

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL  
PERÚ**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE  
AMORTIGUAMIENTO DE MATERIALES  
FABRICADOS POR IMPRESIÓN 3D Y  
REFORZADOS CON NANOTUBOS Y FIBRAS DE  
CARBONO**

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller

**AUTOR:**

Jorge Eduardo Tapia Cabrera

**ASESOR:**

Francisco Aurelio Rumiche Zapata

Lima, Agosto 2019

## RESUMEN

La versatilidad que la tecnología de modelamiento por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés) presenta para la fabricación de componentes y piezas, no solo para fines decorativos sino para fines industriales, representa una nueva plataforma tecnológica para el desarrollo de nuevos materiales. En pos de tal avance, esta tesis busca describir empíricamente las relaciones entre los parámetros de fabricación por FDM y las propiedades de amortiguamiento de materiales nóveles para fines industriales en reducción de vibraciones, movimiento o sonido. En esta investigación se utilizarán dos materiales reforzados en una matriz de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el primero con refuerzos de nanotubos de carbono y segundo reforzado con fibras de carbono, de ahora en adelante “ABS + CNT” y “ABS + CF” respectivamente.

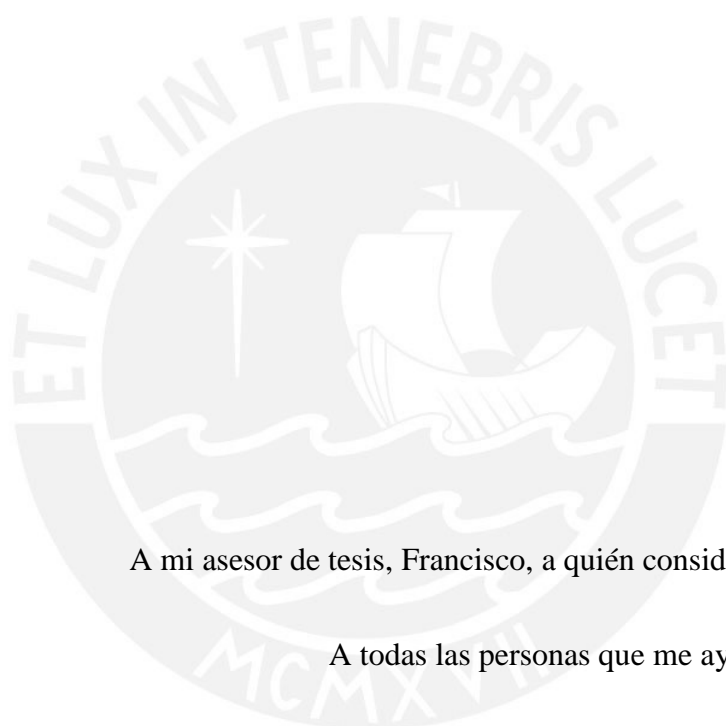
La redacción de este estudio comienza con una revisión de la literatura acerca la impresión 3D. Asimismo, se realiza una introducción a la teoría del amortiguamiento utilizada en este estudio. Se introducen los conceptos de *stick slip*, fuerzas de excitación, análisis de datos mediante transformadas de Fourier, método 3dB ancho de banda para el cálculo del ratio de amortiguamiento, y una recopilación de diversas investigaciones realizadas a materiales reforzados con nanotubos y fibras de carbono. Finalmente, se exponen las hipótesis centrales de este estudio.

El procedimiento experimental seguido en esta tesis contempló la impresión de las probetas en dos tipos de orientación: cruzada  $45^\circ$ -/ $45^\circ$  y unidireccional, en tres niveles de porcentaje de relleno, 100 %, 80 % y 60 %, para cada material. La selección de estos parámetros de impresión se realizó de acuerdo a las mejores propiedades mecánicas

obtenidas en investigaciones anteriores [1]. Luego, en el Laboratorio de Acústica de la sección de Física, se implementó un banco de ensayos de caracterización de amortiguamiento de material mediante método impacto. Finalmente, las probetas se caracterizaron mediante ensayos de tracción en el CITE Materiales PUCP.

De acuerdo a los ensayos realizado se concluye que los refuerzos de nanotubos de carbono en la matriz de ABS aumentan las capacidades de amortiguamiento del material. Sin embargo, las propiedades de amortiguamiento son inferiores a las de otros materiales utilizados en la industria de impresión 3D. Con respecto a los parámetros de impresión, se muestra la predominancia de la orientación cruzada por sobre la orientación unidireccional en propiedades de amortiguamiento y se sugiere una correlación entre la reducción de la densidad y el aumento de las propiedades de amortiguamiento en los materiales ensayados. Finalmente, se dan detalles acerca del proceso de fabricación de las probetas además de un análisis de las propiedades mecánicas en función de la densidad y de la orientación.

