS PROMEDIO DE ESFUERZO MÁXIMO, ELONGACIÓN, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LAS MUESTRAS DE TRACCIÓN 0,4 MM .....	54
TABLA 3.3. RESULTADOS PROMEDIO DE ESFUERZO MÁXIMO, ELONGACIÓN, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LAS MUESTRAS DE TRACCIÓN 0,2 MM .....	60
TABLA 3.4. RESULTADOS PROMEDIO DE ESFUERZO MÁXIMO, DEFORMACIÓN, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LAS MUESTRAS DE FLEXIÓN 0,4 MM .....	69
TABLA 3.5. RESULTADOS PROMEDIO DE ESFUERZO MÁXIMO, DEFORMACIÓN, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LAS MUESTRAS DE FLEXIÓN 0,2 MM .....	73

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2.1. ....	41
ECUACIÓN 2.2. ....	45
ECUACIÓN 2.3. ....	45
ECUACIÓN 2.4. ....	46
ECUACIÓN 2.5. ....	47
ECUACIÓN 2.6. ....	49
ECUACIÓN 2.7. ....	49
ECUACIÓN 2.8. ....	50
ECUACIÓN 2.9. ....	50





## INTRODUCCION

En la actualidad la impresión 3D es parte de una revolución tecnológica que busca nuevos métodos de manufactura. Tal es el auge mundial que esta área de investigación se encuentra en búsqueda de nuevas tecnologías de impresión 3D, así como de materiales usados como materia prima de fabricación.

Una particularidad en el uso de esta tecnología es que, en los últimos años, gracias al aumento de la oferta y los bajos costos de su materia prima han facilitado que sea cada vez más asequible para muchos sectores. Como ejemplo de eso, se puede apreciar que hace 10 años una impresora 3D costaba aproximadamente 29000 dólares, sin embargo, el día de hoy se pueden comprar con aproximadamente 1000 dólares [1].

Actualmente las tecnologías de impresión 3D vienen siendo empleadas por muchas empresas relacionadas a la ingeniería mecánica, que las incorporan en sus procesos de producción de prototipos, componentes complejos y personalizados, accesorios, y piezas en general a partir de modelos digitales. Esto demuestra que su desarrollo y evolución ya es factible y lo seguirá siendo [1].

Existen varias tecnologías de impresión 3D como la SLA (*Stereolithography*) o SLS (*Selective laser sintering*), pero en la mayoría de ocasiones cuando se habla de impresión 3D, se alude a la técnica conocida como modelado por deposición fundida, FDM (*fused deposition modeling*).

Todas estas tecnologías de impresión 3D comparten un factor importante, que es la adición de material para lograr una pieza final. Por ello el término correcto que abarca todas estas técnicas es el de manufactura aditiva, AM (*additive manufacturing*).

Dado el gran aumento del mercado de impresoras 3D, la materia prima para la impresión también ha ido emergiendo y tomando mayor importancia, en especial la de matriz polimérica con refuerzos de nano y micro materiales. En la actualidad los nano y micro materiales son muy estudiados gracias a sus excelentes propiedades incomparables con materiales macroscópicos. La manipulación de estos nano y micro materiales presentan un nuevo reto para la manufactura aditiva.

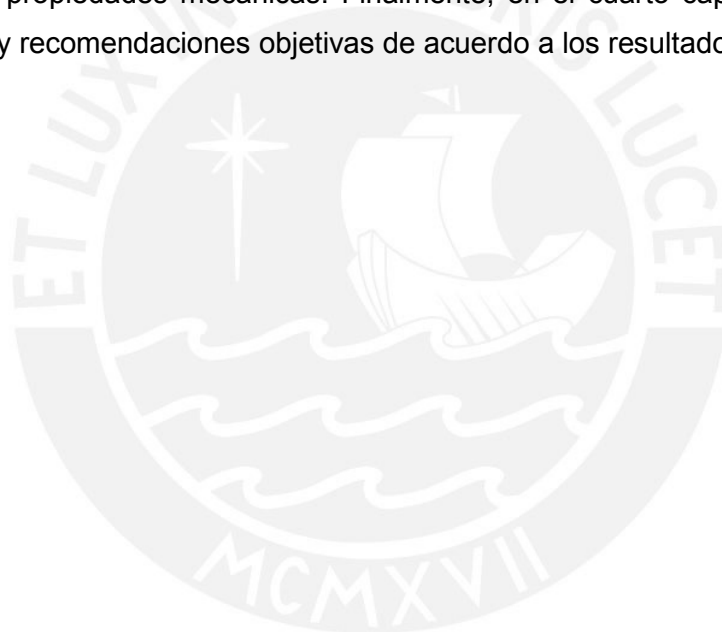
El objetivo principal de este trabajo está enfocado en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica ABS (*acrilonitrilo butadieno styrene*) con refuerzos de nanotubos de carbono y fibras de carbono empleando impresión 3D para luego evaluar sus propiedades mecánicas. Se fabricaron especímenes empleando una impresora 3D de tecnología FDM de la sala de Manufactura Digital de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

La investigación se enfocó también, en determinar las propiedades mecánicas de los compuestos resultantes y comparar los valores obtenidos con aquellas muestras fabricadas con ABS puro y los filamentos usados como materia prima. Asimismo, se realizó una caracterización estructural de los componentes que permita relacionar las variaciones en propiedades con la estructura resultante del proceso FDM.

En el primer capítulo se desarrolló el concepto de impresión 3D, principales tipos, principios de funcionamiento y materiales base usados. Posteriormente en el segundo capítulo se procedió con la parte experimental. Para la determinación de los parámetros de diseño y la fabricación del material compuesto se realizaron una serie de pasos claves como son:

- Investigar acerca del polímero y el aditivo adecuado para la fabricación del compuesto.
- Determinar los parámetros óptimos de fabricación.
- Fabricar las muestras según norma.

Una vez fabricados los especímenes se desarrollaron ensayos mecánicos de tracción y de flexión para obtener todos los datos técnicos experimentales del material polimérico y compuesto, finalizando con una evaluación estructural microscópica. En el tercer capítulo se procedió a realizar el análisis y discusión de los resultados obtenidos, tanto estructural como de sus propiedades mecánicas. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentaron conclusiones y recomendaciones objetivas de acuerdo a los resultados encontrados.







## **CAPITULO 1**

### **1. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

En este capítulo se expone información en torno al desarrollo y formación de las tecnologías de manufactura aditiva, en especial la de impresión 3D por modelado por deposición fundida, FDM; así como también, los materiales usados como materia prima, en especial de los usados en esta investigación.

#### **1.1 HISTORIA**

Para hablar de impresión 3D se debe retroceder en el tiempo y hablar de sus inicios, exactamente desde las raíces de la manufactura aditiva, las cuales están en la topografía y la fotoescultura. Estas técnicas, netamente manuales, tenían como objetivo crear un objeto con volumen y forma libre a través de la superposición de capas [2].

El método de topografía, propuesta por Joseph Blather en 1890, ver Figura 1.1. Consistía en utilizar los perfiles determinados de un mapa obtenidos mediante una serie de superposición de láminas de cera, así obtener mapas de relieve [3].

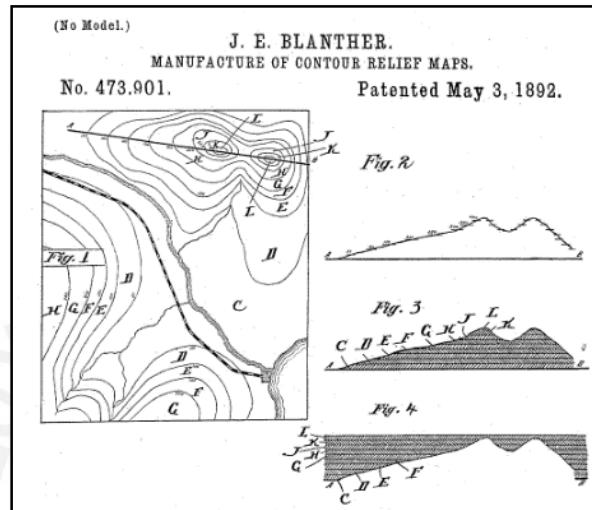


Figura 1.1. Método Blather de fabricación por apilado de capas [4]

El método de fotoescultura, creada por Francois Willeme en 1860, consistía en crear réplicas exactas tridimensionales de objetos y personas. Como se observa en la Figura 1.2. El método partió tomando fotografías simultaneas con 24 cámaras espaciadas equitativamente ubicadas en un cuarto circular [3].

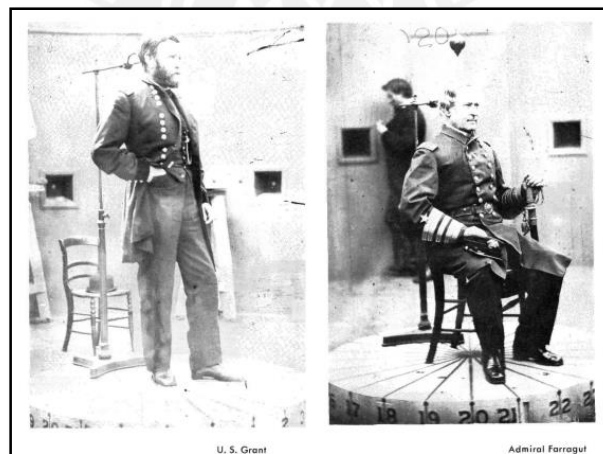


Figura 1.2. Toma de imágenes en el cuarto circular de Willeme [5]

Con el paso de los años la fotoescultura fue perfeccionando el uso de la luz y polímeros fotosensibles para recrear los objetos de formas menos manuales y más precisas. Para el año 1951, Otto Munz propone un sistema que dio paso a la actual técnica conocida como la Estereolitografía (SLA, *Stereolithography*). Consistió en un sistema capaz de exponer selectivamente una emulsión transparente fotosensible, depositada en capas. Cada una de estas capas provenía de la sección del objeto escaneado. Finalmente, al solidificar todo el conjunto de secciones se obtenía un cilindro transparente. [1]

Con esta información base se remonta al año 1983 cuando el inventor Chuck Hull creó el primer método de impresión 3D, la Estereolitografía [1]. En el año 1988 se crearon las primeras máquinas de impresión 3D fabricadas por la empresa 3D Systems. Para el año 1990 se desarrollaron dos nuevas tecnologías de impresión el Modelado por Deposición Fundida (FDM) y el Sintetizado Selectivo por Láser (SLS) [1]

Con esto se dice que la impresión 3D es la fabricación aditiva, superposición de capas sucesivas que crea un objeto tridimensional de cualquier forma física, a partir de un diseño generado digitalmente. Para la elaboración de un objeto primero se tiene que diseñar la pieza en un programa de modelación 3D y guardarlo en formato “*Stereo Lithography*” (STL.). Este formato es un archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que tiene como finalidad definir objetos 3D, y actualmente es el más usado como archivo de entrada de las impresoras 3D.

## 1.2 TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA

Esta fabricación aditiva tiene su uso más extendido en el “prototipado rápido”, RP (*rapid prototyping*), llamando así al uso de un proceso tecnológico para producir objetos 3D en periodos de tiempos cortos a partir de diseños modelados en un ordenador. Sin la necesidad de construir moldes o diseños previos que aumentan los costos de producción de piezas de ensamble mecánico. De esta manera esta edición tridimensional permite a los creadores transformar ideas innovadoras en productos finales de forma rápida y eficiente. Por ello se dice que el RP reduce costos de desarrollo hasta en un 70% y el tiempo de producción en 90% [6].

Las características principales que distinguen la fabricación de piezas por manufactura aditiva de otros procesos de fabricación industrial, y que otorgan una gran ventaja, son la complejidad geométrica, personalización del proceso de diseño y desarrollo del producto [7].

Estas ventajas y desventajas se resumen mejor en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de la manufactura aditiva [7]

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Complejidad geométrica y gran personalización	Tecnologías AM en desarrollo
Libertad creativa	Procesos periféricos y auxiliares
Adaptación al mercado	Desconocimiento de los diseñadores
Acceso a nuevos nichos de mercado	Disponibilidad y coste de la materia prima
Mecanismos integrados	Acabado superficial
Reducción de peso, productos aligerados	Calidad del producto y repetibilidad del proceso
Reducción de tiempos	Tamaño limitado de las piezas
Reducción de costes	Coste de maquinaria
Procesos híbridos	

Existen tres clasificaciones de tecnologías de prototipado rápido, sustractivo, aditivo y virtual. Esta clasificación fue dispuesta por Serope Kalpakjian y Steven R. Schmid en la página 581 de su libro “Manufactura, Ingeniería y Tecnología”. El proceso sustractivo comprende la eliminación paulatina de material de una pieza de trabajo, contrario a esto el proceso aditivo añade material de forma progresiva a través de capas de forma progresiva hasta obtener la pieza deseada. Finalmente, el proceso virtual utiliza la visualización por computadora [8].

En la Tabla 1.2 se muestran las técnicas aditivas de prototipado rápido según su fase de suministro:

Tabla 1.2. Clasificación de las tecnologías de prototipado rápido [8]

<b>Características de las tecnologías de producción aditiva de prototipos rápidos</b>				
<b>Fase de suministro</b>	<b>Proceso</b>	<b>Técnica de creación de capas</b>	<b>Tipo de cambio de fase</b>	<b>Materiales</b>
<b>Líquida</b>	Estereolitografía	Curado líquido de Fotopolimerización capas		Fotopolimerización (como acrílicos, epóxicas, resinas de color y resinas rellenas)
	Moldeo por deposición fundida	Extrusión de polímero fundido	Solidificación por enfriamiento	Polímeros (como ABS y poliacrilato), cera, polvos metálicos y cerámicos con aglutinante
<b>Polvo</b>	Manufactura mediante partículas balísticas	Deposición de gotas	Solidificación por enfriamiento	Polímeros y cera
	Impresión tridimensional	Capa de polvo y deposición de gotas de aglutinante	Sin cambio de fase	Cerámicos, polímeros, polvos metálicos y arena
	Sinterización láser selectiva	Capa de polvo	Sinterización activa por láser y solidificación	Polímeros, metales con aglutinante, metales, cerámicos y arena con aglutinante
<b>Sólida</b>	Manufactura de objetos laminados	Deposición de material laminado	Sin cambio de fase	Papel y polímeros

Como se observa existen varias tecnologías de prototipado rápido en las que se pueden utilizar varios materiales; sin embargo, debido a tener propiedades más adecuadas para

estas operaciones, los polímeros son los materiales más usados hoy en día, seguidos por los cerámicos y metales. En la Figura 1.3 se observa un engranaje planetario fabricado con ABS.



Figura 1.3. Engranaje planetario fabricado mediante prototipado rápido [9]

Todas las operaciones de producción de prototipado rápido forman las piezas en base a la adición de material por capas, una encima de otra. La diferencia fundamental entre las tecnologías está en la forma de producción de las capas individuales que por lo general varían entre 0,1 mm a 0,5 mm según la configuración deseada en el sistema usado [8].

Algunas características de las tecnologías mencionadas son las siguientes:

### 1.2.1 Moldeo por deposición Fundida (FDM)

- Tecnología desarrollada por Stratasys.
- Extrusión de filamentos a través de un orificio de matriz caliente
- Utiliza varios tipos de termoplásticos (ABS, PLA, Policarbonato, etc.).
- Es una de las tecnologías de prototipado rápido más comerciales y utilizadas. Ver Figura

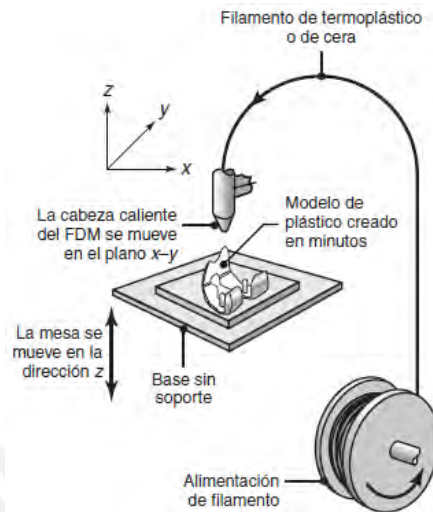


Figura 1.4. Tecnología de modelado por deposición fundida [8]

### 1.2.2 Estereolitografía (SLA)

- Se basa en el principio de curado o endurecimiento de un polímero líquido, como resinas acrílicas o epóxicas, mediante un láser que genera un rayo ultravioleta.
- Alta precisión y detalle de piezas producidas.
- Considerada el primer proceso de prototipado rápido, exactamente en 1988 por 3D Systems. Ver Figura 1.5.

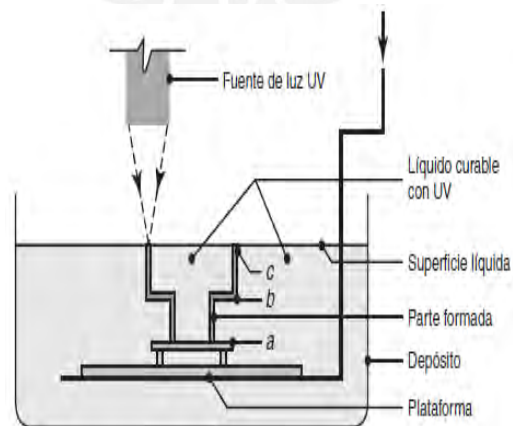


Figura 1.5. Tecnología de estereolitografía [8]

### 1.2.3 Sinterizado selectivo por láser (SLS)

- Se basa en la sinterización de material en forma de polvo con el uso de un láser alta potencia (CO<sub>2</sub>) para fusionar partículas de plástico, metal, cerámica y ceras.
- Patentada en 1989 por DTM Corporation. Ver Figura 1.6.

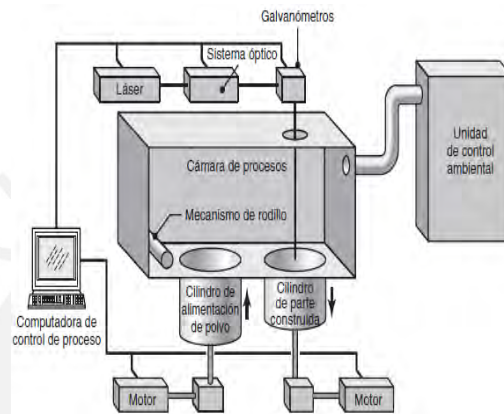


Figura 1.6. Tecnología de sinterizado selectivo por láser [8]

Hasta aquí se han presentado diversos conceptos de manufactura aditiva con algunas de sus características más importantes. De las tecnologías de impresión 3D antes mencionadas a continuación se abarcará en mayor detalle el Modelado por Deposición Fundida (FDM), pues esta fue la tecnología empleada en nuestra investigación.

### 1.3 MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA

La tecnología de modelado por deposición fundida, FDM (*fused deposition modeling*) fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de los años 80, y luego patentada y comercializada por Stratasys (USA) a inicios de los 90. Con el FDM se puede crear modelos de conceptos funcionales, prototipos y piezas finales de alto rendimiento a nivel ingenieril. Además, puede ser utilizada a nivel usuario tanto como a nivel industrial [1].

La tecnología FDM usada para este trabajo representa una de las principales técnicas de prototipado rápido del mercado que en comparación con otras tecnologías muestra



resultados favorables en cuanto a costo, volumen de impresión, simplicidad y versatilidad se refiera [10].

La técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida parte del modelado del objeto 3D diseñado mediante un software CAD, luego se convierte a un lenguaje de máquina para un sistema de planta, de este modo los engranajes desenvuelven un rollo de filamentos termoplásticos para alimentar a la boquilla de extrusión y dar forma al diseño. Esta boquilla se encuentra a temperatura elevada para así alcanzar un estado semilíquido del filamento que es depositado y controlado mediante un mecanismo de dosificación. Este proceso se puede observar en la Figura 1.7 donde se muestra el diagrama de sistema del prototipado rápido.

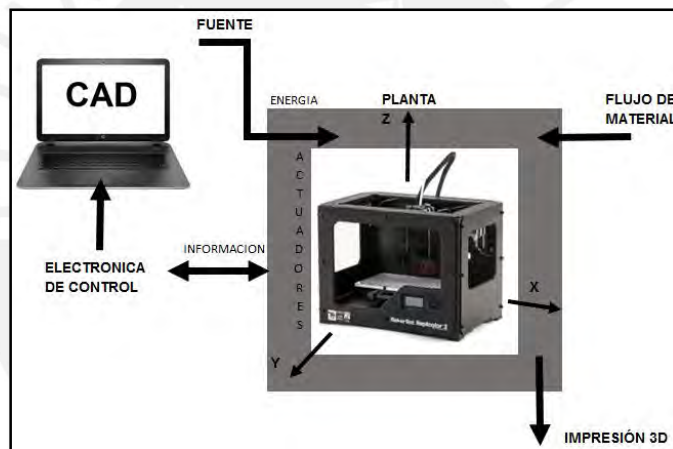


Figura 1.7. Diagrama de sistema de prototipado rápido por modelado por deposición fundida

El modelo CAD es exportado al formato estándar de prototipado rápido o de estereolitografía con extensión .STL, este formato utiliza una malla de triángulos sobre superficies para definir un objeto. Cada triángulo es descrito por una dirección perpendicular y tres puntas que representan los vértices del triángulo [10]. Como se puede apreciar en la Figura 1.8 se tiene un archivo CAD y dos archivos .STL con diferentes resoluciones.

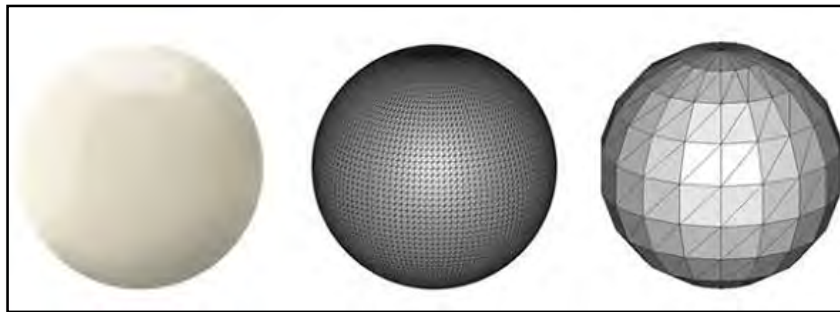


Figura 1.8. Figuras en formato .STL [11]

Estos datos son utilizados por un algoritmo seleccionador por capas para determinar las secciones transversales de la pieza. Este proceso se realiza con la conversión del formato .STL a código G, para así determinar las coordenadas de posición para la impresión, velocidad, distancia entre capas y la actividad del extrusor. Finalmente, un software maestro configura variables como el tiempo de inicio para puesta a punto, temperatura de extrusor, temperatura de la cama, altura de capa, ángulo de línea de trazado, el avance y retroceso de cada eje, inicio y paradas de emergencia [10]. En la Figura 1.9 se puede observar el diagrama de flujo del proceso de información para el control del sistema.

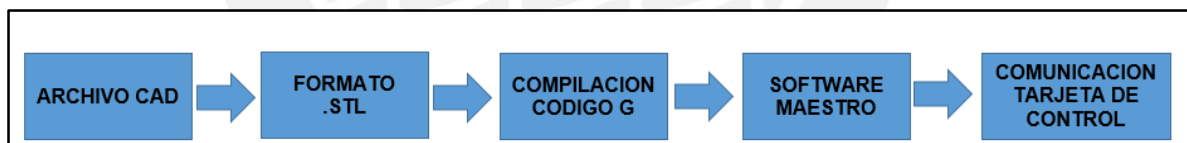


Figura 1.9. Diagrama de flujo de información para control del sistema

Durante la impresión 3D el filamento ingresa por la parte superior del extrusor y este va depositando capa a capa, desde la parte baja hacia arriba, el material fundido que se solidifica hasta formar el objeto deseado. El extrusor se mueve en los ejes Y, X y la plataforma o cama en el eje Z.

En la Figura 1.10 se puede observar el proceso de fabricación de una pieza desde su boceto en una hoja, el modelado CAD y finalmente su impresión 3D mediante deposición por capas.

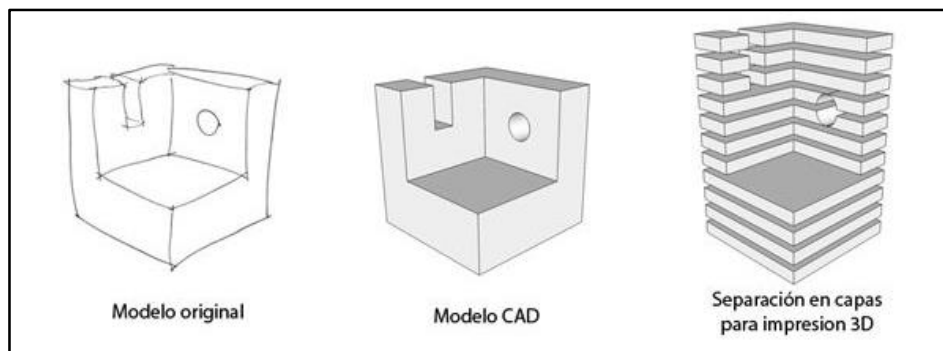


Figura 1.10. Proceso de modelamiento por deposición fundida [12]

Algunas características importantes a tomar en cuenta para la impresión 3D son la altura de capa, la temperatura a la cual se realizó la impresión, la orientación. Estos influirán en la calidad y la resistencia de la pieza. Finalmente, los modelos deben estar conectados a una base o plataforma de apoyo para evitar que colapsen y una vez finalizado el proceso de impresión son retirados de forma manual.

#### 1.4 IMPRESORA 3D

Hasta ahora se revisó el concepto de impresión 3D, así como las tecnologías empleadas para la impresión 3D, en especial la de modelado por deposición fundida, FDM. A medida que el tiempo pasa, la industria del prototipado rápido va en aumento; sin embargo, hasta hace unos años los elevados precios de voluminosas máquinas industriales restringían el uso solo a grandes empresas con gran presupuesto.

Hasta el año 2004 existían diferentes modelos de impresoras 3D, destacando las dos compañías líderes Stratasys y 3D Systems. Cada una de estas empresas tenía más de 10 modelos en el mercado con ventas que incrementaban 100% al año anterior. En 2005 los precios de las máquinas rondaban desde los 100 mil hasta los 500 mil dólares [13], precios que variaban en función al tamaño de producción y a la tecnología que usaban.

En el mismo año el Dr. Adrián Bowyer, en la universidad inglesa de Bath, puso en marcha el proyecto RepRap, proyecto abierto y colaborativo, comenzando así a perfilarse como una revolución en el mercado doméstico, y entrando en juego la comunidad Maker. Ante los

elevados costos de las impresoras 3D, el profesor Bowyer desarrolló la primera impresora 3D de bajo costo con capacidad de imprimir casi la totalidad de sus propios componentes para crear otra impresora igual. Paralelamente en Italia, surgía el proyecto Arduino, un microcontrolador barato con un entorno de desarrollo compatible con cualquier sistema operativo. Inmediatamente RepRap incorporó Arduino. En 2006 se probó el primer prototipo y en 2008 se lanza RepRap 1.0 “Darwin” [14]. Este hecho constituye la entrada del Open-source en la historia de la impresión 3D y un gran paso hacia su normalización en el mercado. En la Figura 1.11 se puede observar la primera impresora 3D RepRap, actualmente es la impresora más utilizada en la comunidad Maker.

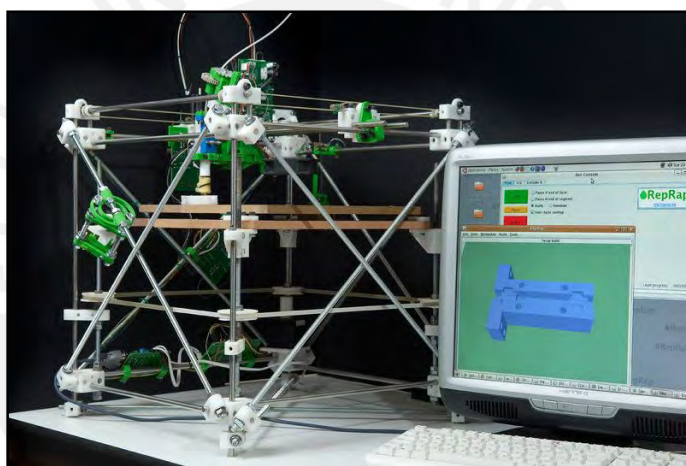


Figura 1.11. Primera impresora 3D RepRap [15]

#### 1.4.1 Makerbot Replicator 2X

Basándose en el proyecto RepRap, surgen varios proyectos con la misma idea, favorecer el desarrollo de esta tecnología a un menor costo. De todas estas sobresale Makerbot Industries y su modelo Makerbot Replicator 2x. Ver Figura 1.12.

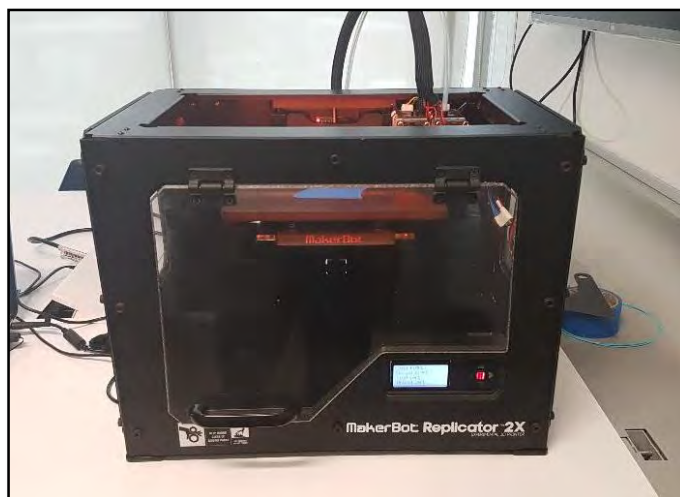


Figura 1.12. Makerbot Replicator 2X

En 2009 surgió Makerbot Industries con la idea de llevar al mercado una impresora 3D que pudiera ser ensamblada por cualquier persona. Makerbot es fundada en New York por Bre Pettis, Adam Mayer y Zach Smith [16].

Las impresoras Makerbot fueron de hardware abierto hasta el verano del 2012 cuando lanzaron la Replicator 2. Makerbot decidió cerrar el diseño de su nueva impresora generando un gran malestar en la comunidad de desarrolladores. El 20 de septiembre del mismo año Makerbot tomó un tinte más comercial, inaugurando sus propias tiendas físicas de distribución [16], tomando un rumbo absolutamente comercial para así impulsar la manufactura personal y conseguir que el consumidor pueda tener una impresora 3D en casa.

La Makerbot Replicator 2X es una impresora 3D de escritorio de alta calidad en impresión 3D. Cuenta con una pantalla de navegación LCD, varios modos de impresión, una plataforma climatizada y velocidades accesibles para cuando se necesite un modelado rápido y perfecto con un tamaño máximo de impresión de las piezas es de 5.9 x 6.3 x 9.8 pulgadas.

La resolución máxima de impresión es de 0,1 mm con una calidad muy alta. Tiene una boquilla de 0,4 mm para un filamento de 1.75 mm de diámetro. Cuenta con una base calefactora llamada cama caliente, que permite que las primeras capas de las piezas de

ABS queden adheridas. Además, cuenta con doble cabezal de impresión para poder imprimir dos colores diferentes de filamento al mismo tiempo.

Las principales características de esta impresora son la plataforma climatizada y caja de alojamiento mejorada, además tiene una construcción robusta pesando aproximadamente 28 libras, todo eso ayuda a mantener las impresiones estables para una mayor precisión.

Tiene una compatibilidad con cualquier ordenador, no importa el sistema operativo que uses, desde Windows, Mac o Linux. Además, cuenta con conexión USB o tarjeta SD para poder imprimir directamente desde un archivo STL.

## **1.5 MATERIALES POLIMÉRICOS PARA IMPRESIÓN 3D**

Existen varios materiales poliméricos usados como materia prima para la impresión 3D, los más usados son el Poliacido Láctico (PLA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Policarbonato (PC), Ultem, etc. En el siguiente proyecto de investigación se planea usar como matriz polimérica el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

### **1.5.1 ABS**

El ABS es un termoplástico amorfo reciclable, no biodegradable, extraído del petróleo. El acrónimo deriva a tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Denominado polímero de ingeniería, pues su elaboración y procesamientos son más complejos que los polímeros comunes.

El ABS es uno de los polímeros más usados en la industria, muy utilizado en la automoción, aplicaciones domésticas e industria de la impresión 3D gracias a la tecnología de impresión por extrusión por modelado por deposición fundida (FDM) y la tecnología de estereolitografía (SLA). Pero por emitir humos leves es necesario que el área de impresión sea bien ventilada.

Muy tenaz, dura, rígida, con buena resistencia a la abrasión y fácilmente mecanizable. Además, al ser soluble en compuestos como la acetona existen tratamientos para suavizar las superficies impresas.

El ABS es muy utilizado en la fabricación de piezas para automóviles y en el diseño de interiores de aviones, pues se caracteriza por ser muy fuerte y liviano tanto exterior como interiormente. También, con el ABS se pueden crear varias combinaciones de colores, acabados cromados y estampados metalizados para ordenadores, teléfonos móviles y otros dispositivos eléctricos y electrónicos.

El ABS es muy útil para aplicaciones de prototipado, pues tiene propiedades muy similares a los materiales habitualmente usados para la producción de bienes mediante inyección de moldes. Una de las ventajas de estos modelos es que tienen una buena precisión y gran libertad de diseño; sin embargo, la calidad de la superficie es áspera y no es adecuado para objetos finales.

Además, al tener una buena resistencia a altas temperaturas y buenas propiedades mecánicas los prototipos fabricados mediante impresión 3D son usados en muchas pruebas y ensayos funcionales de sectores de automoción, eléctrico, etc. En la Figura 1.13 se aprecia algunos engranajes impresos con ABS.



Figura 1.13. Engranajes impresos con ABS [18]

## 1.6 MATERIALES COMPUESTOS

En la actualidad el desarrollo de nuestra sociedad está marcada por la necesidad de reducir el consumo energético, aumentando con ello la obligación de buscar materiales más duraderos y resistentes, e independientemente del campo de aplicación son fundamentalmente los materiales compuestos los que cumplen con esa función.

La manufactura aditiva comprende la fabricación de piezas a partir de materiales poliméricos, cerámicos o metálicos. La combinación de estos materiales favorece la producción de un material compuesto. Cada una de las combinaciones de la Figura 1.14 tiene resultados con características diferentes y son desarrollados en función al requerimiento del investigador.

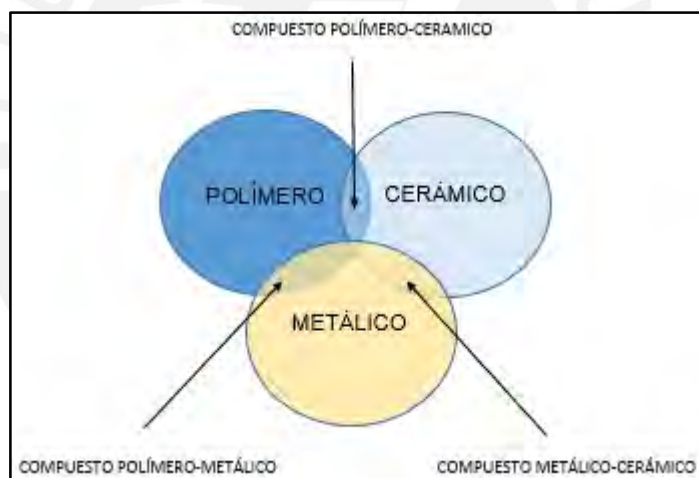


Figura 1.14. Tipos de materias primas y compuestos

En nuestra investigación se fabricaron especímenes compuestos de matriz polimérica fabricados con la técnica de modelado por deposición fundida, FDM. Ambos fueron compuestos de fibra de carbono y nanotubos de carbono con matriz polimérica.

Los compuestos de matriz polimérica están formados por un polímero como matriz principal al cual se le incorporan fibras de vidrio, carbono, cerámico u otro polímero. La combinación de buenas propiedades como de bajo peso y ductilidad de los polímeros unidos con las altas resistencias mecánicas y rigidez de las fibras de los aditivos dan como resultado una mejora de las propiedades del compuesto. Los materiales compuestos se caracterizan por



una alta resistencia, rigidez y bajo peso, propiedades que resultan ser superiores que otros materiales metálicos [19]. En general un compuesto polimérico consta básicamente de dos constituyentes, la matriz y el refuerzo.

Además, gracias a las buenas características de los materiales compuestos son utilizados para reemplazar a varios materiales convencionales como componentes resistentes o estructurales en gran número de aplicaciones.

En la Tabla 1.3 se puede observar las ventajas, inconvenientes y diversas aplicaciones de los materiales reforzados:

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas de materiales para refuerzo de materiales compuestos [20]

	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Vidrio</b>	Buena relación peso/prestaciones mecánicas aplicación	Elevadas prestaciones mecánicas específicas.	Automoción. Construcción. Aeronáutica.
<b>Carbono</b>	Excelente resistencia a la rotura en tracción y compresión. Buena resistencia a la humedad.	Precio elevado. Escasa resistencia al choque	Automoción. Biomecánica. Aeronáutica. Deporte.
<b>Aramida</b>	Buen comportamiento al choque. Buena resistencia a la humedad.	Baja resistencia a la compresión.	Automoción. Construcción.
<b>Boro</b>	Elasticidad elevada. Buen comportamiento al choque.	Dificultad de utilización.	Aeronáutica militar

Para la fabricación de estos materiales compuestos existen diversas técnicas que, a diferencia de los metales, son fáciles de manejar ya que su procesamiento necesita de mucho menos fuerza y energía. En general los polímeros y materiales compuestos se pueden procesar de la siguiente manera. Observar Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Tipos de procesamiento de polímeros y materiales compuestos [8]

<b>Características generales de los procesos de formado y moldeo para plásticos y materiales compuestos</b>	
<b>Proceso</b>	<b>Características</b>
<b>Extrusión</b>	Secciones transversales continuas, uniformemente solidas o huecas y complejas; altas capacidades de producción; costos de herramental relativamente bajos; tolerancias amplias.
<b>Moldeo por inyección</b>	Formas complejas de diversos tamaños; paredes delgadas; capacidades de producción muy altas; herramentales costosos; buena precisión dimensional.
<b>Moldeo por espuma estructural</b>	Partes grandes con alta relación de rigidez a peso; herramental menos costoso que en el moldeo por inyección; bajas capacidades de producción.
<b>Moldeo por soplado</b>	Partes huecas de pared delgada y botellas de varios tamaños; altas capacidades de producción; costos relativamente bajos de herramental.
<b>Rotomoldeo</b>	Accesorios grandes, huecos, de forma relativamente simple; costos relativamente bajos de herramental; capacidades de producción relativamente bajas.
<b>Termoformado</b>	Cavidades huecas o relativamente profundas; costos bajos de herramental; capacidades medias de producción.
<b>Moldeo por compresión</b>	Partes similares al forjado de matriz de impresión; herramental costoso; capacidades medias de producción.
<b>Moldeo por transferencia</b>	Partes más complejas que las de moldeo por compresión; capacidades más altas de producción; altos costos de herramental; cierta pérdida en desperdicios.
<b>Fundición</b>	Formas simples o intrincadas fabricadas con moldes rígidos o flexibles de bajo costo; bajas capacidades de producción.
<b>Procesamiento de materiales compuestos</b>	Tiempos largos de los ciclos; operación costosa; los costos herramentales dependen del proceso.

Como se observa en la Tabla 1.4 el procesamiento de materiales compuestos hasta ahora requiere de tiempos largos, operaciones y herramientas costosas; sin embargo, con el uso de la impresora 3D y la técnica de modelado por deposición fundida se desarrolló una manera práctica, sencilla y rápida de producir piezas con materiales compuestos.

Garantizar buenas propiedades en los materiales compuestos es materia de estudio, pues la matriz y el refuerzo en el compuesto tienen diferentes características y propiedades que brindan diferentes respuestas ante los diferentes métodos de procesamiento.

Como ejemplo comercial del uso de materiales compuestos de matriz polimérica se tienen aeronaves comerciales y militares, componentes para cohetes, aspas de helicópteros, carrocerías de automóviles, ballestas, tubos, escaleras, recipientes a presión, artículos deportivos, cascos y muchas otras estructuras y componentes [8].

Para nuestro proyecto se utilizaron compuestos de nanotubos de carbono, fibra de carbono, ambos con una matriz polimérica de ABS. Ambos materiales han atraído una atención considerable en las últimas décadas debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas, sumados a su gran versatilidad y gran amplitud de aplicaciones.

### **1.6.1 Nanotubos de carbono**

Se denomina nanotubo a las estructuras tubulares cuyo diámetro se encuentra en el rango de 1 a 100 nanómetros. Los nanotubos constituyen algunas de las estructuras más importantes en el estudio de la nanotecnología. En general un nanotubo de carbono es una molécula en forma de tubo compuesta por redes hexagonales de carbonos curvados y cerrados [21].

Los nanotubos de carbono fueron descubiertos en Japón por S. Iijima en 1991 durante trabajos de investigación sobre fullerenos, usando el método de evaporación de arco de descarga [21].

Forman parte de las fibras más fuertes que se conocen, pues un solo nanotubo es 10 a 100 veces más fuerte que el acero. También posee propiedades eléctricas siendo ciento de veces más efectivo que los cables de cobre [21].

Como una forma de representación de su estructura, puede ser considerada como una lámina de átomos de carbono enrollada sobre sí misma como se aprecia en la Figura 1.15. La forma a lo largo de la circunferencia determina sus propiedades electrónicas, además existen nanotubos formados por una sola capa llamados nanotubos (un solo tubo) y multicapa (varios tubos metidos uno dentro de otro) [21].

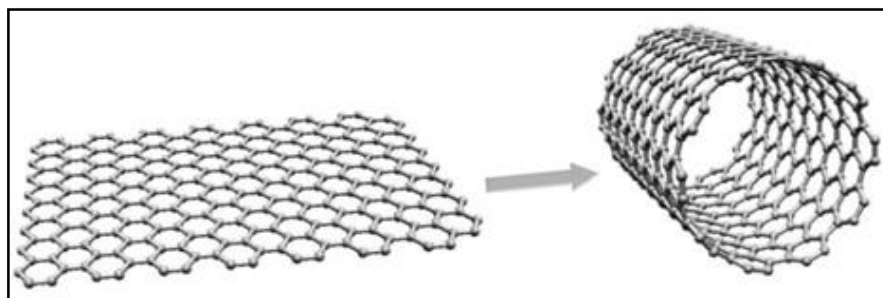


Figura 1.15. Nanotubo de carbono [22]

En cuanto a las propiedades electrónicas los nanotubos pueden comportarse como semiconductores y superconductores, propiedad definida por el grado de enrollamiento, diámetro y número de capas que lo componen. En cuanto al papel de superconductores podrían ser utilizados en la búsqueda de aplicaciones prácticas en informática cuántica molecular. Además, son capaces de transportar corriente eléctrica hasta mil millones de amperes por centímetro cuadrado.

Dentro de las propiedades térmicas cabe resaltar una conductividad térmica promedio de 200 W/mK y una resistividad eléctrica de  $10^{-4} \Omega \text{ cm}$  para nanotubos de una sola capa. También, son estables a temperaturas cercanas a 2800°C en el vacío y 790°C en el aire [21].

Respecto a las propiedades mecánicas los nanotubos cuentan con una alta resistencia mecánica, por tanto, interesan mucho en el reforzamiento estructural de materiales y la formación de compuestos de bajo peso y alta resistencia.

Como se dijo las fibras hechas de nanotubos de carbono son altamente fuertes, ligeras, duras y resistentes. Por ellos existen diversas investigaciones que lo usan como refuerzo de polímeros para futuros diseños de aviones, coches y puentes.

También al ser un buen conductor térmico son utilizados con la fabricación de placas electrónicas, pues son eficientes en la disipación de calor generado. Además, se están explorando en usos como supercondensadores y nuevas baterías para almacenar una mayor cantidad de energía y larga duración [23].

### **1.6.2 Fibra de carbono**

La fibra de carbono es un material formado por átomos de carbono que se obtienen por la quema de un polímero llamado Poliacrilonitrilo (PAN), oxígeno, nitrógeno y otros elementos diferentes, elevando la temperatura progresivamente hasta 1500°C, dejando al final, casi en su totalidad, cintas alineadas de carbono puro en forma de grafito, de allí el nombre de fibra de carbono [25-26].

La fibra de carbono tiene propiedades mecánicas similares al acero, siendo tan ligera como la madera o el plástico. Tiene una alta resistencia mecánica y tenacidad. Además, es un buen amortiguador de vibraciones y alta conductividad eléctrica [25].

La fibra de carbono es un material flexible, que al ser mezclado con un polímero puede modelarse y asumir la forma de la pieza moldeada. Por ello es muy utilizado en partes de vehículos, pues resultan más fuertes y ligeros que las piezas actuales de acero y aluminio.

En la aviación se tiene el Boeing 787 que tiene hasta un 50% de fibra de carbono en su construcción, implementándolo la mayor parte del material compuesto en el fuselaje y alas.