## AGRADECIMIENTO



A mi asesor de tesis, Francisco, a quién considero maestro y amigo.

A todas las personas que me ayudaron en esta labor,  
quienes me dieron ánimo y soporte para no abandonar esta tarea.

Finalmente, con mucho amor agradezco a mi familia: a mi mamá, que con su cariño y carácter me forjó hasta lo que soy; a mi papá, que con su esfuerzo me dio las herramientas de las que vivo; a mi hermano, que es mi compañero en esta vida y a Valentino cuyos ladridos, mientras redactaba esta tesis, jamás olvidaré.

Esto es para ustedes.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b>	<b>2</b>
1.1. MANUFACTURA ADITIVA	2
1.2. REFUERZOS DE MATERIALES	13
1.3. AMORTIGUAMIENTO EN MATERIALES REFORZADOS	16
1.4. MÉTODOS EXPERIMENTALES	24
1.5. HIPÓTESIS	27
<b>2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>30</b>
2.1. METODOLOGÍA	30
2.2. MATERIALES DE TRABAJO	31
2.3. IMPRESIÓN DE LAS PROBETAS	35
2.4. EVALUACIÓN DE LAS PROBETAS	42
2.5. ENSAYOS DE AMORTIGUAMIENTO	44
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.1. INSPECCIÓN MACROGRÁFICA	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.2. DENSIDAD APARENTE	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.3. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.4. ENSAYO DE AMORTIGUAMIENTO	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y AMORTIGUAMIENTO	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
3.6. ESFUERZO MÁXIMO Y AMORTIGUAMIENTO	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>48</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Especificaciones de la Maker Bot Replicator 2X [13]</i>	10
<i>Tabla 2: Porcentaje de aumento de ratio de amortiguamiento de los nanotubos de carbono [36], [37], [38].</i>	28
<i>Tabla 3: Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS marca 3DX TECH [41]</i>	32
<i>Tabla 4: Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS + CNT de la marca 3DX TECH [42]</i>	34
<i>Tabla 5: Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS + CF de la marca 3DX TECH [43]</i>	35
<i>Tabla 6: Parámetro escogidos para experimentación</i>	37
<i>Tabla 7: Densidades aparente de materiales reforzados.</i>	54
<i>Tabla 8: Resultados de Ratio de amortiguamiento [%]</i>	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Aparato para crear objetos tridimensionales [7]</i>	3
<i>Figura 2: Modelación por deposición fundida [6, pp. 145]</i>	6
<i>Figura 3: Dado extrusor [4, pp. 921]</i>	7
<i>Figura 4: Diseño de soportes [11]</i>	8
<i>Figura 5: Trazado del filamento en proceso de modelación por deposición fundida [6, pp. 155]</i>	8
<i>Figura 6: Impresora 3D FDM Maker Bot Replicator 2X [13]</i>	10
<i>Figura 7: Orientación unidireccional del filamento depositado [15]</i>	12
<i>Figura 8: Estructura atómica de los SWNTs [16, pp. 49]</i>	14
<i>Figura 9: Resistencia a la tracción vs. Módulo de Young para diversos materiales [16, pp. 79]</i>	15
<i>Figura 10: Producción de Fibra de Carbono para PAN y resina de petróleo [17, pp. 335]</i>	16
<i>Figura 11: Sistema de 3 grados de libertad</i>	18
<i>Figura 12: Sistema de un grado de libertad</i>	18
<i>Figura 13: Sistema amortiguado de un grado de libertad [22]</i>	19
<i>Figura 14: Respuesta en el dominio del tiempo</i>	20
<i>Figura 15: Curva de histéresis</i>	20
<i>Figura 16: Esquema del mecanismo de disipación de energía por Stick-Slip [27]</i>	23
<i>Figura 17: Deslizamiento de la matriz por sobre el refuerzo. Liberación de energía. [27]</i>	23
<i>Figura 18: Martillo de impacto Brüel &amp; Kjær 8203 [35]</i>	25
<i>Figura 19: Esquema de respuesta en frecuencia de un ensayo de amortiguamiento [33, pp. 6]</i>	26
<i>Figura 20: Método de 3dB en ancho de banda [25, pp. 254]</i>	27
<i>Figura 21: Estructura del ABS [35]</i>	32
<i>Figura 22: Filamento para impresión 3D de ABS marca 3DX TECH [1]</i>	33
<i>Figura 23: Filamento para impresión 3D de ABS + CNT de la marca 3DX TECH [1]</i>	33
<i>Figura 24: Filamento para impresión 3D de ABS + CF de la marca 3DX TECH [1]</i>	35
<i>Figura 25: Distribución de muestras</i>	38
<i>Figura 26: Probeta de ensayos de amortiguamiento</i>	39
<i>Figura 27: Programa de edición para impresión 3D, Simplify 3D</i>	41
<i>Figura 28: Carga de cartucho de filamento en la impresora 3D</i>	41
<i>Figura 29: Mantenimiento al cabezal extrusor de la impresora 3D</i>	41
<i>Figura 30: Modificación de los parámetros de impresión en Simplify 3D</i>	41
<i>Figura 31: Colocación de la cinta adhesiva de papel en la cama caliente</i>	41