También es muy usado en la industria automotriz por ser un material resistente y de bajo peso, pues eso se refleja en un menor consumo de energía, combustible y mantenimiento más económico [27]. Se estima que una disminución del 10% en el peso del vehículo da como resultado un ahorro de 6 al 8% [36].

Claro ejemplo tenemos al team Penske que, para sus coches del IndyCar y Nascar, está utilizando la tecnología FDM para producir prototipos y piezas finales a partir de materiales compuestos de fibra de carbono. Dicho material ha permitido que fabriquen carcasas de espejos retrovisores para sus equipos de la carrera Nascar, ya que estas son ligeras con alta resistencia al impacto y alta rigidez. La rigidez del compuesto es especialmente útil en

la fabricación de piezas de paredes finas para que no se doblen por efecto de las cargas aerodinámicas durante la carrera [36].

Como ejemplo en la Figura 1.16 se observa un manifold de motor de combustión fabricado a partir de fibra de carbono.



Figura 1.16. Manifold de motor de combustión interna hecho de fibra de carbono [28]

En la construcción viene siendo muy usado para el reforzamiento estructural mediante láminas de fibras de carbono. Estas son colocadas alrededor o debajo de la sección a reforzar que junto a un adhesivo epóxico se logra una adherencia estable que ayuda a soportar y prevenir deflexiones [26].

La fibra de carbono representa una solución para este avance tecnológico que seguramente no desplazara a los materiales tradicionales, sino será utilizada como complemento ideal para optimizar y mejorar la relación costo/beneficio [25].

Después de haber revisado literatura sobre tecnologías de manufactura aditiva, en especial la de modelado por deposición fundida, materiales usados y aplicaciones en la industria, queda validado, por la gran cantidad de publicaciones e investigaciones, que esta tecnología está en auge; sin embargo, quedan aspectos que faltan ser estudiados y mejorados de tal modo obtener una mejor comprensión del tema, propiedades de las piezas, mejoras de calidad y servicios para la industria actual con nuevos campos de aplicación.



## **CAPITULO 2**

### **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se expone la metodología seguida para el desarrollo de la investigación, empezando por las características de los materiales usados, los parámetros de fabricación de las probetas, los procedimientos de ensayo y fórmulas usadas para la obtención de resultados tanto en tracción y flexión. Finalmente se menciona características del estudio de Microscopia Electrónica de Barrido, SEM

#### **2.1 METODOLOGÍA**

La metodología para el desarrollo de esta investigación está dividida en tres etapas bien definidas.

La primera involucró la selección del material polimérico y los refuerzos de carbono. Para ello se analizó diferentes materiales poliméricos ligeros para la matriz y materiales a base de carbono para el refuerzo.

La segunda etapa fue el diseño y fabricación de especímenes mediante impresión 3D. Las medidas de las probetas fueron realizadas en base a las normas ASTM, D638 para tracción y D790 para flexión. Luego el diseño fue realizado mediante software 3D Inventor para luego cambiar el formato CAD a .STL, ya que este es el formato usado por el software de control de las impresoras 3D.

Para la fabricación se seleccionó una de las impresoras 3D de la Sala de Manufactura Digital de la PUCP y se determinaron variables de impresión. Las muestras fueron fabricadas con un 100% de porcentaje de relleno variando ángulos de impresión y altura de capa, cinco de tracción por cada tipo de orientación y material, y tres de flexión por cada tipo de orientación y material. De tal modo se fabricaron un total de 150 especímenes de tracción y 90 especímenes de flexión.

Una vez que los especímenes fueron fabricados se procedió con la tercera etapa, la caracterización de sus propiedades mecánicas y estructura interna. Primero se realizó una inspección visual para determinar discontinuidades o defectos de las muestras. Luego para la evaluación de propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tracción y flexión, y para el análisis estructural se realizó análisis de microscopía óptica y electrónica. Ambos desarrollados en los laboratorios de materiales de la PUCP

En la Figura 2.1 se muestra un esquema realizado del proceso experimental a seguir para la fabricación de las probetas de materiales compuestos mediante impresión 3D, los ensayos de tracción y flexión realizados para determinar las propiedades mecánicas y finalmente la caracterización estructural de la superficie fracturada mediante un análisis de microscopía electrónica de barrido.



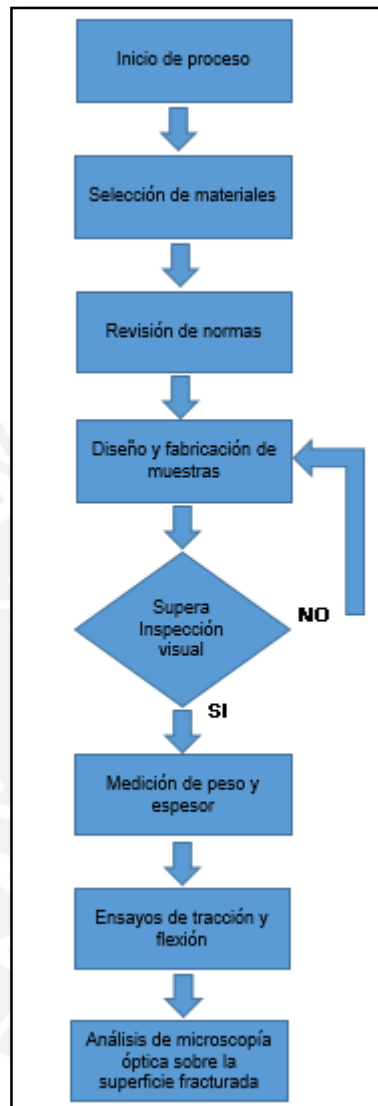


Figura 2.1. Diagrama de proceso experimental

## 2.2 MATERIALES

Para la fabricación de las muestras se emplearon rollos de filamentos de ABS, ABS + Nanotubo de carbono y ABS + Fibra de carbono. Estos rollos fueron importadas de EEUU de la empresa especializada en surtir materia prima para fabricación por FDM, 3DXTECH.

### 2.2.1 Filamento ABS

Para la fabricación de muestras de ABS se utilizó una bobina de filamento de ABS natural de 1,75 mm de diámetro de la empresa fabricante 3DXTECH, ver Figura 2.2. Este filamento es elaborado con ABS 100% natural, ligero y de fácil impresión. Por recomendación de la empresa fabricante la temperatura de extrusión debe ser 220-240°C y la temperatura de la cama entre 100-110°C. Las propiedades mecánicas de los filamentos antes de la deposición se ven en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades ABS natural 3DXtech [29]

Propiedades	Unidades	ABS natural
Resistencia a la tracción	MPa	41
Módulo de tracción	MPa	1948
Alargamiento a la tracción	%	4,03
Resistencia a la flexión	MPa	67
Módulo de flexión	MPa	1983



Figura 2.2. Bobina de ABS

## 2.2.2 Filamento ABS + Nanotubo de carbono

Para la fabricación de muestras de ABS + Nanotubo de carbono se utilizó una bobina de filamento de ABS + Nanotubo de carbono (CNT) de 1,75 mm de diámetro de la empresa fabricante 3DXTECH, ver Figura 2.3. Este filamento está elaborado con 15% de nanopartículas de nanotubo de carbono. Por recomendación de la empresa fabricante la temperatura de extrusión debe ser 220-260°C y la temperatura de la cama entre 100-110°C. Las propiedades mecánicas de los filamentos antes de la deposición se ven en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades ABS + Nanotubo de carbono 3DXtech [29]

Propiedades	Unidades	ABS + CNT
Resistencia a la tracción	MPa	42
Módulo de tracción	MPa	2131
Alargamiento a la tracción	%	3,75
Resistencia a la flexión	MPa	80
Módulo de flexión	MPa	2174



Figura 2.3. Bobina de ABS + CNT

### 2.2.3 Filamento ABS + Fibra de carbono

Para la fabricación de estas muestras se utilizó una bobina de filamento de ABS + Fibra de carbono de 1,75 mm de diámetro de la empresa fabricante 3DXTECH, ver Figura 2.4. Este filamento está elaborado con 15% de fibra de carbono. Por recomendación de la empresa fabricante la temperatura de extrusión debe ser 220-240°C y la temperatura de la cama entre 100-110°C. Las propiedades mecánicas del filamento antes de la deposición se ven en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades ABS + Fibra de carbono 3DXtech [30]

Propiedades	Unidades	ABS + CF
Resistencia a la tracción	MPa	36
Módulo de tracción	MPa	3575
Alargamiento a la tracción	%	1,97



Figura 2.4. Bobina de ABS + CF

### 2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES

Para el diseño de las muestras se revisó la normativa vigente relacionada a ensayos en piezas fabricadas mediante deposición fundida de materiales con matriz polimérica. Es por ello que para el diseño y fabricación se decidió usar la norma ASTM D638 [31] para tracción y la norma ASTM D790 [32] para flexión. En cada una de las normas se detallan las condiciones de los ensayos para la determinación de sus propiedades. Además, para el modelado CAD de las muestras se empleó el software Inventor 2015.

Los especímenes de tracción son de tipo V utilizadas para la caracterización de materiales semirrígidos con las siguientes dimensiones: longitud total 63,5 mm, ancho 9,53 mm, espesor 3,20 mm y una longitud calibrada de 9,53 mm. Ver Figura 2.5.

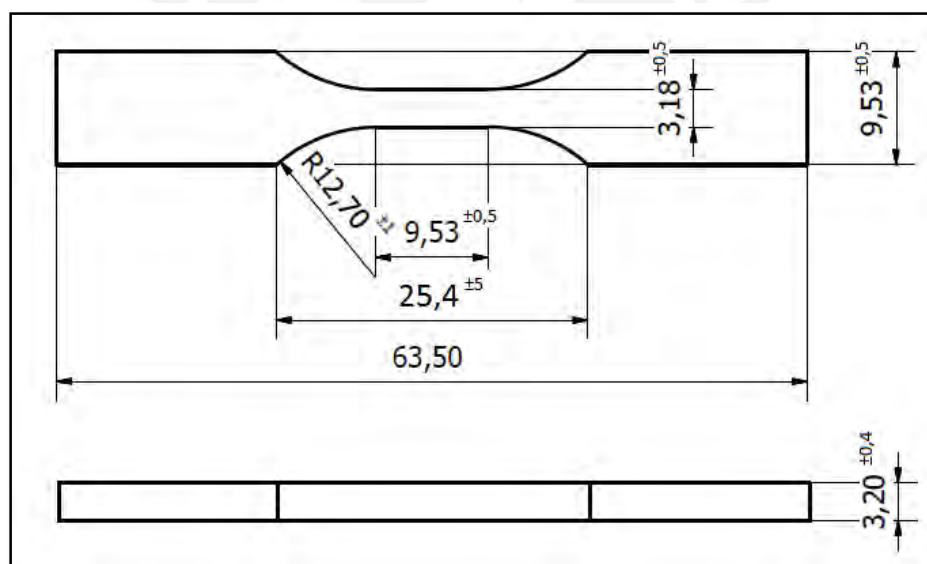


Figura 2.5. Espécimen de tracción según norma ASTM D638 [31]

Los especímenes de flexión utilizadas para la caracterización tienen las siguientes dimensiones: Longitud total 127 mm, ancho 12,7 mm y espesor 3,2 mm. Ver Figura 2.6.

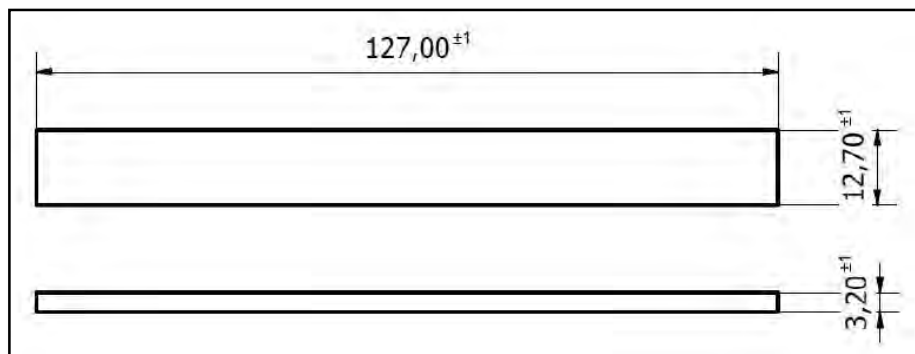


Figura 2.6. Espécimen de flexión según norma ASTM D790 [32]

Una vez terminados los diseños se procedió a exportar los archivos al formato .STL. Luego se utilizó el software Simplify3D para configurar y generar el GCODE que ejecutará la impresora.

El software Simplify3D corta el modelo en capas, generando trayectorias para depositar el material, calculando la cantidad y el tiempo de impresión. El programa permite configurar gran cantidad de parámetros como altura de capa, temperatura del extrusor y de la cama, relleno y más; así personalizar la impresión y obtener resultados óptimos.

### 2.3.1 Parámetros de impresión

Tras evaluar los diferentes parámetros de impresión y todas las características técnicas de la impresora 3D usada, se decidió elegir 3 parámetros fundamentales en la producción de las muestras: altura de capa, orientación de capa y temperatura de extrusión.

El primer parámetro elegido fue la altura de capa, esta es la distancia de separación que existe entre capas y determina la separación que existe entre las mismas, es por ello que podría afectar la adherencia entre capas. Además, influye en el número de capas necesarias para la fabricación de una pieza, que a su vez define la calidad de la pieza, tiempo y cantidad de material utilizado. Las alturas de capa elegidas fueron de 0,2 y 0,4 mm. En la Figura 2.7 se pueden ver las diferencias en calidad de impresión al variar los espesores de capa.



Figura 2.7. Diferentes espesores de capa para una misma pieza [33]

El segundo parámetro elegido fue la orientación de capa para la deposición del extrusor, con esto se obtiene diferentes tipos de mallado interno. Los ángulos elegidos para la orientación de capa son:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  (alternado) y  $45^\circ/-45^\circ$  (alternado). En la Figura 2.8 se aprecia una deposición con orientación  $0^\circ/90^\circ$  alternado.

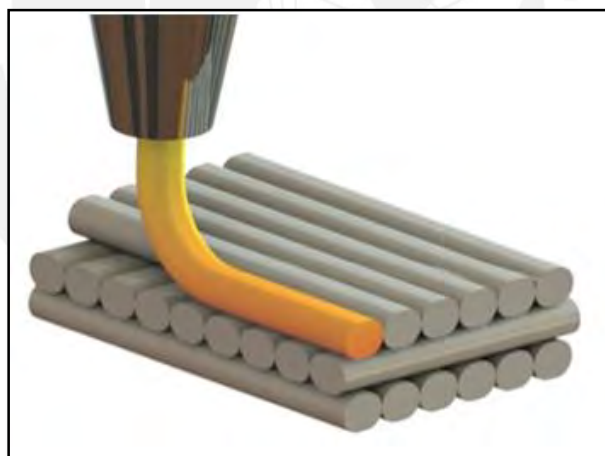


Figura 2.8. Orientación de capa  $0^\circ/90^\circ$  alternado [34]

Otro parámetro importante es la temperatura de extrusión, va de la mano con la velocidad de impresión, pues a mayor velocidad de impresión se necesita una mayor temperatura de extrusión. Si esta temperatura es muy baja el filamento no fluirá correctamente por el extrusor y puede generar atascos y aglomeraciones de material, por otro lado, si esta es muy elevada puede generar quemaduras o huecos en la pieza por el calor excesivo.

En nuestro caso con el fin de evitar problemas a la hora de la fabricación, se decidió usar el valor recomendado por el fabricante para cada tipo de filamento. En cuanto a la temperatura de la base, debe de estar caliente para evitar el *warping*. El *warping* es el resultado de tensiones internas que sufren algunos materiales al momento de enfriarse provocando contracciones que tienden a levantar la pieza de la base, en este caso también se utilizó la temperatura dada por el fabricante.

Actualmente las piezas realizadas por FDM no suelen ser macizas, pues solo están destinadas a ser ideas tangibles de cómo será un diseño, pero la necesidad de tener requerimientos mecánicos en piezas rápidas de producir conlleva a usar piezas totalmente sólidas para los ensayos, y según estudios realizados a polímeros impresos en 3D el aumento del porcentaje de relleno se refleja en una mayor resistencia [35], de ese modo todas las piezas tienen un relleno del 100% para alcanzar un mayor peso. En cuanto a la velocidad de impresión, los especímenes fueron impresos de forma rápida, pero sin olvidar la calidad final de las piezas. Por ello se eligió de velocidad de 1200 mm/min que concuerda con la temperatura utilizada para la impresión.

Resumiendo, los parámetros de impresión se exponen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros de impresión

Filamento	Altura de capa (mm)	Temperatura de extrusión (°C)	Temperatura de cama (°C)	Porcentaje de relleno (%)	Orientación de capa				
					0°	90°	45°	0°/90°	45°/-45°
ABS	0,2/0,4	230	100	100	↔	↕	↗	↔↕	↗↘
ABS+CNT	0,2/0,4	230	100	100	↔	↕	↗	↔↕	↗↘
ABS+CF	0,2/0,4	230	100	100	↔	↕	↗	↔↕	↗↘



Finalmente, en la Tabla 2.5 se puede observar la distribución total de los 240 especímenes fabricados tanto por material, orientación y altura de capa

Tabla 2.5. Distribución total de especímenes

Tipo de ensayo	Ángulo de impresión	Altura de capa 0,4 mm			Altura de capa 0,2 mm		
		ABS	ABS + CNT	ABS + CF	ABS	ABS + CNT	ABS + CF
Tracción	0°	5	5	5	5	5	5
	45°	5	5	5	5	5	5
	90°	5	5	5	5	5	5
	0°/90°	5	5	5	5	5	5
	45°/-45°	5	5	5	5	5	5
Flexión	0°	3	3	3	3	3	3
	45°	3	3	3	3	3	3
	90°	3	3	3	3	3	3
	0°/90°	3	3	3	3	3	3
	45°/-45°	3	3	3	3	3	3
<b>Total</b>		<b>240</b>					

### 2.3.2 Impresión de especímenes

Con los diseños y los parámetros de impresión de los especímenes listos se procedió a la fabricación de estos, Primero se colocó uno por uno los rollos de filamentos de los tres materiales en el porta bobina de la impresora, luego se introdujo la punta del filamento dentro de una manguera hueca de mayor diámetro que conduce el filamento a la boquilla de extrusión, allí dentro están dos engranajes activados por un servomotor que tira constantemente del filamento hacia el extrusor para su calentamiento y deposición durante el proceso de fabricación, esta deposición se realiza de abajo hacia arriba siguiendo la trayectoria definida por el modelo CAD. El tiempo promedio de impresión para un espécimen de tracción fue de 2.1 min para altura de capa de 0,4 mm y 7,3 min para 0,2 mm

de altura de capa. El tiempo promedio de impresión para los especímenes de flexión fue de 6,3 min para las de 0,4 mm de altura de capa y 24 min para las de 0,2 mm de altura de capa. El tiempo total de impresión fue de 35 horas aproximadamente. Este tiempo no acumula las horas muertas por alguna falla en la impresora que tuvo que ser solucionada en el momento. En la Figura 2.9 se aprecia el proceso de fabricación de estas.

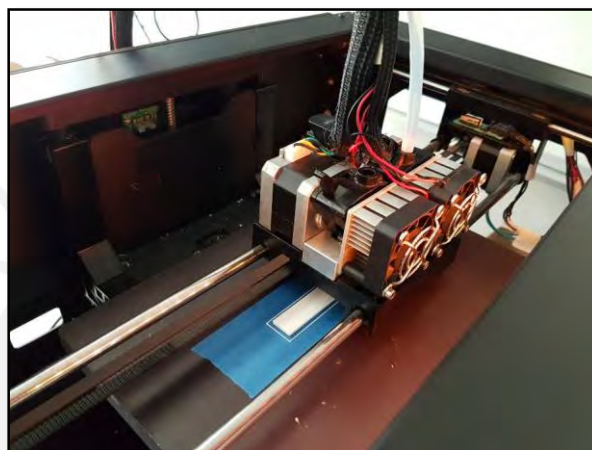


Figura 2.9. Proceso de fabricación de muestras

La base de impresión se mantuvo caliente a 100°C para evitar el *warping*, no obstante, se utilizó cinta *masking tape* azul para facilitar el retiro de las piezas.

Durante toda la fabricación se tuvo algunos problemas como paradas intempestivas del cabezal móvil, generando deposición de material en un solo punto. Además, paradas de emergencia de la impresora 3D por problemas con el sensor de temperatura que marcaba una temperatura menor a la configurada.

Otro punto a tomar en cuenta es que durante la fabricación de especímenes de flexión y de tracción para altura de capa 0,2 mm con filamentos de ABS + CNT se produjo atascamiento de material en la boquilla de deposición, probablemente generado por un tema de la viscosidad del material.

Finalmente, los especímenes que no cumplían con tener un cuerpo totalmente uniforme y solido sin cavidades fueron desechadas y luego vueltas a fabricar. Así se aseguró tener

muestras de mejorar calidad para realizar los ensayos. Las Figuras 2.10 y 2.11 muestran los especímenes de tracción y flexión respectivamente.

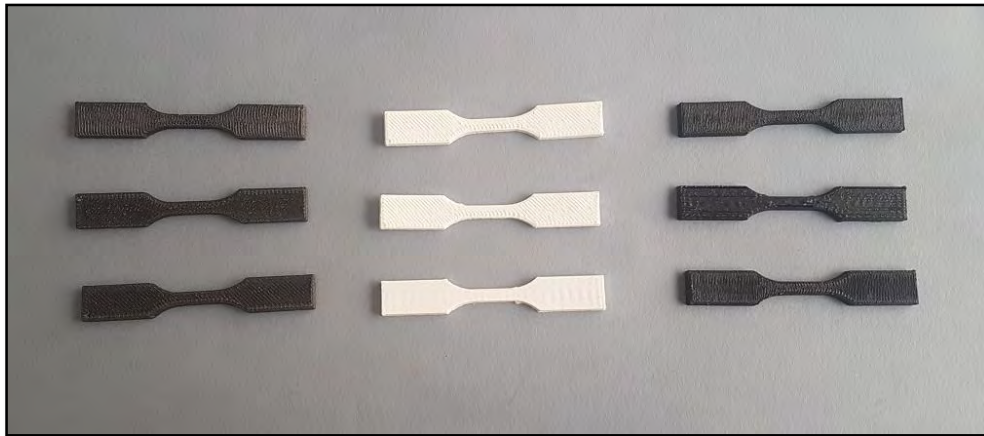


Figura 2.10. Especímenes de tracción

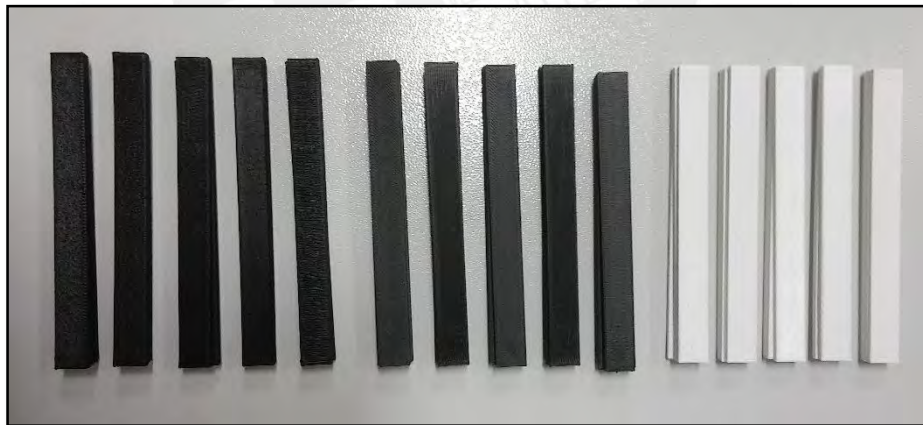


Figura 2.11. Especímenes de flexión

## 2.4 ENSAYOS DE TRACCIÓN

Antes de realizar alguna toma de medidas y ensayos de tracción, las muestras fueron codificadas para evitar errores en los datos a medir y en futuros resultados obtenidos.

Los especímenes de ABS tienen la letra A antecediendo a un número que va del 1 al 25. Los de ABS + CNT tienen la letra N antecediendo a un número que va del 1 al 25 y del mismo modo las de ABS + CF tienen la letra C antecediendo a un número que va del 1 al 25. La numeración va de 1 al 5 para muestras de 90° de orientación de capa, del número 6 al 10 las de 0° de orientación de capa, del número 11 al 15 las de 45° de orientación de capa, de 16 al 20 las de 0°/90° de orientación de capa y del número 21 al 25 las de 45°/-45° de orientación de capa.

#### 2.4.1 Medición de espesor y masa

La norma ASTM D638 señala que a todas las muestras que fueron ensayadas se les debe realizar cinco mediciones de espesor a lo largo de la sección reducida para determinar un espesor promedio antes de realizar los ensayos de tracción.

Estas mediciones fueron realizadas con un vernier digital marca Mahr modelo MarCal 16 ER del laboratorio de materiales PUCP. Ver Figura 2.12.



Figura 2.12. Medición de espesor de las muestras de tracción

A continuación, en la tabla 2.6 se muestran las mediciones promedio de espesor de las muestras de tracción.

Tabla 2.6. Espesor promedio de especímenes de tracción

Espesor promedio (mm) de muestras de tracción						
Material	Altura de capa (mm)	Orientación				
		90°	0°	45°	0°/90°	45°/-45°
ABS	0,2	3,04	3,12	3,05	3,08	3,13
	0,4	3,29	3,27	3,31	3,33	3,35
ABS+CNT	0,2	3,00	3,02	3,05	3,02	3,04
	0,4	2,95	2,98	2,92	2,90	2,88
ABS+CF	0,2	3,10	3,38	3,19	3,23	3,16
	0,4	3,15	3,21	3,12	3,11	3,19

Para determinar la densidad de los especímenes se realizaron mediciones de masa en la balanza digital marca Mettler Toledo del laboratorio de materiales de la PUCP. Ver Figura 2.13.



Figura 2.13. Toma de masa de las muestras

Con el fin de buscar que los especímenes fabricados mediante impresión 3D sean lo más resistentes posibles fueron diseñados con 100% de porcentaje de relleno, por ello el volumen que ocupa la pieza es equivalente al de diseño.

La fórmula que se usó para encontrar la densidad es la siguiente:

Ecuación 2.1

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad [g/cm<sup>3</sup>]

$m$  = Masa [g]

$V$  = Volumen [cm<sup>3</sup>]

Estos valores permitirán relacionar la densidad de cada material con las variaciones de las propiedades resultantes de los ensayos.

#### **2.4.2 Procedimiento de ensayo de muestras**

Los ensayos de tracción fueron realizados en el área de polímeros del laboratorio de materiales PUCP en la Máquina de Tracción Universal Zwick/Roell Z050 equipado con una celda de carga de 1 kN a una temperatura de 22,1°C. Ver Figura 2.14.



Figura 2.14. Máquina de tracción universal Zwick/Roell Z050

La máquina cuenta con un par de mordazas en la parte superior e inferior para tener un mejor agarre de la muestra que se accionan mediante aire comprimido.

Además, tiene acoplado unas pinzas extensiométricas que permiten determinar el desplazamiento del espécimen durante el ensayo, desde que la probeta es sometida a la fuerza de tracción hasta su rotura.

La velocidad de ensayo fue constante de 1mm/seg e igual para todos los ensayos como dice la norma ASTM D638 [31].

La muestra se somete a una fuerza a lo largo de su eje longitudinal principal a velocidad constante hasta que se produzca la rotura, ver Figura 2.15.

Durante este procedimiento el software de adquisición de datos instalado en la máquina registra la fuerza y los valores de incremento de la distancia entre mordazas

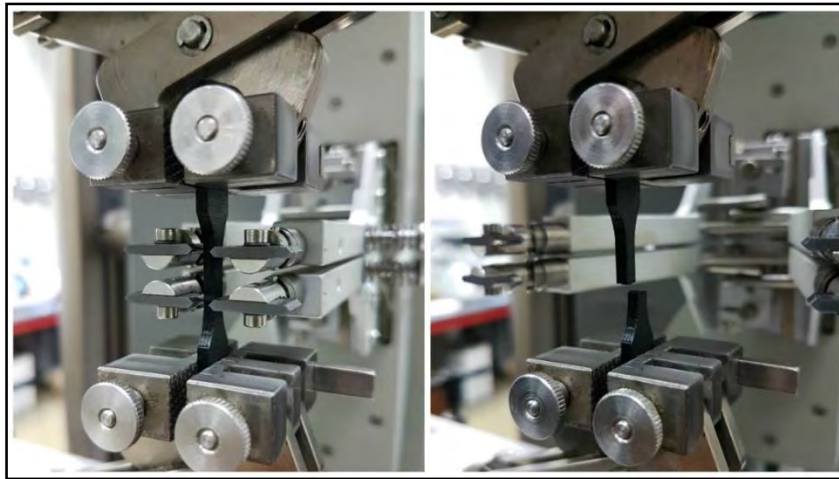


Figura 2.15. Muestra antes y después del ensayo de tracción

En total se realizaron 150 ensayos de tracción de muestras fabricadas por FDM. Ver Figura 2.16.

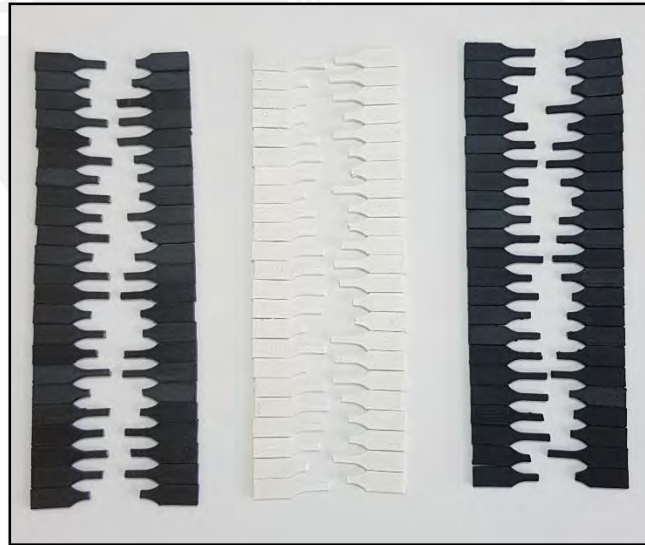


Figura 2.16. Muestras de tracción ensayadas



### 2.4.3 Procedimiento de ensayo de filamentos

Para una mayor comprensión de los valores obtenidos de los ensayos de tracción de las muestras se procedió a realizar pruebas de tracción de los filamentos que se utilizaron para la fabricación de los especímenes. Las pruebas fueron realizadas en el área de polímeros del laboratorio de materiales PUCP en la Máquina de Tracción Universal Zwick/Roell Z050 equipado con una celda de carga de 1kN a una temperatura promedio de 22,1°C. Para realizar los ensayos se recurrió a la norma ASTM D638 [31]. Se realizaron 5 ensayos por tipo de material para obtener un valor promedio aceptable. Ver Figura 2.17.



Figura 2.17. Ensayo de tracción de filamentos

### 2.4.4 Cálculos y Expresiones de los Resultados

Después de realizar todos los ensayos los resultados fueron exportados a una base de datos en Microsoft Excel para su posterior análisis. Todos los resultados que fueron obtenidos por la computadora de la máquina de tracción universal fueron calculados en

base a las ecuaciones mostradas a continuación. Estas fueron tomadas de las normas ASTM para ensayos de tracción D638 [31] y ensayos de flexión D790 [32].

#### 2.4.4.1 Esfuerzo de tracción

El esfuerzo es la fuerza por unidad de área de la sección transversal inicial. Se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 2.2.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dónde:

$\sigma$  = Resistencia a la tracción [MPa]

$F$  = Fuerza aplicada [N]

$A$  = Área transversal [mm<sup>2</sup>]

Para nuestra investigación interesa el esfuerzo máximo, por ello se utilizó la fuerza máxima antes de romper.

#### 2.4.4.2 Módulo de elasticidad

Llamado también módulo de Young. Para un material en la zona elástica es un valor constante. Se calcula como:

Ecuación 2.3.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Dónde:

$E$  = Módulo de elasticidad [MPa]

$\sigma_2$  y  $\sigma_1$  = Esfuerzos dentro de la zona elástica de la curva [MPa]

$\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_1$  = Deformaciones correspondientes a los esfuerzos  $\sigma_2$  y  $\sigma_1$  [mm/mm]

#### 2.4.4.3 Deformación unitaria o alargamiento de rotura

Es el incremento de longitud por unidad de longitud inicial.

Se calcula como:

Ecuación 2.4.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

Dónde:

$\varepsilon$  = Deformación unitaria [mm/mm]

$\delta$  = Incremento de longitud [mm]

$L_0$  = Longitud inicial [mm]

#### 2.5 ENSAYOS DE FLEXIÓN

Al igual que las muestras de tracción, todos los especímenes de flexión fueron codificados para evitar errores en los datos a medir y en futuros resultados obtenidos.

Los especímenes de ABS tienen la letra A antecediendo a un número que va del 1 al 15. Las de ABS + CNT tienen la letra N antecediendo a un número que va del 1 al 15 y del mismo modo las de ABS + CF tienen la letra C antecediendo a un número que va del 1 al 15. La numeración va de 1 al 3 para muestras de 0° de orientación de capa, del número 4 al 6 para las de 90° de orientación de capa, del número 7 al 9 para las de 45° de orientación de capa, del 10 al 12 para las de 0°/90° de orientación de capa y del número 13 al 15 para las de 45°/-45° de orientación de capa.

### 2.5.1 Procedimiento de ensayo

Los ensayos de flexión fueron realizados en el área de polímeros del laboratorio de materiales PUCP en la Máquina de Tracción Universal Zwick/Roell Z050 equipado con una celda de carga de 51kN a una temperatura promedio de 22,2°C.

La muestra se apoya en los extremos para que funcionen como soporte, el tercer punto debe estar situado en el centro de la muestra y es allí donde se aplicará la carga flexionante.

Para encontrar la tasa de movimiento o velocidad de ensayo se puede usar el procedimiento A o el procedimiento B según norma ASTM D790 [32].

Se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2.5.

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Dónde:

$R$  = Tasa de movimiento [mm/min]

$L$  = Separación entre los soportes [mm]

$d$  = Espesor de la muestra [mm]

$Z$  = Tasa de esfuerzo de la fibra exterior [mm/mm/min]

En el procedimiento A se utiliza un  $Z = 0,01 \text{ mm/mm/min}$ , pero con la velocidad encontrada los especímenes de prueba no rompieron.

En el procedimiento B se utiliza un  $Z = 0,1 \text{ mm/min}$  obteniendo un  $R = 13,65 \text{ mm/min}$  Con esta velocidad si se pudo romper las muestras, por ende, esta fue la velocidad de trabajo. Ver Figura 2.18.

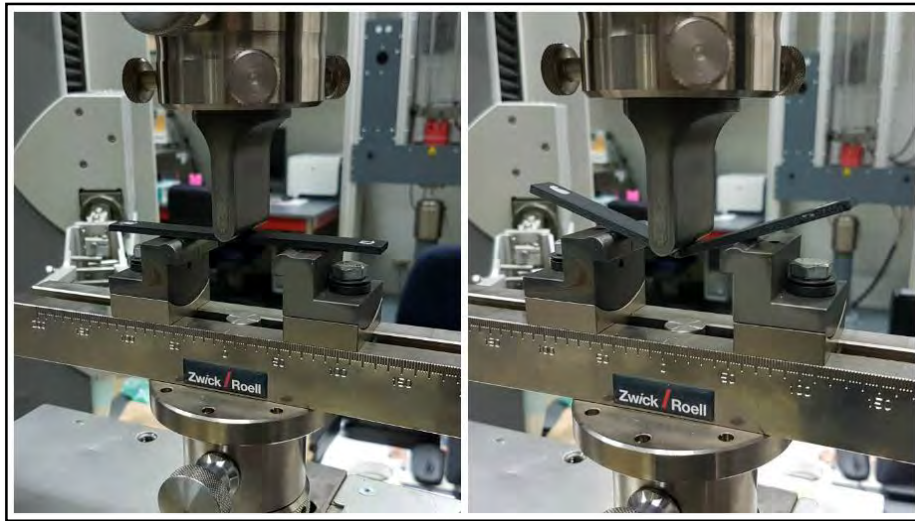


Figura 2.18. Muestra antes y después del ensayo de flexión

En total se realizaron ensayos de flexión de 90 muestras fabricadas por FDM. Ver Figura 2.19.

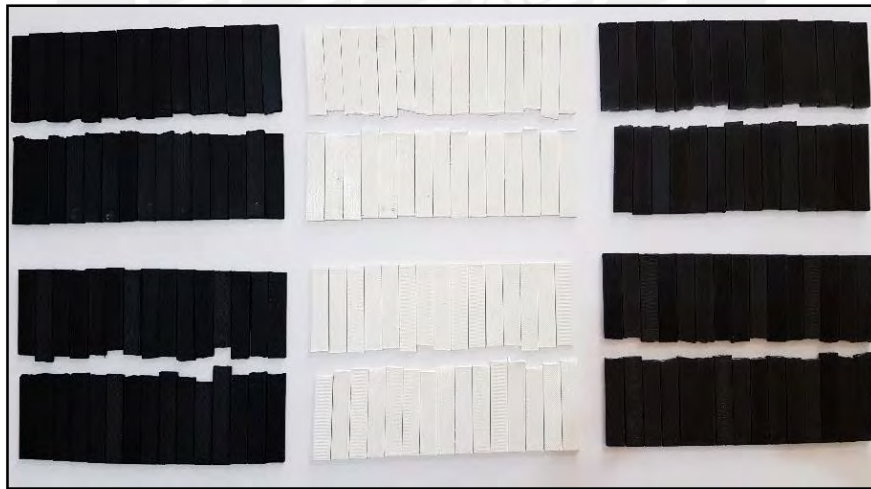


Figura 2.19. Muestras de flexión ensayadas

## 2.5.2 Cálculos y expresiones de los resultados

Después del ensayo de todos los especímenes los datos obtenidos fueron exportados a Microsoft Excel para su posterior análisis.

### 2.5.2.1 Esfuerzo de flexión

El esfuerzo es la fuerza por unidad de área de la sección transversal inicial. Se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 2.6.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Dónde:

$\sigma_f$  = Resistencia a la flexión en el punto medio de la muestra [MPa]

$P$  = Carga obtenida en el punto medio en la curva Carga - Deformación [N]

$L$  = Separación entre los soportes [mm]

$b$  = Ancho de la muestra [mm]

$d$  = Espesor de la muestra [mm]

Si la muestra desliza de los apoyos [32], el cual no fue nuestro caso, se debe utilizar la siguiente fórmula:

Ecuación 2.7.

$$\sigma_f = \left( \frac{3PL}{2bd^2} \right) \left[ 1 + 6\left(\frac{D}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \right]$$

Dónde:

$D$  = Deflexión de la línea de centros de la muestra y la línea centro de la separación entre los soportes [mm]

### 2.5.2.2 Módulo de elasticidad

Llamado también módulo de Young. Para un material en la zona elástica es un valor constante. Se calcula como:

Ecuación 2.8.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

Dónde:

$E_B$  = Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]

$L$  = Separación entre los soportes [mm]

$m$  = Parte de la pendiente de la tangente inicial en la curva Carga - Deflexión [N/mm]

$b$  = Ancho de la muestra [mm]

$d$  = Espesor de la muestra [mm]

La pendiente de la tangente de la curva Carga – Deflexión puede calcularse con la siguiente formula:

Ecuación 2.9.

$$m = \frac{\Delta P}{\Delta y}$$

Dónde:

$\Delta P$  = Variación de la carga en los puntos de análisis [N]

$\Delta y$  = Variación de la deflexión en los puntos de análisis [mm]

## 2.6 ESTUDIO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Para la caracterización estructural de los especímenes se utilizó microscopía electrónica de barrido o SEM (*Scanning Electron Microscopy*), que utiliza un haz de electrones en lugar un haz de luz para formar la figura. El microscopio empleado fue un FEI Quanta 650. Ver Figura 2.20.



Figura 2.20. Microscopio Electrónico de Barrido Quanta 650

Las muestras se colocan en un espacio donde se hace vacío. Un haz delgado de electrones es producido por medio del calentamiento de un filamento metálico de tungsteno. Este barre la muestra escaneando la superficie. Se utilizan diferentes señales que se recogen para crear una figura aumentada y de apariencia tridimensional.

Para que las muestras no sean cargadas estáticamente y se pueda formar bien la figura tienen que estar cubiertas de una capa conductora. Por ello, en este caso se empleó cinta de carbono para la conducción. Además, las muestras tienen que estar alineadas a una misma altura para que el enfoque sea mejor y más rápido.

Para el análisis se seleccionaron tres muestras con las mejores propiedades mecánicas de cada material con altura de capa 0,2 mm. Seleccionando un total de nueve especímenes, tres de ABS, tres de ABS+CNT y tres de ABS+CF. Estas fueron distribuidas en un el interior de una tapa llena de macilla, de este modo se pudo sujetar las muestras en posición vertical a una misma altura de tal forma que la superficie de fractura, transversal a la longitud de la



probeta, queda expuesta con el fin de mostrarla en los resultados. Finalmente, estas fueron cubiertas por los bordes con cinta de carbono. Ver Figura 2.21.

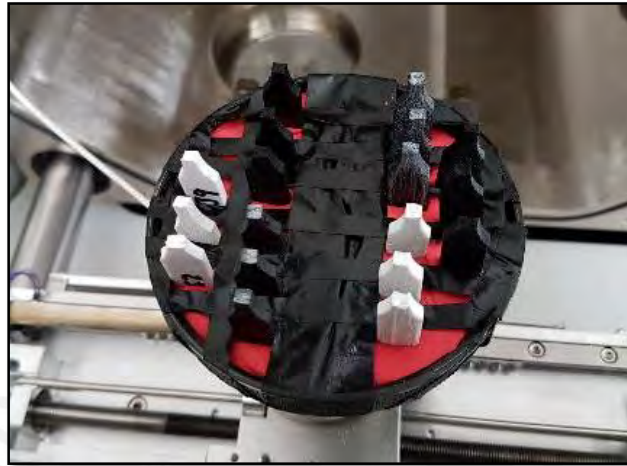


Figura 2.21. Distribución de especímenes en el SEM



## **CAPITULO 3**

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se expone los resultados obtenidos del procedimiento experimental de los especímenes fabricados mediante impresión 3D, resultados obtenidos de los ensayos de tracción y flexión tanto para especímenes de altura de capa de 0,2 mm y 0,4 mm. Enfatizados con gráficas y tablas comparativas para obtener una mayor percepción de la investigación y los resultados.

#### **3.1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN**

Para el registro de datos se empleó una computadora con un software de adquisición de datos que forma parte de máquina de tracción universal. Este software registra valores de fuerza e incremento de longitud producidas durante el ensayo.

### 3.1.1 Resultado de las pruebas de tracción a filamentos

En la Tabla 3.1 se muestra el resumen de las pruebas de tracción de los filamentos de ABS, ABS + CNT y ABS + CF.

Tabla 3.1. Resultado promedio de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad de tracción en filamentos

Material	$\sigma_{Mpromedio}$	$\epsilon_{promedio}$	$E_{promedio}$
	MPa	%	MPa
ABS	34,90	5,56	1686,33
ABS+CNT	33,38	1,89	1793,97
ABS+CF	37,69	1,23	4253,94

### 3.1.2 Resultado de ensayos de tracción a especímenes de 0,4 mm de altura de capa

En la Tabla 3.2 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,4 mm. Además, se añade los valores promedios de densidad de todas las muestras.

Tabla 3.2. Resultados promedio de esfuerzo máximo, elongación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de tracción 0,4 mm

Orientación	Material	$\sigma_{Mpromedio}$	$\epsilon_{promedio}$	$E_{promedio}$	$\rho_{promedio}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
90°	ABS	32,14	2,82	1582,34	0,98
	ABS+CNT	22,52	2,31	1682,14	0,89
	ABS+CF	18,30	1,11	1907,67	0,90
Orientación	Material	$\sigma_{Mpromedio}$	$\epsilon_{promedio}$	$E_{promedio}$	$\rho_{promedio}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°	ABS	32,56	1,99	2092,09	0,97
	ABS+CNT	27,70	1,77	1986,93	0,92
	ABS+CF	18,93	1,41	2208,62	0,81

Tabla 3.2. Continuación resultados promedio de esfuerzo máximo, elongación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de tracción 0,4 mm

Orientación	Material	$\sigma_{Mpromedio}$	$\epsilon_{promedio}$	$E_{promedio}$	$\rho_{promedio}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°	ABS	27,86	2,06	1637,57	0,97
	ABS+CF	19,22	1,76	2278,29	0,86
	ABS+CF	19,22	1,76	2278,29	0,86
0°/90°	ABS	29,13	2,20	1752,36	0,99
	ABS+CF	18,42	1,79	2057,77	0,84
	ABS+CF	18,42	1,79	2057,77	0,84
45/-45°	ABS	28,13	2,08	1530,81	0,99
	ABS+CF	19,72	1,88	2427,90	0,90
	ABS+CF	19,72	1,88	2427,90	0,90

A partir de la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se elaboró un conjunto de gráficas presentadas de la Figura 3.1 a la Figura 3.3. En ellas se muestran los valores promedios de esfuerzos de tracción máximos, porcentajes de elongación y módulos de elasticidad, por orientación de capa de cada material usado para la investigación. El color verde representa el material ABS, el color rojo representa el material ABS+CF y el color azul representa el material ABS+CF. Además, en las gráficas se encuentran los valores promedios máximos de los filamentos, obtenidos de los ensayos de tracción los cuales están representados con una línea horizontal indicando el color del material que representan.