<i>Figura 32: Pre calentamiento del cabezal extrusor y cama caliente</i>	41
<i>Figura 33: Monitoreo de impresión 3D mediante Simplify 3D</i>	41
<i>Figura 34: Enfriado de la probeta impresa</i>	41
<i>Figura 35: Probetas de ABS</i>	42
<i>Figura 36: Probetas de ABS + CNT</i>	42
<i>Figura 37: Probetas de ABS + CF</i>	42
<i>Figura 38: Microscopio Leica 50X</i>	43
<i>Figura 39: Balanza digital Mettler Toledo</i>	44
<i>Figura 40: Banco de ensayos de amortiguamiento</i>	44
<i>Figura 41: Transductor láser de velocidad tipo 8323 marca Brüel &amp; Kjær</i>	45
<i>Figura 42: Martillo de impacto tipo 8203 marca Brüel &amp; Kjær</i>	45
<i>Figura 43: Programa PULSE™ the Multianalyzer System Type 3560, marca Brüel &amp; Kjær</i>	47
<i>Figura 44: Conexión de los instrumentos de medición</i>	47
<i>Figura 45: Verificación del paralelismo del haz de luz con el suelo</i>	47
<i>Figura 46: Indicador de refracción del haz de luz</i>	47
<i>Figura 47: Posicionamiento de la probeta</i>	47
<i>Figura 48: Ensayo de amortiguamiento</i>	47
<i>Figura 49: ABS - 0° - 100%</i>	50
<i>Figura 50: ABS - 45°/-45° - 100%</i>	50
<i>Figura 51: ABS - 0° - 80%</i>	50
<i>Figura 52: ABS - 45°/-45° - 80%</i>	50
<i>Figura 53: ABS - 0° - 60%</i>	50
<i>Figura 54: ABS - 45°/-45° - 60%</i>	50
<i>Figura 55: ABS + CF - 0° - 100 %</i>	51
<b>Figura 56: ABS + CF - 45°/-45° - 100 %</b>	51
<i>Figura 57: ABS + CF - 0° - 80 %</i>	51
<b>Figura 58: ABS + CF - 45°/-45° - 80 %</b>	51
<i>Figura 59: ABS + CF - 0° - 60 %</i>	51
<i>Figura 60: ABS + CF - 45°/-45° - 60 %</i>	51
<i>Figura 61: ABS + CNT - 0° - 100 %</i>	52
<i>Figura 62: ABS + CNT - 45°/-45° - 100 %</i>	52
<i>Figura 63: ABS + CNT - 0° - 80 %</i>	52
<i>Figura 64: ABS + CNT - 45°/-45° - 80 %</i>	52
<i>Figura 65: ABS + CNT - 0° - 60 %</i>	52
<i>Figura 66: ABS + CNT - 45°/-45° - 60 %</i>	52
<i>Figura 67: Porcentaje de relleno vs Resistencia máxima [MPa] - Orientación unidireccional 0°</i>	55
<i>Figura 68: Porcentaje de relleno vs Resistencia máxima [MPa] - Orientación cruzada 45°/-45°</i>	56
<i>Figura 69: Porcentaje de relleno vs Módulo de elasticidad [MPa] - Orientación unidireccional 0°</i>	57
<i>Figura 70: Porcentaje de relleno vs Módulo de elasticidad [MPa] - Orientación cruzada 45°/-45°</i>	58
<i>Figura 71: ABS en orientación 0° al 60% de relleno</i>	59
<i>Figura 72: ABS + CF en orientación 0° al 60% de relleno</i>	60
<i>Figura 73: ABS + CNT en orientación 0° al 60% de relleno</i>	60
<i>Figura 74: Ratio de amortiguamiento [%] – ABS</i>	62
<i>Figura 75: Ratio de amortiguamiento - ABS + CNT</i>	63
<i>Figura 76: Ratio de amortiguamiento [%] vs Densidad [kg/m3] - ABS + CNT</i>	64
<i>Figura 77: Ratio de amortiguamiento - ABS + CF</i>	65
<i>Figura 78: Ratio de amortiguamiento [%] vs Densidad [kg/m3] - ABS + CF</i>	66
<i>Figura 79: Ratios de amortiguamiento vs Orientación vs Porcentaje de relleno</i>	67
<i>Figura 80: Ratio de amortiguamiento por espécimen</i>	68
<i>Figura 81: Módulo de elasticidad [MPa] vs Ratio de amortiguamiento [%] – Orientación 0°</i>	69
<i>Figura 82: Módulo de elasticidad [MPa] vs Ratio de amortiguamiento [%] – Orientación 45°/-45°</i>	70
<i>Figura 83: Mapa de rigidez – amortiguamiento [46]</i>	71