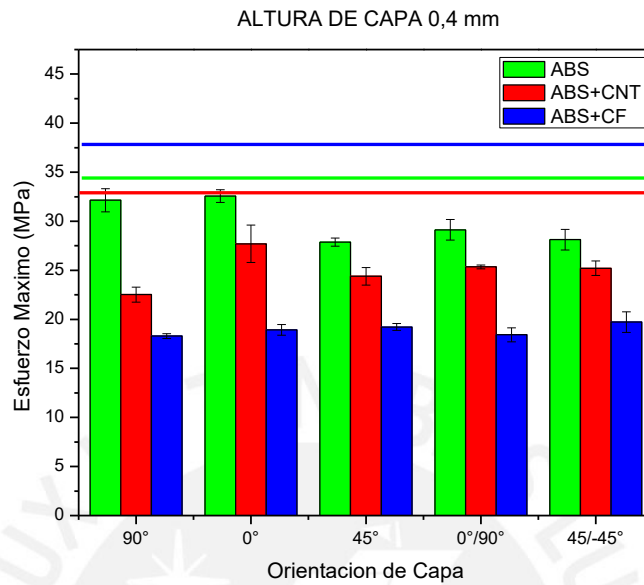


Figura 3.1. Diferencias entre esfuerzos promedios máximos por orientación de capa y material

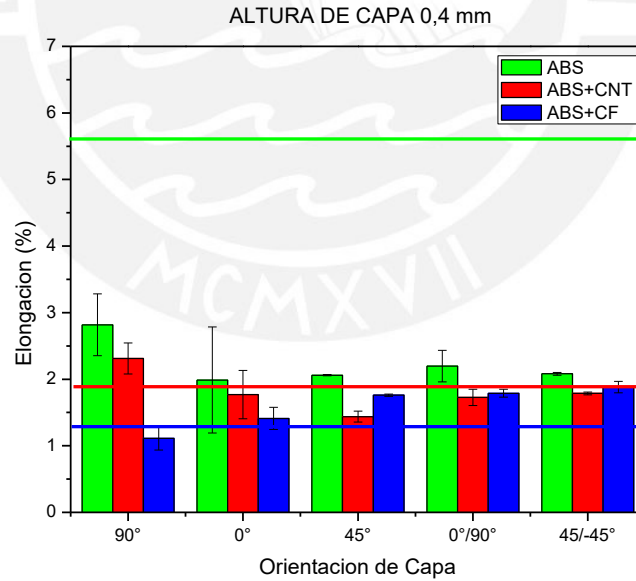


Figura 3.2. Diferencias entre porcentaje de elongación promedio por orientación de capa y material

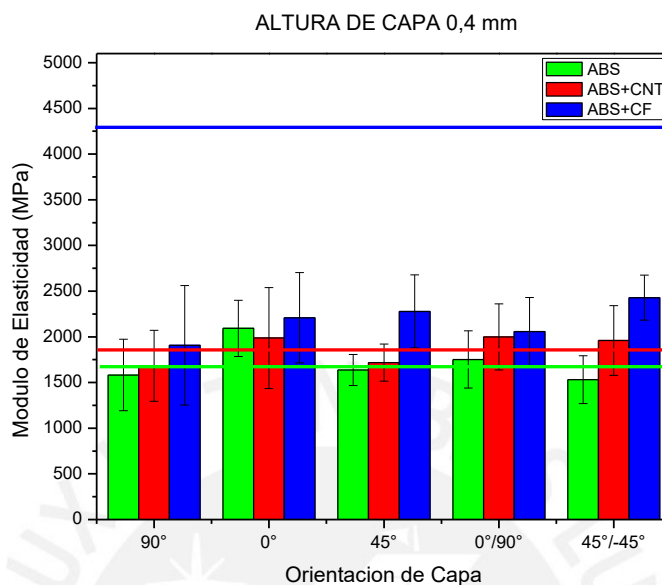


Figura 3.3. Diferencias entre módulos de elasticidad promedio por orientación de capa y material

En la Figura 3.1 se puede apreciar que al fabricar las muestras mediante la tecnología FDM el esfuerzo máximo de todos los especímenes fabricados disminuye comparados con sus filamentos, una de las razones del porque este puede ocurrir es que el proceso de FDM altere el ordenamiento estructural y la interacción entre hilos y capas de los materiales compuestos. En el caso del ABS la disminución de la resistencia no es tan amplia en comparación al ABS+CF que se debilita hasta más del 50% del valor máximo de filamento. En cuanto al ABS+CNT la disminución del esfuerzo máximo, respecto al filamento, se da hasta un 25% para 90° de orientación de capa.

En la Figura 3.2 se aprecia que los filamentos de ABS tienen una elongación aproximada de hasta un 200% más que el ABS+CNT y 350% más que el ABS+CF. En los especímenes la tendencia es la misma, el valor de elongación del ABS es mayor al del ABS+CNT y ABS+CF, pero con mucha variabilidad para las orientaciones 90° y 0°. En los especímenes de 45°/-45° de orientación de capa esta diferencia se reduce hasta un aproximado de 15% más entre el ABS tanto para el ABS+CNT y el ABS+CF, además, para 45°/-45° los materiales se comportan de la misma manera ante cambios de forma sin que se produzca

rotura, esto se puede deber a que esa orientación ejerce una distribución uniforme de cargas de tracción en los especímenes.

En la Figura 3.3 tenemos los módulos de elasticidad y aunque es difícil concluir con objetividad, ya que la variabilidad de los resultados es alta, se ve que el material más rígido es el ABS+CF, para todos los tipos de orientación, seguido por el ABS+CNT y el ABS. Este resultado era de esperar, pues como se vio en la Figura 3.2 este material tiene un porcentaje de elongación relativamente bajo en comparación al ABS y ABS+CNT. Además, para los especímenes de ABS y ABS+CNT el módulo de elasticidad permanece casi constante comparados con sus filamentos; sin embargo, para los especímenes de ABS+CF se pierde más del 50% de rigidez.

También, a partir de la Tabla 3.2 se elaboró un conjunto de graficas presentadas de la Figura 3.4 a la Figura 3.8. En ellas se representa las curvas esfuerzo vs elongación para cada material en función a la orientación de capa de  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Para la representación de las curvas se eligió las muestras cuyos valores de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad se asemejen más al valor promedio de las mismas mostrados en la Tabla 3.2. Las líneas de color verde representan el ABS, las líneas de color rojo representan el ABS+CNT y las líneas azules representan el ABS+CF.

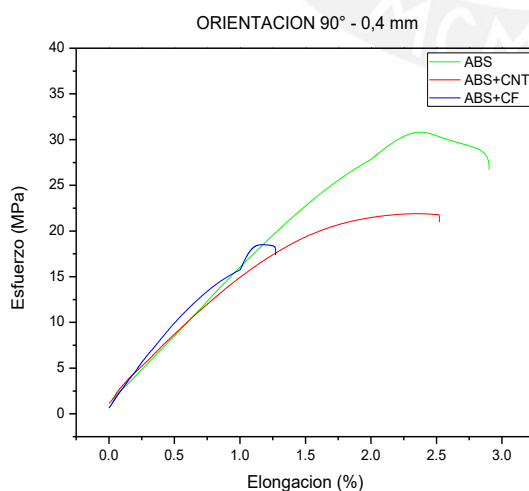


Figura 3.4. Esfuerzo vs Elongación  $90^\circ$

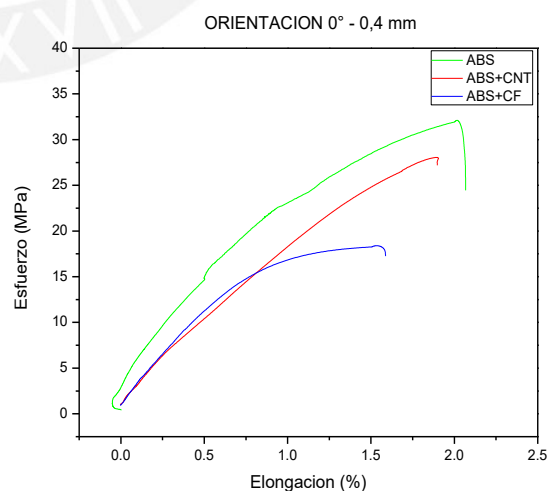


Figura 3.5. Esfuerzo vs Elongación  $0^\circ$

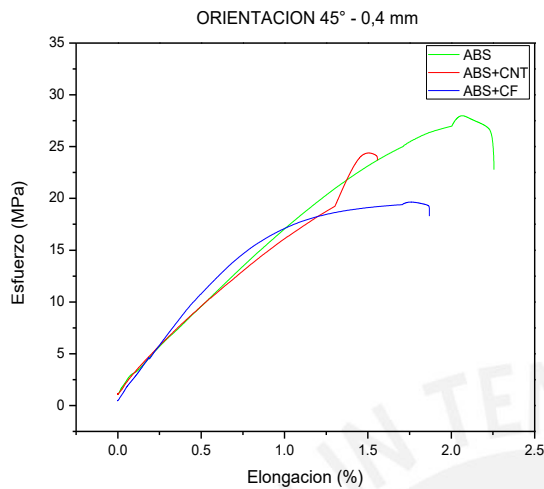


Figura 3.6. Esfuerzo vs Elongación 45°

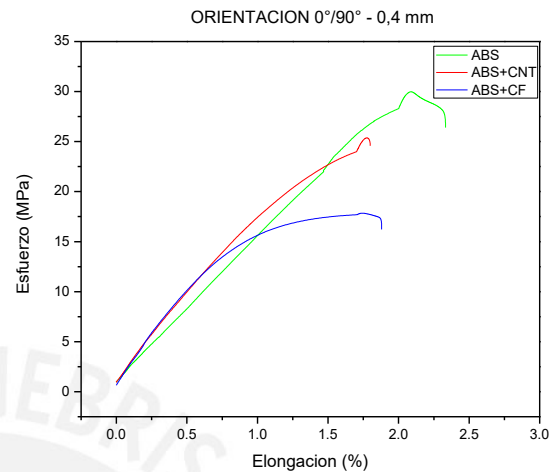


Figura 3.7. Esfuerzo vs Elongación 0°/90°

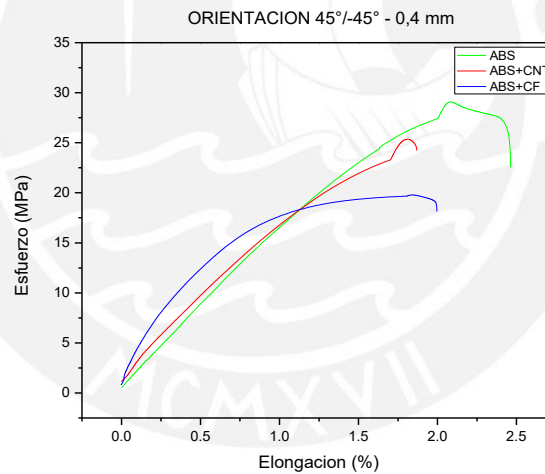


Figura 3.8. Esfuerzo vs Elongación 45°/-45°

Si se compara material por material se aprecia que para todas las orientaciones de deposición el esfuerzo máximo se da con los especímenes de ABS, con un valor máximo de 30MPa para la orientación 0° que es paralela a la fuerza aplicada durante el ensayo. Además, para todos los casos, la zona de deformación plástica tiene valores pequeños y es muy corta en comparación a la zona de deformación elástica, esto lleva a concluir que



los materiales fabricados por FDM son frágiles, en especial el ABS+CNT y ABS+CF donde la zona de deformación plástica es casi nula.

### 3.1.3 Resultado de ensayos de tracción a especímenes de 0,2 mm de altura de capa

En la Tabla 3.3 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,2mm, además se añade los valores promedios de densidad de todas las muestras.

Tabla 3.3. Resultados promedio de esfuerzo máximo, elongación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de tracción 0,2 mm

Orientación	Material	$\sigma_{M\text{promedio}}$	$\epsilon_{\text{promedio}}$	$E_{\text{promedio}}$	$\rho_{\text{promedio}}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
90°	ABS	34,71	7,68	2231,75	0,98
	ABS+CNT	27,65	3,16	1536,73	0,93
	ABS+CF	22,21	3,59	2653,66	0,96
Orientación	Material	$\sigma_{M\text{promedio}}$	$\epsilon_{\text{promedio}}$	$E_{\text{promedio}}$	$\rho_{\text{promedio}}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°	ABS	32,83	3,54	2165,85	0,97
	ABS+CNT	34,23	2,13	2172,55	0,92
	ABS+CF	23,33	1,85	2083,74	0,95
Orientación	Material	$\sigma_{M\text{promedio}}$	$\epsilon_{\text{promedio}}$	$E_{\text{promedio}}$	$\rho_{\text{promedio}}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°	ABS	35,21	8,29	2052,22	0,97
	ABS+CNT	31,76	3,29	2058,85	0,95
	ABS+CF	25,04	3,03	2370,23	0,97

Tabla 3.3. Continuación resultados promedio de esfuerzo máximo, elongación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de tracción 0,2 mm

Orientación	Material	$\sigma_{M \text{ promedio}}$	$\epsilon_{\text{promedio}}$	$E_{\text{ promedio}}$	$\rho_{\text{promedio}}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°/90°	ABS	34,42	4,70	2193,36	0,98
	ABS+CNT	30,70	2,41	2008,21	0,94
	ABS+CF	23,45	2,68	2751,83	0,97
Orientación	Material	$\sigma_{M \text{ promedio}}$	$\epsilon_{\text{promedio}}$	$E_{\text{ promedio}}$	$\rho_{\text{promedio}}$
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°/-45°	ABS	34,53	6,79	2045,51	0,99
	ABS+CNT	32,42	3,38	1818,16	0,96
	ABS+CF	26,18	2,66	2590,05	0,98

De igual manera que en el caso de los resultados de los ensayos de tracción de altura de capa 0,4 mm, a partir de la Tabla 3.1 y Tabla 3.3 se elaboró un conjunto de gráficas para los resultados de altura de capa 0,2 mm presentadas de la Figura 3.9 a la Figura 3.11.

En ellas se muestran los valores promedios de esfuerzos de tracción máximos, porcentajes de elongación y módulos de elasticidad, por orientación de capa de cada material usado para la investigación. El color verde representa el material ABS, el color rojo representa el material ABS+CNT y el color azul representa el material ABS+CF.

Además, en las gráficas se encuentran los valores promedios máximos de los filamentos, obtenidos de los ensayos de tracción los cuales están representados con una línea horizontal indicando el color del material que representan.

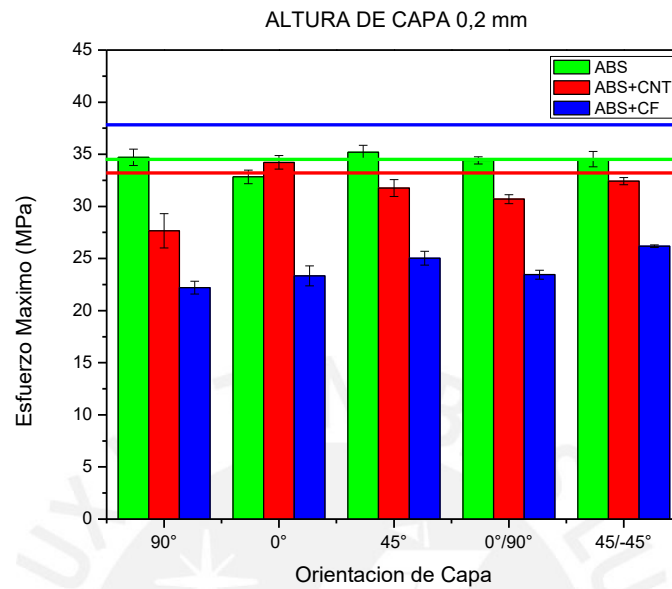


Figura 3.9. Diferencias entre esfuerzos promedios máximos por orientación de capa y material

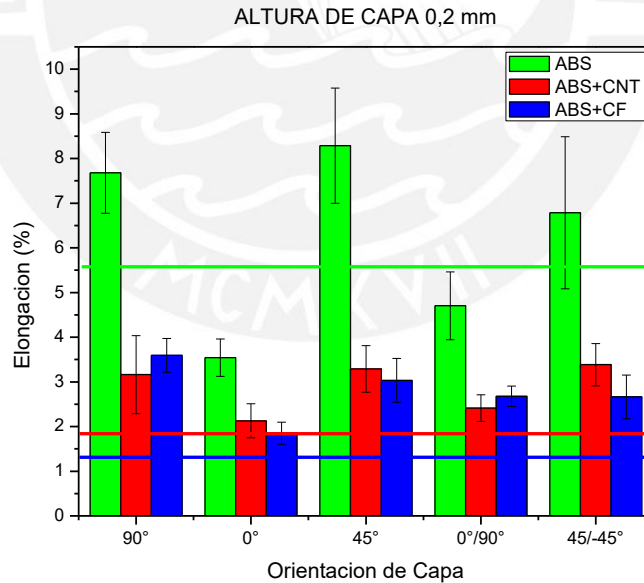


Figura 3.10. Diferencias entre porcentaje de elongación promedio por orientación de capa y material

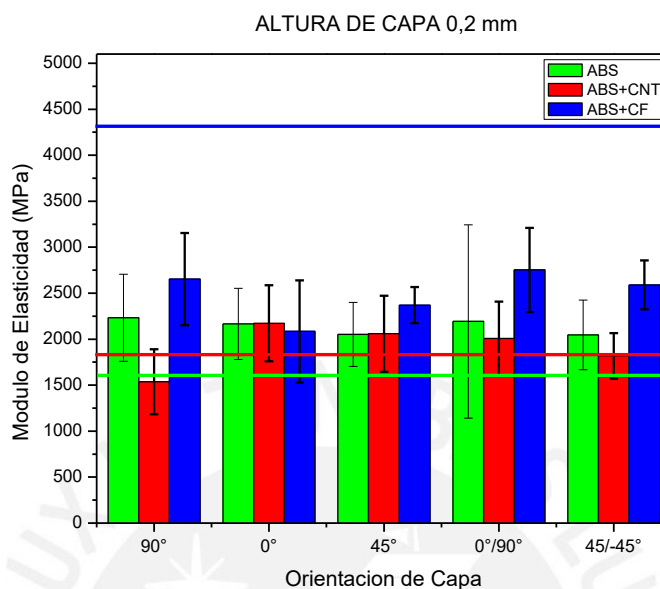


Figura 3.11. Diferencias entre módulos de elasticidad promedio por orientación de capa y material

En la Figura 3.9 se aprecia que la resistencia a la tracción es casi similar a la de los filamentos excepto en el caso del ABS+CF. Esto se puede deber a que al tener una menor altura de capa al momento de la deposición disminuyen los espacios en el interior, por ello las fibras están más unidas entre sí, soportando un mayor esfuerzo. De igual manera que en los especímenes de 0,4 mm de altura de capa, en las de 0,2 mm, el más resistente es el ABS seguido del ABS+CNT y el ABS+CF para todas las orientaciones. En el caso de los especímenes de ABS la disminución de la resistencia máxima es casi nula en comparación en el filamento. En el ABS+CF la máxima disminución se da en los especímenes de orientación 90°. En cuanto al ABS+CNT la disminución del esfuerzo máximo, respecto al filamento, es casi nula llegando incluso a superar el valor promedio máximo del filamento para la orientación 0°.

En la Figura 3.10 aunque con valores de variabilidad elevados se aprecia que los especímenes de ABS son más dúctiles. Esto se puede atribuir a una mala adhesión entre las fibras de los compuestos al momento de la fabricación mediante FDM. Para los especímenes de ABS con orientaciones de capa de 90°, 45° y 45°/-45° el porcentaje de

elongación supera a la del filamento. Además, todos los especímenes de ABS+CNT y ABS+CF superan al porcentaje de elongación del filamento.

En la Figura 3.11 la variabilidad de los resultados no permite concluir con eficacia los mismos, pero en todos los casos se aprecia que el material más rígido para todas las orientaciones es el ABS+CF seguido por el ABS y el ABS+CNT. Además, en general la rigidez de todos los especímenes de ABS y ABS+CNT supera el valor promedio de filamentos para todas las orientaciones.

Del mismo modo que para los ensayos de 0,2 mm, a partir de la Tabla 3.3 se elaboró un conjunto de graficas representadas de la Figura 3.12 a la Figura 3.16. En ellas se representa las curvas esfuerzo vs elongación para cada material en función a la orientación de capa de 90°, 0°, 45°, 0°/90° y 45°/-45°. Para la representación de las curvas se eligió los especímenes cuyos valores de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad se asemejen más al valor promedio de las mismas mostrados en la Tabla 3.3. Las líneas de color verde representan el ABS, las líneas de color rojo representan el ABS+CNT y las líneas azules representan el ABS+CF.

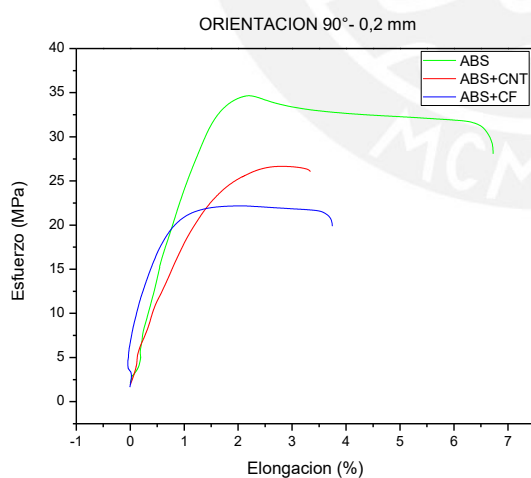


Figura 3.12. Esfuerzo vs Elongación 90°

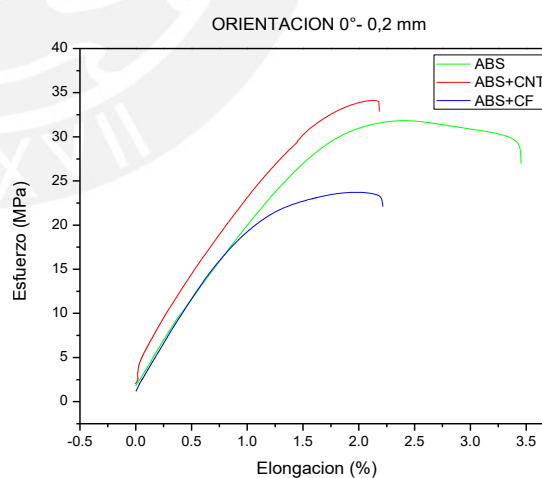


Figura 3.13. Esfuerzo vs Elongación 0°

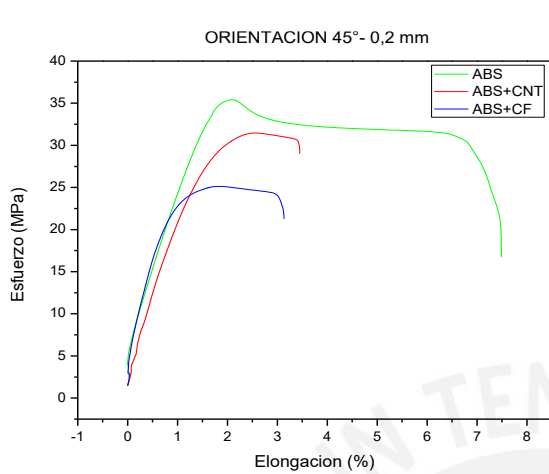


Figura 3.14. Esfuerzo vs Elongación 45°

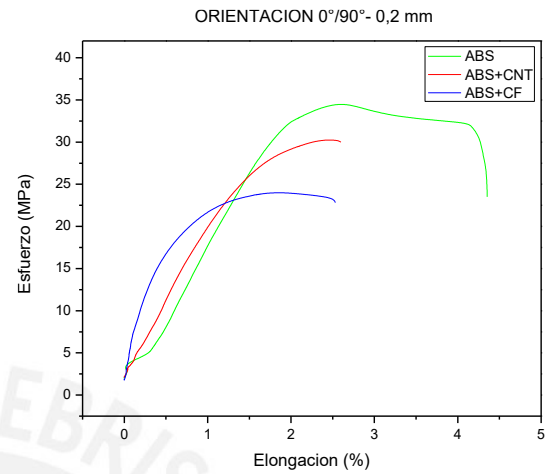


Figura 3.15. Esfuerzo vs Elongación 0°/90°

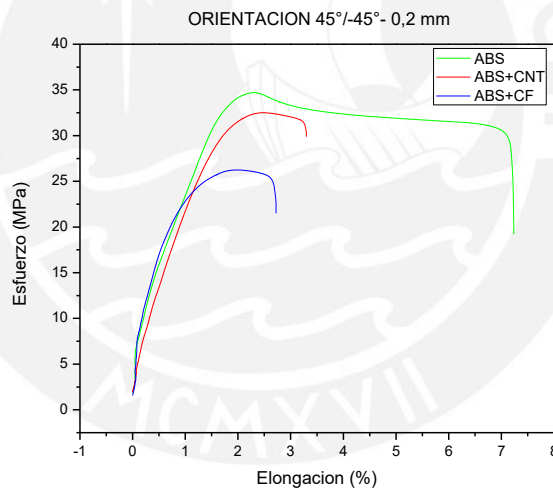


Figura 3.16. Esfuerzo vs Elongación 45°/-45°

Al comparar material por material en la Figura 3.13 se nota que para la orientación de 0° el ABS+CNT obtiene el esfuerzo máximo, esto puede estar relacionado a que la distribución de partículas de nanotubo de carbono es más eficiente en cuanto a resistencia para esta forma de deposición, esto es contrario a lo obtenido con altura de capa 0,4 mm donde para todas las orientaciones el esfuerzo máximo lo obtiene el ABS.

Además, en las gráficas se puede apreciar que contrariamente a los especímenes de ABS de 0,4 mm, los especímenes de 0,2 mm son más dúctiles ya que la zona de elongación plástica es mayor a la zona de elongación elástica. Del mismo modo, tanto para el ABS+CNT y ABS+CF, la zona de elongación plástica aumenta en comparación a las muestras de 0,4 mm, por lo que se concluye que las de 0,2 mm son menos frágiles. Cualquiera sea la orientación de capa los hilos rompen de manera conjunta. Esto se verá claramente más adelante en las capturas del SEM.

### 3.1.4 Resultado total de ensayos de tracción a especímenes de 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

Para una mejor interpretación de los resultados de los ensayos de tracción, en la Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19 se muestra el comparativo de los resultados de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad obtenidos de los ensayos de tracción de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,4mm y 0,2mm.

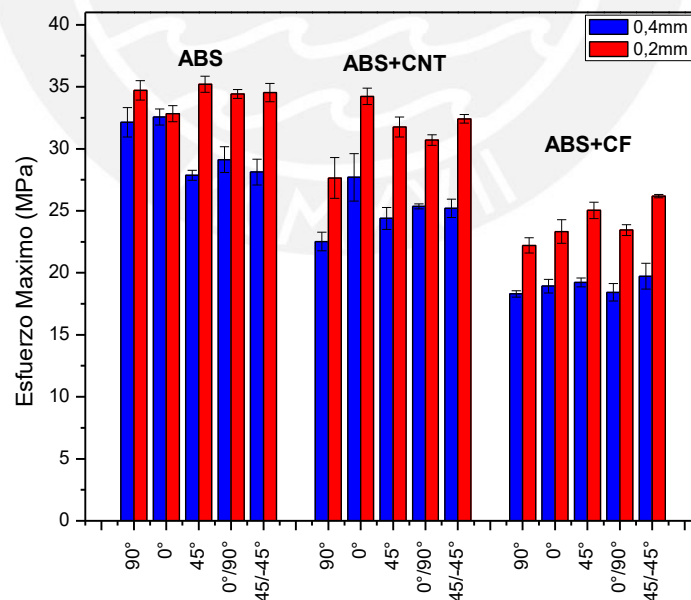


Figura 3.17. Resultados totales de esfuerzos máximos de ensayos de tracción de especímenes con 0,4 mm y 0, 2 mm de altura capa

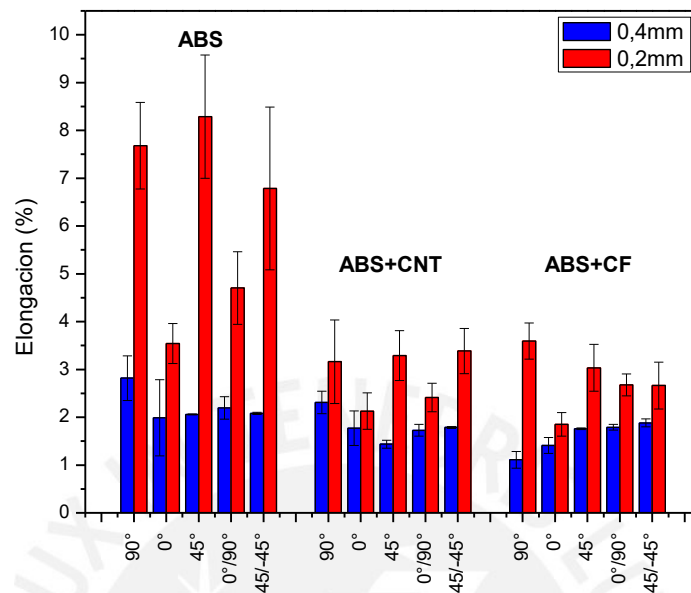


Figura 3.18. Resultados totales de porcentajes de elongación de ensayos de tracción de especímenes con 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

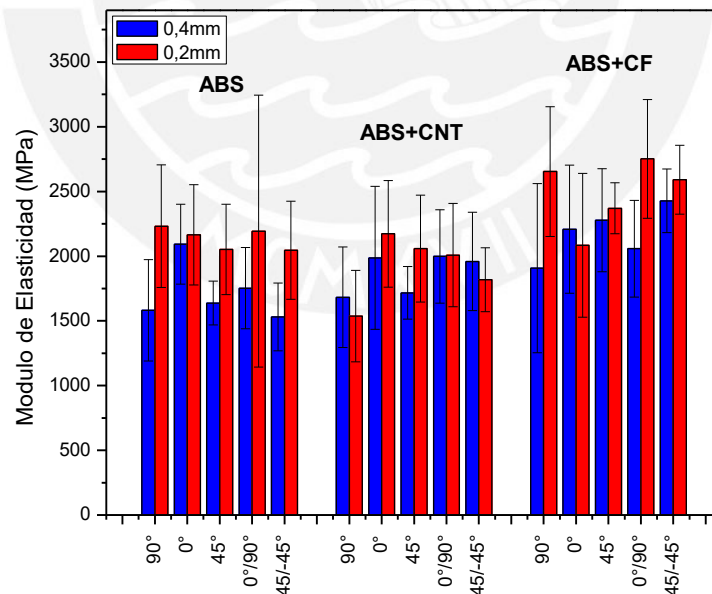


Figura 3.19. Resultados totales de módulo de elasticidad de ensayos de tracción de especímenes con 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

En la Figura 3.17 claramente se observa que la mayor resistencia se obtiene de los especímenes con 0,2 mm de altura de deposición en comparación con las de 0,4 mm. Ya



que al existir menor espacio entre líneas de deposición otorga una mejor adherencia entre estas, haciéndolas más resistentes. Además, se encontró que los mejores valores de resistencia para todos los materiales y orientaciones de deposición son  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ .

En la Figura 3.18 se puede observar que los especímenes con 0,2 mm de altura de deposición tienen un mayor porcentaje de elongación en comparación con las de 0,4 mm. A pesar de que los valores de los especímenes de 0,2 mm de ABS tienen mayor variabilidad que las de 0,4 mm esto no afecta en el resultado final ya que están muy encima del promedio de las de 0,4 mm. Además, se encontró los mejores valores de elongación para todos los materiales y orientaciones de deposición son  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ .

En la Figura 3.19 se puede observar que la variabilidad de los resultados de los módulos de tracción es alta, siendo imposible poder afirmar con exactitud cuál orientación y/o capa demuestra un mejor comportamiento; Sin embargo, los especímenes con altura de capa de 0,2 mm evidencian una conducta más rígida que las de 0,4 mm. Además, se muestra que las mejores orientaciones son  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  para el ABS;  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  para el ABS+CNT y  $90^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$  para el ABS+CF.

## **3.2 RESULTADOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN**

Para el registro de datos se empleó una computadora con un software de adquisición de datos que forma parte de máquina de tracción universal. Este software registra valores de fuerza e incremento de longitud producidas durante el ensayo.

### **3.2.1 Resultado de ensayos de flexión a especímenes de 0,4 mm de altura de capa**

En la Tabla 3.4 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de flexión de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,4 mm, además se añade los valores promedios de densidad de todas las muestras.

Tabla 3.4. Resultados promedio de esfuerzo máximo, deformación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de flexión 0,4 mm

Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
90°	ABS	55,24	5,43	1599,63	0,95
	ABS+CNT	42,99	4,20	1425,42	0,92
	ABS+CF	35,52	4,51	1309,50	0,87
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°	ABS	57,96	5,74	1553,93	0,94
	ABS+CNT	52,24	4,75	1682,65	0,93
	ABS+CF	41,18	4,19	1753,37	0,77
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°	ABS	56,59	6,08	1471,75	0,94
	ABS+CNT	49,78	4,92	1526,69	0,94
	ABS+CF	41,20	4,90	1562,49	0,86
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°/90°	ABS	52,51	5,64	1483,89	0,90
	ABS+CNT	43,14	4,72	1287,23	0,87
	ABS+CF	36,25	4,21	1522,49	0,80
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°/-45°	ABS	50,70	6,07	1402,75	0,91
	ABS+CNT	46,05	5,51	1462,77	0,87
	ABS+CF	38,51	4,62	1502,70	0,84

A partir de la Tabla 3.4 se elaboró un conjunto de gráficas presentadas de la Figura 3.20 a la Figura 3.22. En ellas se presentan los valores promedios de esfuerzos de flexión

máximos, porcentajes de elongación y módulos de elasticidad, por orientación de capa de cada material usado para la investigación. El color verde representa el material ABS, el color rojo representa el material ABS+CNT y el color azul representa el material ABS+CF.

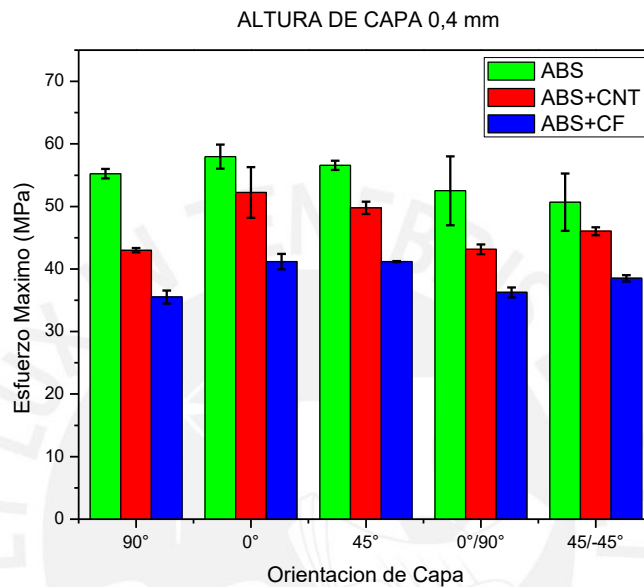


Figura 3.20. Diferencias entre esfuerzos promedio máximos por orientación de capa y material

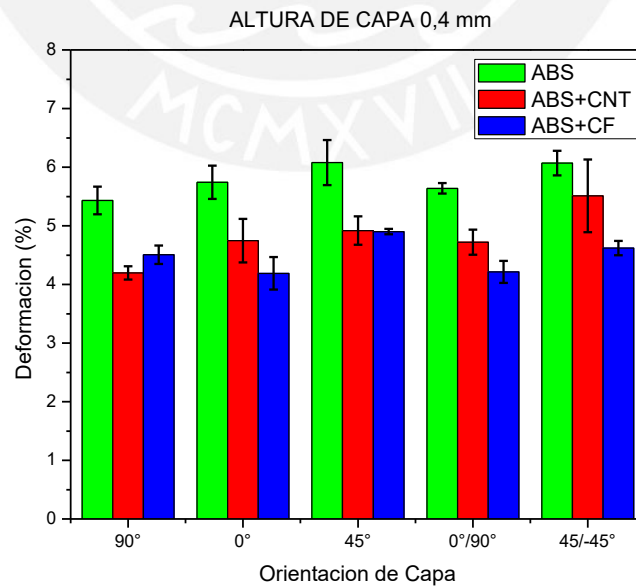


Figura 3.21. Diferencias entre deformaciones promedio por orientación de capa y material

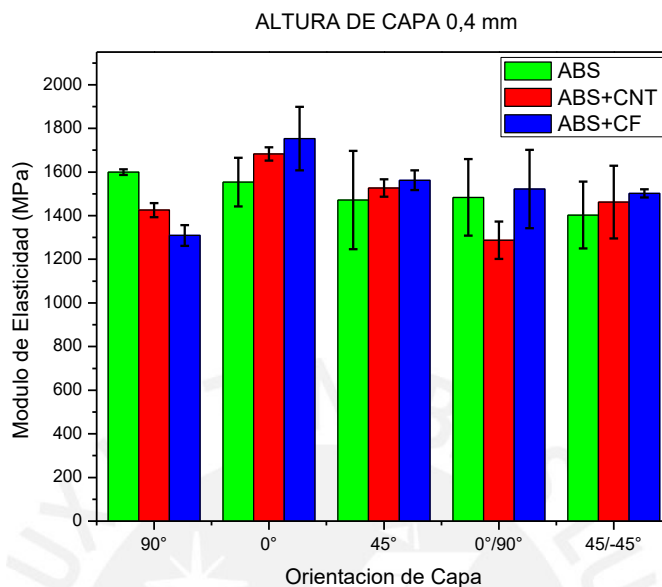


Figura 3.22. Diferencias entre módulos de elasticidad promedio por orientación de capa y material

En la gráfica 3.20 se aprecia que el material que logra alcanzar la mayor resistencia a la flexión es el ABS, seguido por el ABS+CNT y ABS+CF, aduciendo que los materiales compuestos son menos resistentes al esfuerzo de flexión. Además, las mejores orientaciones de impresión son 0°, 45° y 45°/-45°. Resultado esperado pues estas orientaciones al tener hilos más largos unidos entre sí soportan una mayor carga perpendicular a ellos. Además, para la orientación 0° y 45° el compuesto ABS+CNT alcanza valores de resistencia a la flexión del ABS.

En la gráfica 3.22 se aprecia que los resultados tienen algo de variabilidad, producidos tal vez por algún deslizamiento de los especímenes al momento de los ensayos. Además, los materiales compuestos son más rígidos que el polimérico. En este caso el material más rígido es el ABS+CF seguido por el ABS+CNT y finalmente el ABS.

También, a partir de la Tabla 3.4 se elaboró un conjunto de gráficas representadas de la Figura 3.23 a la Figura 3.27. En ellas se representan las curvas esfuerzo vs elongación para cada material en función a la orientación de capa de 90°, 0°, 45°, 0°/90° y 45°/-45°. Para la representación de las curvas se eligió los especímenes cuyos valores de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad se asemejen más al valor promedio de las mismas

mostrados en la Tabla 16. Las líneas de color verde representan el ABS, las líneas de color rojo representan el ABS+CNT y las líneas azules representan el ABS+CF.

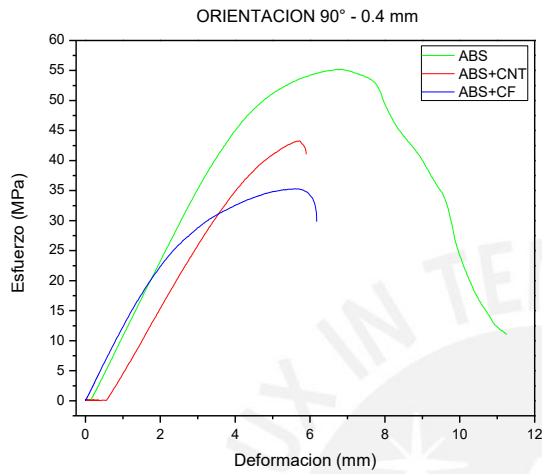


Figura 3.23. Esfuerzo vs Deformación 90°

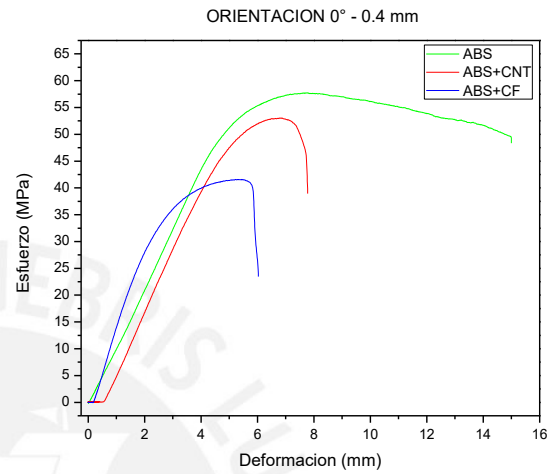


Figura 3.24. Esfuerzo vs Deformación 0°

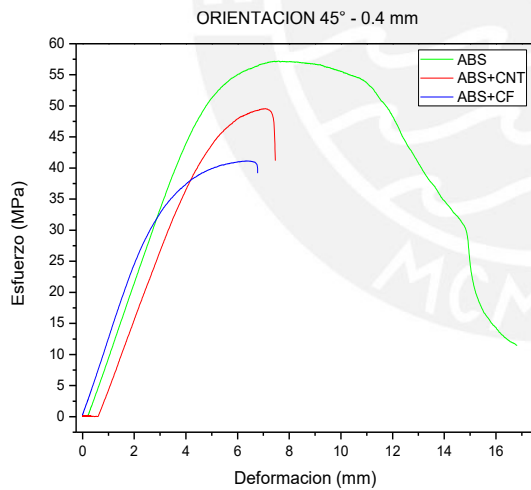


Figura 3.25. Esfuerzo vs Deformación 45°

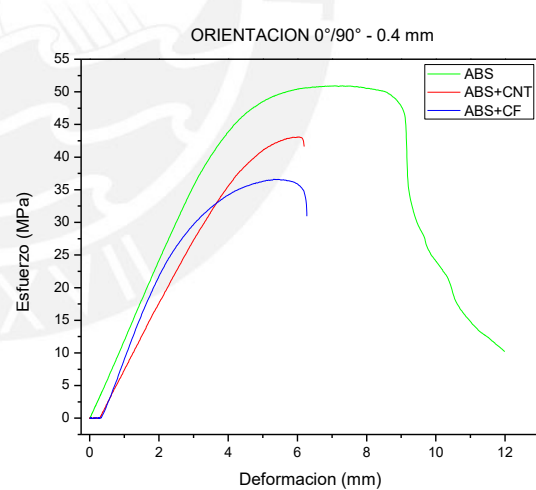


Figura 3.26. Esfuerzo vs Deformación 0°/90°

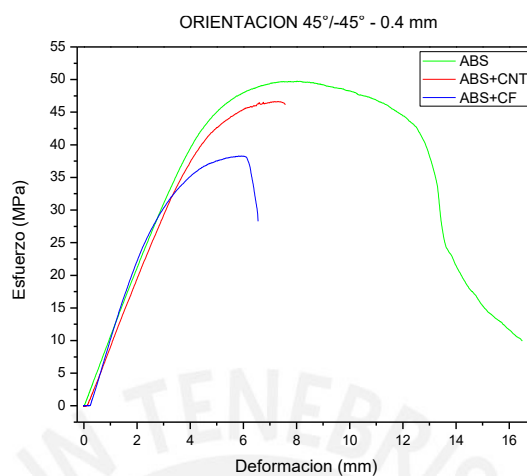


Figura 3.27. Esfuerzo vs Deformación 45°/-45°

En general de la Figura 3.23 a la Figura 3.27 se aprecia que el máximo esfuerzo de flexión para todas las orientaciones se encuentra en el ABS. Además, la zona de deformación plástica en los materiales compuestos es muy pequeña o nula en comparación al polimérico demostrando que el ABS+CF y el ABS+CNT son materiales frágiles y rígidos.

### 3.2.2 Resultado de ensayos de flexión a especímenes de 0,2 mm de altura de capa

En la Tabla 3.5 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de flexión de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,2 mm, además se añade los valores promedio de densidad de todas las muestras.