<i>Figura 84: Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CNT Orientación 0°</i>	72
<i>Figura 85: Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CNT Orientación 45°/-45°</i>	73
<i>Figura 86: Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CF Orientación 0°</i>	74
<i>Figura 87: Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CF Orientación 45°/-45°</i>	75

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Extrusión</i>	7
<i>Ecuación 2: Amortiguamiento diferencial de movimiento de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso.</i>	19
<i>Ecuación 3: Ratio de amortiguamiento</i>	20
<i>Ecuación 4: Módulo de elasticidad complejo</i>	21
<i>Ecuación 5: Módulo de elasticidad</i>	21
<i>Ecuación 6: Ratio de amortiguamiento</i>	26
<i>Ecuación 7: Volumen</i>	43
<i>Ecuación 8: Densidad</i>	43

## INTRODUCCIÓN

La producción y creación de nuevas patentes utilizando nanotubos de carbono y fibras de carbono para aplicaciones industriales ha experimentado un incremento considerable desde sus respectivos años de descubrimiento. Ello nos demuestra la evolución comercial de esta nueva tecnología [2]. Asimismo, desde la expiración de la patente del proceso de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés) una nueva gama de impresoras 3D de bajo costo y relativamente buen desempeño se ha introducido al mercado [3].

El objetivo de este proyecto de investigación es evaluar la ratio de amortiguamiento de los materiales reforzados (ABS + CNT y ABS + CF) obtenidos por el proceso de modelación por deposición fundida de impresión 3D y comparar los resultados con materiales similares obtenidos mediante otros procesos.

En función de los nuevos materiales disponibles, las nuevas tecnologías de manufactura existentes y la evidencia experimental hallada, se plantea el tema de investigación sobre la combinación de estas dos tecnologías nóveles, la manufactura aditiva y las nanopartículas de refuerzo, con la finalidad de producir materiales de avanzada con propiedades funcionales para la industria.

# CAPÍTULO 1

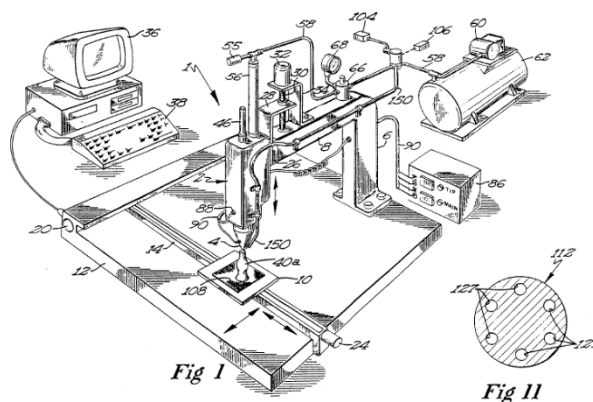
## 1. Revisión de la literatura

### 1.1. Manufactura aditiva

Durante buena parte del siglo XX, la producción en masa estaba limitada por herramientas y procesos destinados a la realización de tareas específicas. Los diseñadores estaban atados a diseñar piezas sencillas. De igual manera, muchos procesos de manufactura involucraban una gran cantidad de remoción de material, cuyo reciclado y reutilización, en su gran mayoría, no era económicamente viable [4, pp. 691]. Esto es, los procesos de manufactura con los cuales se trabajaba carecían de la flexibilidad suficiente para innovar y materializar las ideas del diseñador. Es por ello que la búsqueda de una máquina universal capaz de trabajar con una gran gama de materiales, tamaños y avezados diseños se convirtió en reto para los diseñadores.