Tabla 3.5. Resultados promedio de esfuerzo máximo, deformación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de flexión 0,2 mm

Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
90°	ABS	57,61	6,47	1688,77	0,97
	ABS+CF	49,41	5,03	2024,52	0,97
	ABS+CNT	42,82	4,83	1290,55	0,93

Tabla 3.5. Continuación resultados promedio de esfuerzo máximo, deformación, módulo de elasticidad y densidad de las muestras de flexión 0,2 mm

Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°	ABS	65,45	5,93	1841,15	0,95
	ABS+CNT	57,44	5,99	1702,82	0,93
	ABS+CF	52,10	3,78	2732,38	0,92
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°	ABS	62,32	5,98	1833,30	0,98
	ABS+CNT	50,54	4,45	1603,31	0,94
	ABS+CF	54,00	5,22	2053,63	0,97
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
0°/90°	ABS	57,30	6,27	1687,75	0,97
	ABS+CNT	51,76	4,59	1603,23	0,87
	ABS+CF	50,67	5,17	2358,15	0,94
Orientación	Material	$\sigma_{fM}$ promedio	$\varepsilon_f$ promedio	$E_B$ promedio	$\rho$ promedio
		MPa	%	MPa	g/cm <sup>3</sup>
45°/-45°	ABS	60,37	6,08	1757,20	0,97
	ABS+CNT	54,12	5,12	1629,86	0,96
	ABS+CF	55,28	5,42	2326,90	0,97

De igual manera que en el caso de los resultados de los ensayos de flexión con altura de capa 0,4 mm, a partir de la Tabla 3.5 se elaboró un conjunto de gráficas para los resultados de altura de capa 0,2 mm presentados en la Figura 3.28 y 3.30.

En ellas se presentan los valores promedios de esfuerzos de flexión máximos, deformación y módulos de elasticidad, por orientación de capa de cada material usado para la investigación. El color verde representa el material ABS, el color rojo representa el material ABS+CNT y el color azul representa el material ABS+CF.

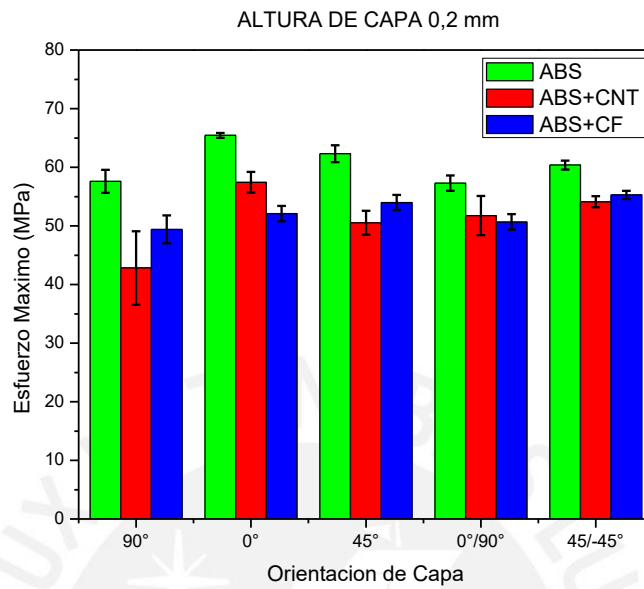


Figura 3.28. Diferencias entre esfuerzos promedios máximos por orientación de capa y material

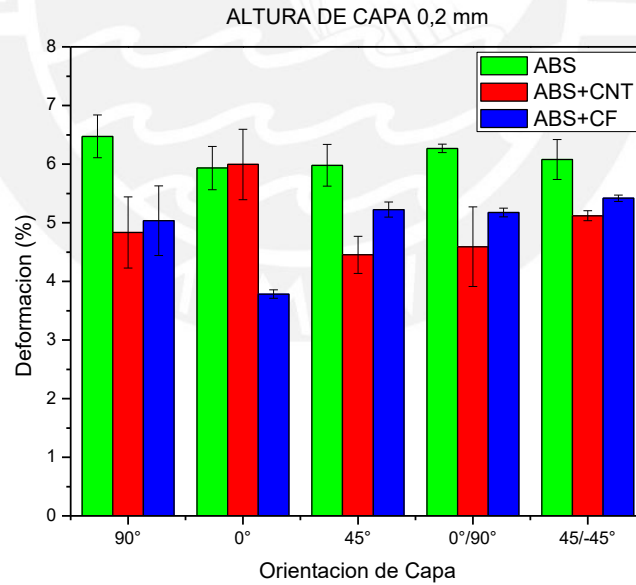


Figura 3.29. Diferencias entre deformación máxima promedio por orientación de capa y material



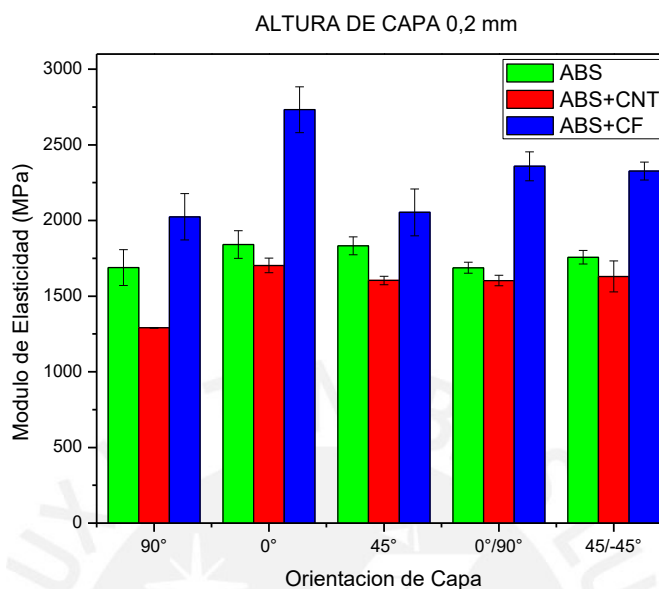


Figura 3.30. Diferencias entre módulos de elasticidad promedio por orientación de capa y material

En la Figura 3.28 se puede observar que al igual que en los especímenes de altura de capa 0,2 mm, en los especímenes de 0,4 mm el material con más resistencia a la flexión para todas las orientaciones de capa es el ABS, pero en este caso el valor de resistencia máxima a la flexión entre el ABS+CF y el ABS+CNT se puede considerar similar. El mayor beneficiado en la reducción de la altura de capa a 0,2 mm es el ABS+CF donde en comparación a las muestras de altura de capa de 0,4 mm se ve un gran aumento en el esfuerzo máximo a la flexión.

En la Figura 3.30 se puede observar un gran salto en la rigidez del ABS+CF aumentando hasta en un 65 % respecto a la altura de capa 0,4 mm en la orientación 0°. Para todas las orientaciones de deposición el mejor resultado es el de ABS+CF. En cuanto al ABS y el ABS+CNT el aumento es mínimo. Entonces se puede decir que el mejor material con altura de capa de 0,2 mm es el ABS+CF, ya que soporta un alto valor de carga flexionante con alto módulo de elasticidad.

También, a partir de la Tabla 3.5 se elaboró un conjunto de graficas representadas de la Figura 3.31 a la Figura 3.35. En ellas se representa las curvas esfuerzo vs elongación para cada material en función a la orientación de capa de 90°, 0°, 45°, 0°/90° y 45°/-45°. Para la

representación de las curvas se eligió las muestras cuyos valores de esfuerzo máximo, deformación y módulo de elasticidad se asemejen más al valor promedio de las mismas mostrados en la Tabla 3.5. Las líneas de color verde representan el ABS, las líneas de color rojo representan el ABS+CNT y las líneas azules representan el ABS+CF.

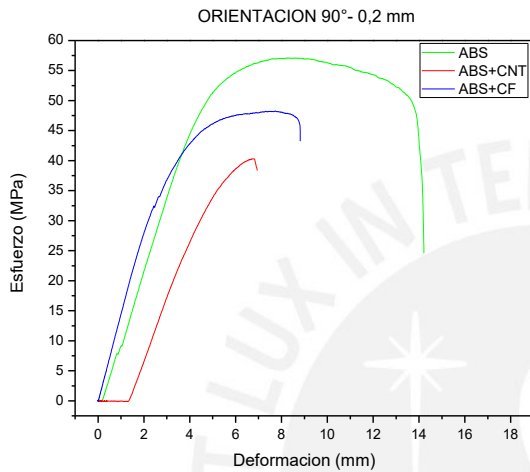


Figura 3.31. Esfuerzo vs Deformación 90°

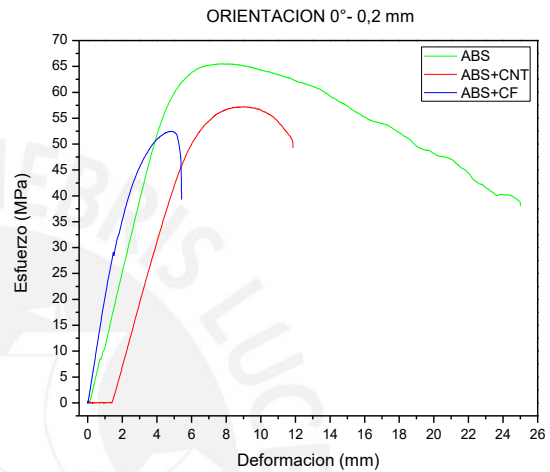


Figura 3.32. Esfuerzo vs Deformación 0°

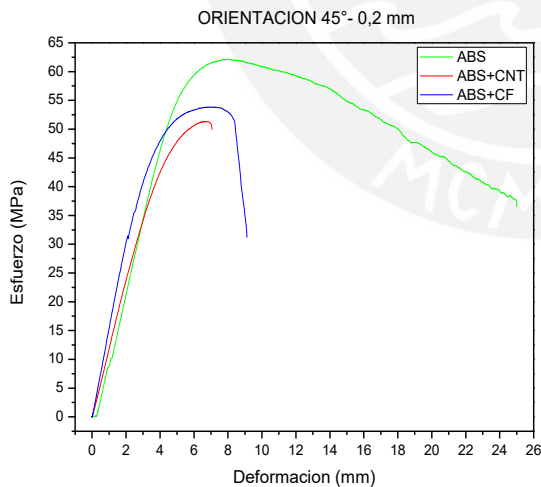


Figura 3.33. Esfuerzo vs Deformación 45°

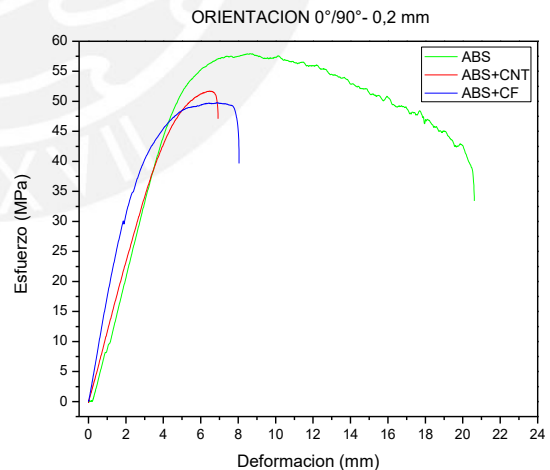


Figura 3.34. Esfuerzo vs Deformación 0°/90°

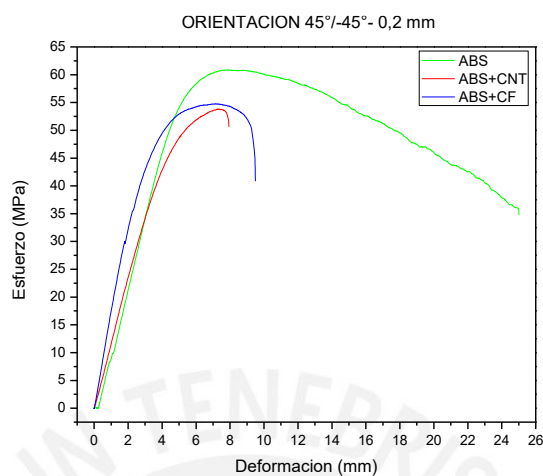


Figura 3.35. Esfuerzo vs Deformación 45°/-45°

Se aprecia que para todas las orientaciones de capa el material que soporta un mayor esfuerzo flexionante es el ABS. En la Figura 3.34 se observa un comportamiento irregular zigzagueante en la curva del ABS, esto se produce porque los hilos del material van rompiendo poco a poco aguantando la fuerza para luego fallar por completo.

Además, los máximos valores de carga flexionante se obtienen para las orientaciones de deposición de 0°, 45° y 45°/-45° y para todos los materiales el menor esfuerzo se obtiene con la orientación de 90°, esto se debe a que los hilos que conforman el espécimen son más cortos para soportar la carga generada por el punzón de la máquina.

### 3.2.3 Resultado total de ensayos de flexión a especímenes de 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

Para una mejor interpretación de los resultados de los ensayos de flexión, en la Figura 3.36, Figura 3.37 y Figura 3.38 se muestra el comparativo de los resultados de esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad obtenidos de los ensayos de flexión de las muestras de ABS, ABS + CNT y ABS + CF con altura de capa 0,4mm y 0,2mm.

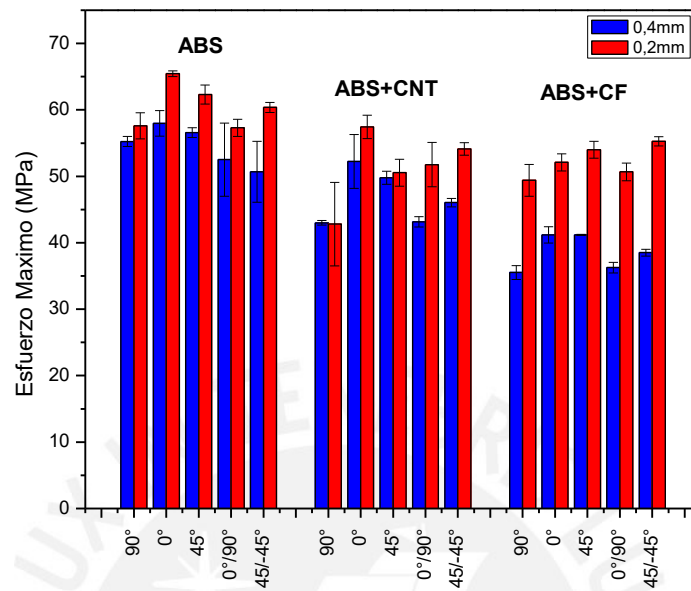


Figura 3.36. Resultados totales de esfuerzos máximos de ensayos de flexión de especímenes con 0,4 mm y 0,2 mm de altura capa

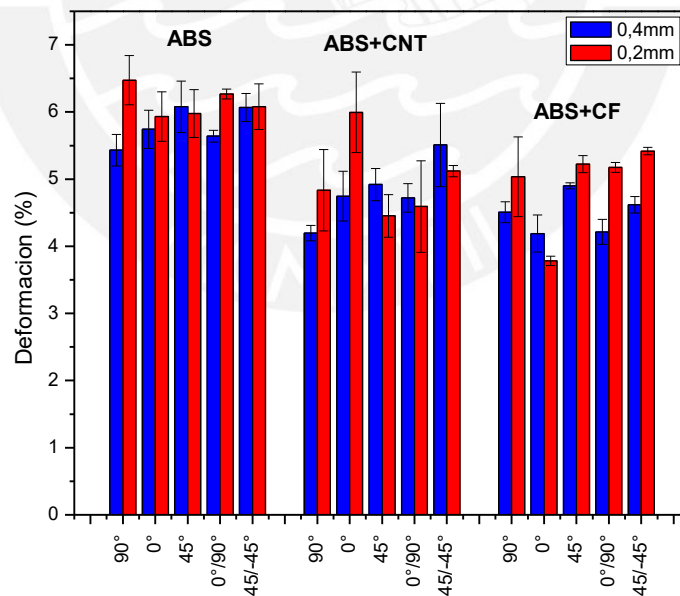


Figura 3.37. Resultados totales de porcentajes de elongación de ensayos de flexión de especímenes con 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

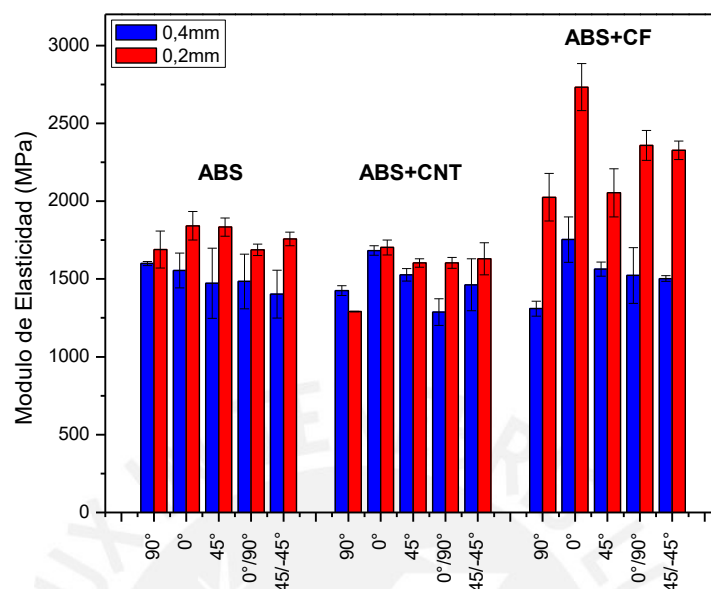


Figura 3.38. Resultados totales de módulo de elasticidad de ensayos de flexión de especímenes con 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa

En la Figura 3.36 se observa que la mayor resistencia se obtiene de los especímenes con 0,2 mm de altura de deposición en comparación con las de 0,4 mm. También se muestra que el ABS+CNT y el ABS+CF ejercen menor resistencia a la flexión que el ABS aduciendo una deficiente unión entre matriz y aditivo. Además, los mejores valores de resistencia para todas las orientaciones y materiales son 0°, 45° y 45°/-45°.

En la Figura 3.37 se puede observar que los especímenes con 0,2 mm tienen un leve porcentaje de elongación mayor en comparación con las de 0,4 mm. En este caso, los resultados no tienen tanta variabilidad en comparación con los especímenes de tracción aduciendo que la estructura interna de los materiales fabricados por FDM tiene un comportamiento más uniforme para este tipo de cargas.

En la Figura 3.38 se puede observar que la variabilidad de los resultados de los módulos en flexión es media, manteniendo los valores en torno a los resultados de los ensayos de tracción, siendo el ABS+CF los de mayor rigidez, seguidos por el ABS+CNT y ABS. Sin embargo, los especímenes con altura de capa de 0,2 mm evidencian una conducta más rígida que las de 0,4 mm.

### 3.3 RESULTADOS DE ANALISIS DE MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE BARRIDO

Para el análisis SEM se seleccionaron tres muestras de cada material con 0,2 mm de altura de capa, en total 9 nueve especímenes, para su análisis estructural con microscopía electrónica de barrido, SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Se eligieron las tres muestras con mejores propiedades mecánicas durante los ensayos de tracción, en este caso una de orientación 0°, otra de 45° y otra de 45°/-45° por cada material. Para el ABS las muestras elegidas fueron la A6, A12 y A23. Para el ABS+CNT las muestras elegidas fueron la N9, N19 y N23, finalmente las muestras de ABS+CF elegidas fueron la C8, C14 y C21.

Primero se realizaron tomas de la superficie de fractura con aumentos de 50x de los tres materiales.

En la Figura 3.39 se aprecia que la zona de fractura del ABS tiene una superficie plana muy compacta donde se puede diferenciar las capas de deposición con pequeñas porosidades que pueden ser espacios entre capas. Además, se puede ver la trayectoria de la línea de rotura que cruza por medio de la superficie.

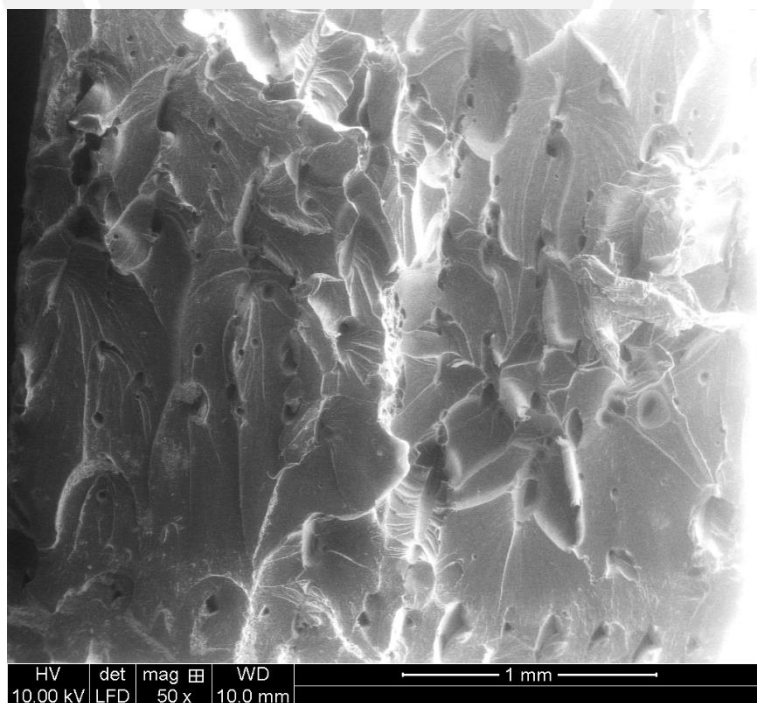


Figura 3.39. SEM de la superficie de fractura de ABS 50x

En la Figura 3.40 se observa que la zona de fractura del ABS+CNT no tiene una superficie plana. Tiene un relieve escarpado compacto que no presenta muchas porosidades, aduciendo una buena adherencia entre el nanotubo y la matriz polimérica.

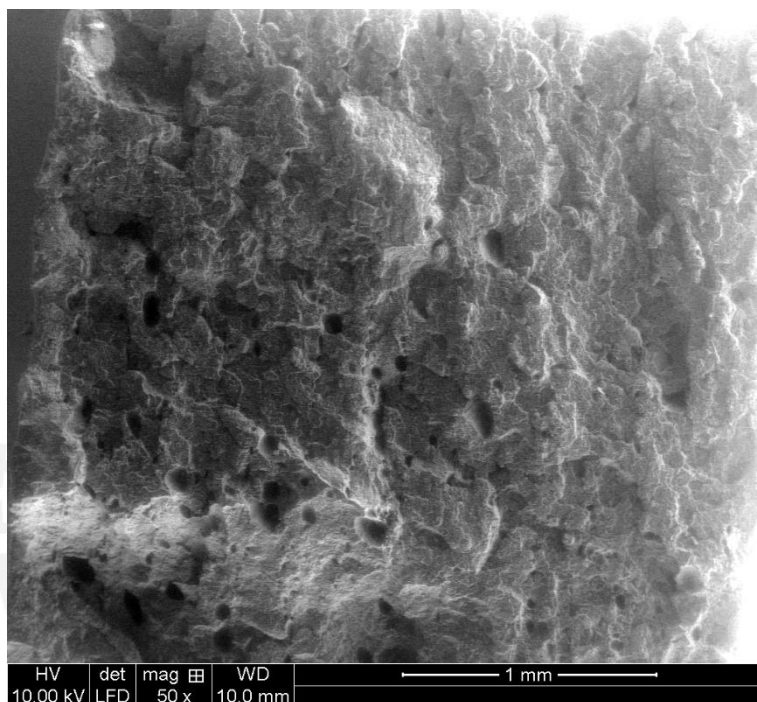


Figura 3.40. SEM de la superficie de fractura de ABS+CNT 50x

En la Figura 3.41 se puede observar que en el interior de la zona de fractura del ABS+CF, en las líneas de deposición o capas, existen varias porosidades. Estas porosidades podrían ser generadas por las fibras de carbono embebidas que no se adhieren de manera correcta a la matriz polimérica.

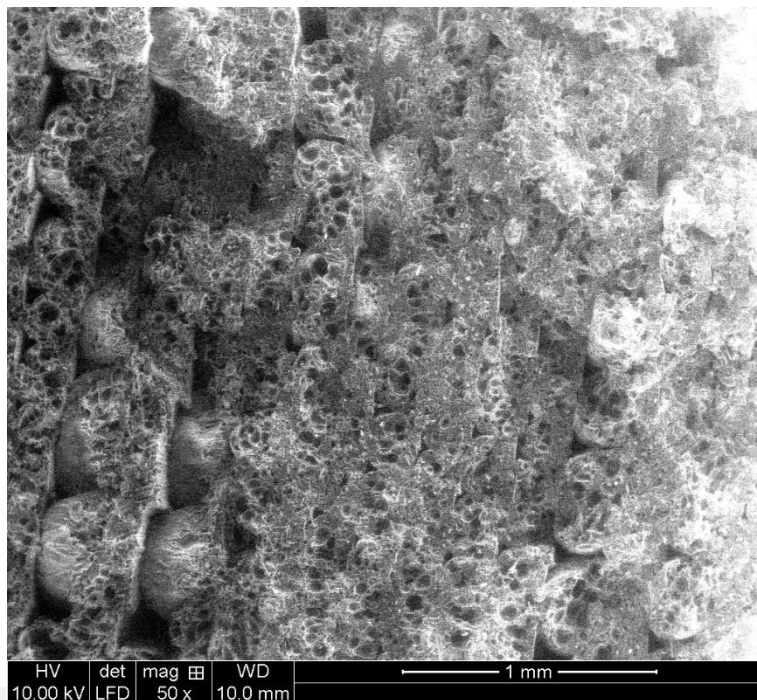


Figura 3.41. SEM de la superficie de fractura de ABS+CF 50x

Finalmente, para una mejor apreciación de la superficie de fractura y tener una idea más clara del comportamiento de los aditivos dentro de los materiales compuestos fabricados se realizaron tomas de la superficie de fractura con aumentos de 800x.

En la Figura 3.42 se observa lo que presumiblemente son aglomeraciones de nanotubos que dan un aspecto granulado a la superficie de fractura del ABS+CNT. A esta magnificación todavía es imposible observar cómo están embebidas las nanopartículas dentro de la matriz polimérica. Pero al parecer los nanotubos al ser partículas más pequeñas que la fibra de carbono se embeben mejor dentro de la matriz, lo que otorga una mejor transmisión de carga, de matriz a refuerzo, a la probeta durante los ensayos de tracción.



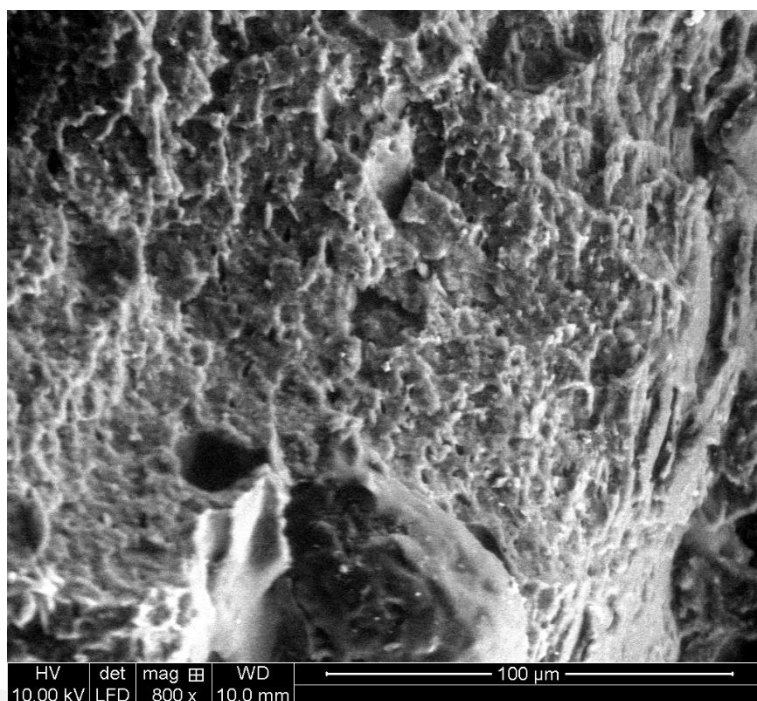


Figura 3.42. SEM de la superficie de fractura de ABS+CF 800x

Caso contrario en la Figura 3.43 se aprecia claramente la disposición aleatoria de las fibras de carbono en la matriz polimérica.

Estas tienen un tamaño uniforme y se observa que entre las fibras de carbono y la matriz polimérica existen espacios. Esta mala adherencia forma porosidades en el material y esa puede ser una de las razones del porque el material compuesto ABS+CF solo aumenta su rigidez, propia del refuerzo de fibra de carbono, pero no aumenta la resistencia cuando este es sometido a cargas por la mala distribución de esfuerzo de la matriz a la fibra.

Se puede deducir que mientras mayor cantidad de porcentaje de fibra de carbono tenga el compuesto menor será su resistencia ya que existirán más porosidades entre matriz y refuerzo haciendo más débil al espécimen.

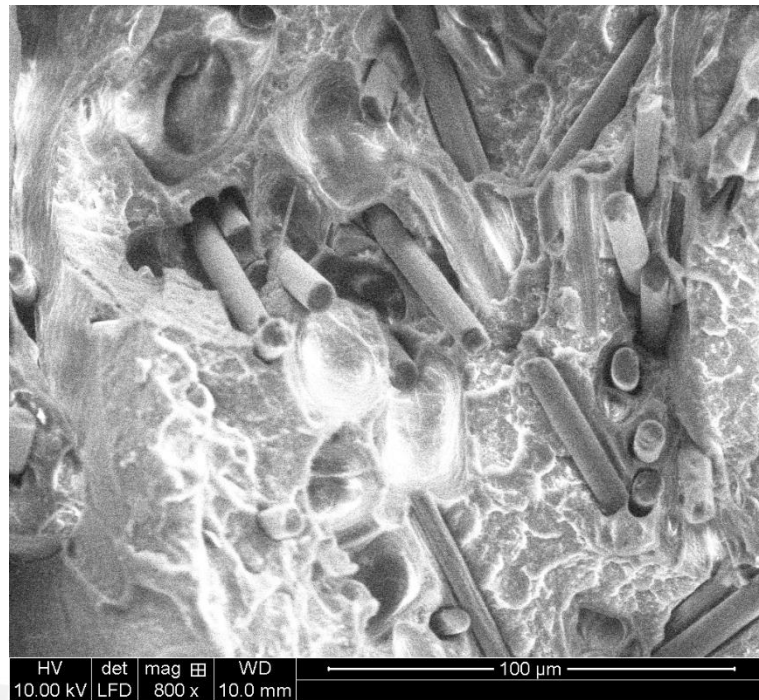
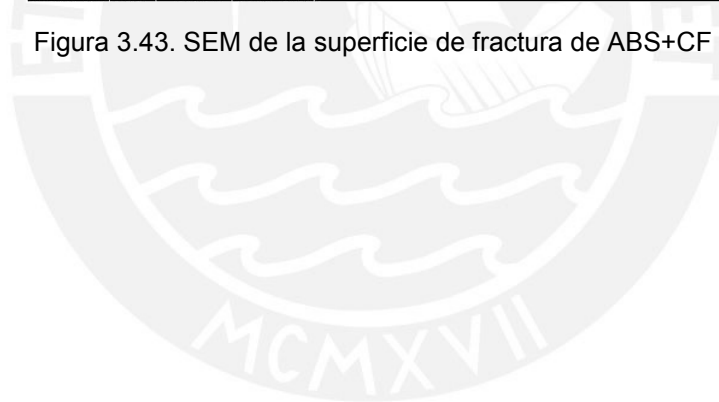


Figura 3.43. SEM de la superficie de fractura de ABS+CF 800x





## CAPITULO 4

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

##### ***Comparación de resultados obtenidos de los ensayos a filamentos y especímenes impresos***

- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,4 mm respecto a los filamentos la fabricación mediante impresión 3D produce que se pierda resistencia a la tracción en el ABS, ABS+CNT y ABS+CF, ductilidad en el caso del ABS y rigidez en el caso del ABS+CF.
- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,2 mm se puede considerar una resistencia a la tracción muy similar a la del filamento, se pierde un poco de resistencia en el ABS+CF, se gana ductilidad en el ABS, ABS+CNT y ABS+CF para

casi todas las orientaciones de capa (menos  $0^\circ$ ), y también aumenta la rigidez en el ABS y ABS+CF dado que aumenta el módulo de elasticidad.

***Comparación de resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la tracción entre especímenes compuestos y polimérico***

- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,4 mm se obtiene que los compuestos ABS+CF y ABS+CF tienen una menor resistencia a la tracción y ductilidad respecto al ABS en todas las orientaciones de deposición, siendo las mejores  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Por otro lado, incrementa la rigidez tanto del ABS+CF y ABS+CF respecto al ABS para todas las orientaciones de deposición, en especial  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ .
- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,2 mm se obtiene un valor de resistencia máxima a la tracción casi similar entre el ABS+CF y ABS, y una disminución de la resistencia entre el ABS+CF y el ABS en todas las orientaciones de deposición, siendo las mejores  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Además, se produce una disminución de ductilidad, pero un aumento de la rigidez en el ABS+CF respecto al ABS para todas las orientaciones.

***Comparación de resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la flexión entre especímenes compuestos y polimérico***

- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,4 mm se obtiene una disminución de la resistencia a la flexión del ABS+CF y del ABS+CF en mayor proporción respecto al ABS para todas las orientaciones de deposición, siendo las mejores  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Además, incrementa la rigidez de los materiales compuestos ABS+CF y ABS+CF respecto al ABS en las orientaciones  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ .
- Para especímenes fabricados con altura de capa de 0,2 mm se obtiene valores de resistencia a la flexión menores del ABS+CF y ABS+CF en comparación al ABS,

siendo las mejores orientaciones de deposición  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Además, se produce un aumento en la rigidez del ABS+CF para todas las orientaciones, en especial para las orientaciones de  $0^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ .

***Comparación de resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la tracción y flexión entre especímenes de 0,4 mm y 0,2 mm de altura de capa***

- Los especímenes fabricados con altura de capa de 0,2 mm tienen mayor resistencia que los de altura de capa de 0,4 mm, Esto se puede deber a que al existir menor espacio entre líneas de deposición otorga una mejor adherencia entre capas haciéndolas más resistentes.
- Para todos los resultados de los ensayos de tracción y flexión las orientaciones de deposición más favorables para la fabricación de especímenes fueron  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Esto se puede deber a que al tener una mayor longitud de capa depositada ejerce una mejor distribución de carga en los especímenes al momento de aplicar una fuerza sobre estos.
- Los resultados de los ensayos de flexión tienen menor variabilidad que los ensayos de tracción aduciendo que la estructura interna de los materiales fabricados por FDM tiene un comportamiento más uniforme para cargas flexionantes.

***Comparación entre densidades de especímenes fabricados con 0,2 mm y 0,4 mm de altura de capa***

- La densidad promedio de las muestras de altura de capa de 0,4 es menor que la de las muestras de 0,2 de altura de capa ( $0.91 \text{ g/cm}^3$  y  $0.97 \text{ g/cm}^3$ ). Esto se debe a que el espacio que existe entre capas de deposición es mayor, por ende, la muestra queda con más porosidades y cavidades. Esto se ve reflejado en el valor de resistencia máxima y elongación de cada material.
- Aunque exista una diferencia de densidades entre los materiales fabricados con altura de capa de 0,2 mm y 0,4 mm, esta no es considerable en comparación al

significativo aumento de rigidez sin la disminución de resistencia que adquieren los materiales compuestos. Esto puede ser muy beneficioso en la industria automotriz para la fabricación de autopartes que trabajen dentro de los valores de resistencia establecida, donde es muy conocido buscar disminuir el peso de los componentes de automóviles, pues esto se verá reflejado en un menor consumo de combustible y desgaste de neumáticos.

### ***Análisis de ensayos de microscopía electrónica de barrido***

- Del análisis en SEM se aprecia que los nanotubos al ser más pequeños que las fibras de carbono, se embeben en la matriz más fácilmente durante la solidificación. En cambio, las fibras de carbono al ser partículas más grandes dificultan una correcta adhesión en la matriz durante la solidificación. Esta puede ser una de las explicaciones del porque al momento de fabricar las piezas por FDM la resistencia del ABS+CF es menor.
- Del análisis en SEM se deduce que en el compuesto ABS+CF no existe una correcta adherencia entre las fibras de carbono y la matriz polimérica, sugiriendo que si no hay una correcta adherencia no se percibe el efecto del refuerzo de la fibra en el compuesto. Esta mala adherencia forma porosidades en el material y esa puede ser una de las razones del porque no aumenta la resistencia del compuesto ABS+CF al fabricar los especímenes. Además, se puede deducir que cuando mayor porcentaje de fibras de carbono tenga el compuesto menor será su resistencia ya que existirán más porosidades entre matriz y refuerzo haciendo más débil al espécimen.
- Durante el análisis SEM no se pudo llegar a un aumento mayor a 800X, ya que a mayor aumento existe una mayor temperatura y el espécimen polimérico se puede quemar.

### **Generales**

- Se fabricaron materiales compuestos mediante impresión 3D con matriz de ABS reforzados con nanotubos de carbono y fibra de carbono, a partir de filamentos de impresión 3D comerciales.
- Los resultados de los ensayos de tracción y flexión no son los esperados pues la resistencia máxima de los materiales compuestos fabricados mediante tecnología FDM de impresión 3D disminuye respecto al material polimérico. Es muy probable que estas propiedades mecánicas esperadas no se logran obtener debido a la mala adherencia entre el material base y los aditivos, esto se logra ver en las imágenes obtenidas mediante el SEM. Esto puede ocurrir debido a que el proceso de FDM altere el ordenamiento estructural y la interacción entre hilos y capas de los materiales compuestos. Otra posibilidad del porque no aumentan las propiedades mecánicas de los materiales impresos es que la humedad se introduce del filamento y crea burbujas interiores que debilitan la adherencia de los refuerzos.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

- La impresora 3D Makerbot de tecnología FDM usada en la investigación es compatible con el código G del software Makerbot y Simplify3D, ambos programas son amigables y fáciles de usar, pero en nuestro caso se utilizó el simplify3D porque ofrece un mayor control de los parámetros de impresión, así como una mejor apreciación óptica del elemento a fabricar como del entorno virtual de la impresora.
- Al momento de fabricar los especímenes se debe tomar en cuenta la temperatura del extrusor para evitar una mala fusión entre capas o que estas se quemen, pues no todos los materiales se extruyen a la misma temperatura, Así como también a temperatura de la cama de deposición. Se recomienda seguir las recomendaciones de los proveedores de los filamentos, de este modo se evitó futuros inconvenientes.

- Los extrusores de la impresora 3D Makerbot es propensa a obstruirse, por ello se recomienda efectuar una limpieza continua. Por la experiencia adquirida al realizar esta investigación se sugiere hacer una limpieza interna del cabezal extrusor al finalizar un día de trabajo, que en mi caso era de 3 horas. Esto se puede realizar introduciendo un filamento metálico delgado por la boquilla del extrusor o destapando el cabezal extrusor.
- Verificar que la mesa de deposición se encuentre debidamente nivelada, separado al menos 1 mm de la punta del extrusor en todas las zonas de la mesa. De esta manera se garantiza que al momento de fabricar la muestra este no tenga problemas en la deposición del material.
- Antes de comenzar con la impresión se recomienda el uso de cinta *masking tape* sobre la cama de deposición, así se puede evitar el *warping* y fue más fácil el retiro de la muestra.
- Una vez fabricada las muestras realizar una inspección visual antes de realizar los ensayos mecánicos con la finalidad de no ensayar las que se encuentren en mal estado. De este modo fabricar otra para su posterior reemplazo.
- Se recomienda realizar la investigación con muestras fabricadas con altura de capa de 0,1 mm para ver si se mantiene la tendencia de mejorar el esfuerzo a la tracción y a la flexión con las excelentes propiedades de rigidez de los materiales compuestos estudiados. Además, buscar nuevas orientaciones de deposición y nuevos aditivos que puedan mejorar la adherencia entre capas del material fundido.
- Se recomienda realizar la investigación con muestras fabricadas a menores porcentajes de relleno (70%, 80%, 90%) para determinar la variación de las propiedades mecánicas y así analizar si resulta conveniente o no gastar más o menos material al momento de la fabricación.



- Se recomienda hacer ensayos mecánicos adicionales a las ejecutadas en esta investigación. Además de realizar un análisis químico para tener los porcentajes de composición exacta de los materiales compuestos utilizados.
- Se recomienda realizar el análisis de las muestras de ABS+CNT en un SEM de mayor alcance como uno de emisión de campo para poder observar la disposición de las nanopartículas de carbono en la matriz polimérica.
- Se recomienda fabricar especímenes compuestos con refuerzos con fibras largas, verificar si efectivamente su resistencia es mayor a las de fibra corta al tener una mayor área de contacto para la transmisión de carga entre la matriz y refuerzo.
- Se recomienda fabricar especímenes compuestos con otra matriz polimérica como PLA, Nylon, PETT, PETG, etc. y comprobar el comportamiento de la matriz y refuerzo.
- Se espera que los resultados obtenidos en este estudio sobre caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica mediante FDM puedan ser empleados en futuras investigaciones.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Lipson, H., & Kurman, M. (2013). The new world of 3D printing.
- [2] Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M., & DEADLINE, N. (2013). Low--cost 3D printing for science, education and sustainable development. *Low-Cost 3D Printing*, 11.
- [3] Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C., & Rosen, D. W. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *Proceedings of RapidTech*, 24-25.
- [4] Joseph J. Beaman. (March 1997). Rapid Prototyping. Sitio web: [www.wtec.org](http://www.wtec.org)

- [5] Katie Jarve. (2015). History of 3D Printing. Sitio web: [www.thenextmegamachine.weebly.com](http://www.thenextmegamachine.weebly.com)
- [6] Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of machine tools and manufacture*, 38(10), 1257-1287.
- [7] Cotec, F. LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS.
- [8] Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- [9] Imprimiren3d. (Marzo 2014). UPrint SE Plus de Stratasys. Sitio web: [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com)
- [10] Barahona, E. A. T., Medina, J. X. L., & Díaz, E. T. (2012). Sistema de posicionamiento aplicado a la técnica de impresión 3D modelado por deposición fundida. *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 3(1), 25-32.
- [11] Fabian. (March 2015). How to Choose the Perfect File Resolution When Turning Your 3D Model into a 3D Print. Sitio web: [www.i.materialise.com](http://www.i.materialise.com)
- [12] Impresoras 3D. (2015). Impresoras 3D. Sitio web: [www.areatecnologia.com](http://www.areatecnologia.com)
- [13] Kentzer, J., Koch, B., Thiim, M., Jones, R. W., & Villumsen, E. (2011, May). An open source hardware-based mechatronics project: The replicating

- rapid 3-D printer. In Mechatronics (ICOM), 2011 4th International Conference On (pp. 1-8). IEEE.
- [14] Zhang, S. (2014). Location Analysis of 3D Printer Manufacturing Industry (Doctoral dissertation, Columbia University).
- [15] RepRap. (2014). RepRap Models. Sitio web: [www.reprap.org](http://www.reprap.org)
- [16] Anderson, C. (2012). The New MakerBot Replicator Might Just Change Your World. *Wired Magazine*.
- [17] Siim. (2015). Propiedades físicas y mecánicas materiales. Sitio web: [www.siim.com](http://www.siim.com)
- [18] Airwolf3D. (2012). Airwolf 3D printer gears, available in polycarbon. Sitio web: [www.airwolf3d.com](http://www.airwolf3d.com)
- [19] Noorani, R. (2006). *Rapid prototyping: Principles and applications*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons
- [20] Cabrera, F. M. (2004). Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles. *Técnica industrial*, 254.
- [21] Shofner, M. L., Rodriguez-Macias, F. J., Vaidyanathan, R., & Barrera, E. V. (2003). Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(12), 1207-1217
- [22] Alcca, F. (2005). Estructura y síntesis de nanotubos de carbono (Doctoral dissertation, Tesis Profesional).
- [23] Maubert, M., Soto, L., León, A. M., & Flores, J. (2009). Nanoturbo de carbono: La era de la nanotecnología. *Razón y palabra*, (68), 17.

- [24] Kumar, S., Doshi, H., Srinivasarao, M., Park, J. O., & Schiraldi, D. A. (2002). Fibers from polypropylene/nano carbon fiber composites. *Polymer*, 43(5), 1701-1703.
- [25] Carolina, L. U. (2011). Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario. *Metal Actual*, 23.
- [26] Tantaleán, L. F. (2014). Fibras de carbono: reforzamiento de estructuras. *Civilizate*, (3), 46-48.
- [27] De Volder, M. F., Tawfick, S. H., Baughman, R. H., & Hart, A. J. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*, 339(6119), 535-539.
- [28] Lilli Manolis Sherman. (2013). Fiber sizings: Coupling agent companions. Sitio web: [www.compositesworld.com](http://www.compositesworld.com)
- [29] 3dxtrech. (2015). ABS+Carbon Nanotube Filament. Sitio web: [www.3dxttech.com](http://www.3dxttech.com)
- [30] 3dxttech. (2016). Test data on carbon fiber filaments. Sitio web: [www.3dxttech.com](http://www.3dxttech.com)
- [31] Standard, A. S. T. M. (2010). D638: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken (PA): ASTM International.
- [32] Standard, A. S. T. M. (2010). D790 (2010) Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, West Conshohocken.
- [33] Hacks. (2012). Reprap: Print Replacement Parts for Household Items. Sitio web: [www.blog.lincomatic.com](http://www.blog.lincomatic.com)
- [34] Atenea. (2015). Fabricación piezas especiales. Sitio web: [www.ateneaing.cl](http://www.ateneaing.cl)

- [35] Relañó Pastor, A. (2013). Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida.
- [36] Stratasys comercializa una impresora para fibra de carbono. Sitio web: [www.imprimalia3d.com](http://www.imprimalia3d.com)