Poco antes de terminar el siglo XX, en 1986, Charles Hull, un ingeniero que experimentaba en la solidificación con resinas líquidas por medio de la exposición a la luz láser, ideó una técnica (la estéreolitografía, identificada por las siglas SLA) para solidificar aquellas resinas de tal manera que se acumulasen una sobre otra permitiendo la construcción de objetos tridimensionales [5, pp. 66]. Para 1989, diversas patentes en manufactura aditiva habían sido registradas en la base de patentes de Estados Unidos, como la mostrada en la **Figura 1**, creada por S. Scott Crump. No obstante, tomarían otros cinco años para que Sanders Prototype creara la primera impresora 3D con éxito del mercado, la Model Maker, en 1994. Aquella creación marcó un hito en la manufactura por

computadora moderna, ya que era el comienzo del fin en la búsqueda del paradigma de una máquina de manufactura universal [6].



**Figura 1:** Aparato para crear objetos tridimensionales [7]

La impresión 3D, como es ahora conocida -25 años después de su lanzamiento-, es un proceso de manufactura aditiva (*Additive Manufacturing*, por sus siglas en inglés) el cual consiste en la creación de piezas tridimensionales por medio de la superposición de capas. Para ello, la impresora 3D utiliza un *software* CAD para diseñar las piezas o en su defecto reproducir las piezas mediante ingeniería inversa. Luego convierte, optimiza y ejecuta la creación del componente tridimensional con la posibilidad de variar parámetros estructurales a voluntad del operario gracias al *software* incorporado. A diferencia de otros procesos de manufactura aditiva, en este no es necesario un amplio conocimiento ni análisis de la geometría del objeto a fabricar, ni las herramientas para maquinarlo, ni accesorios para terminar el proceso solo se necesita utilizar el *software* y un pequeño conocimiento de cómo funciona la impresora [5, pp. 2]. Debido a aquella flexibilidad en la variación de parámetros, sencillez de uso y universalidad de manufactura, la impresión 3D ha calado en la industria y en la labor de muchos diseñadores independientes.

Uno de los grandes usos, que motivó al primero de los nombres con el que se conoció a la manufactura aditiva, fue el prototipado rápido (*Rapid Prototyping*, por sus siglas en inglés). Aquella técnica simplificaba la tediosa y cara tarea de los diseñadores de crear prototipos. De igual modo, contribuía de manera significativa a la interacción de los diseñadores con el producto sin terminar. Gracias a tal interacción y a la rápida creación de los prototipos, los diseños a gran escala podían ser corregidos y probados de manera eficaz. Sin embargo, los usuarios de esta técnica se dieron cuenta que la manufactura por adición podía ser utilizada para muchos otros fines [5, pp. 8].

Es por ello que a lo largo de los años 25 de existencia de la manufactura aditiva y gracias a su flexibilidad y el uso de nuevos materiales, se ha desencadenado la diversificación de esta técnica. Uno de los ejemplos más destacables es el ingreso de esta tecnología al campo de la producción de piezas hechas a medida, como es el diseño de estructuras prostéticas. Hasta antes de la introducción de la impresión 3D, la creación de las piezas ortopédicas se basaba en un 100% en la fundición en moldes de material termoplástico en base a unas cuantas medidas predefinidas del paciente, muchas veces siendo necesario la iteración del proceso hasta conseguir la geometría del cliente. Si bien aún la manufactura aditiva tiene limitaciones, su costo y tiempo de fabricación promueven la explotación e investigación de este nuevo proceso de manufactura [8]. Asimismo, y más extraordinario aun, es la inclusión de este proceso de manufactura para la impresión de biomateriales, tejidos y órganos. Para ello se cuantifica y cualifica la forma de los defectos ocasionados por enfermedades, síndromes u otros en los tejidos, para luego identificar la potencial composición de los futuros tejidos modelados. Finalmente, el tejido u órgano es impreso utilizando células del paciente y trasplantado a la zona afectada [9].

Como se ha podido apreciar, el avance de la tecnología de la impresión 3D es exponencial y solo limitado por la imaginación de los usuarios. Asimismo, la flexibilidad de manufactura, la complejidad de los diseños que se pueden crear y su facilidad de uso la constituyen como un proceso de manufactura apto para cualquier público: incluyendo la más grande industria hasta el más pequeño emprendedor.

### **1.1.1. Modelación por deposición fundida**

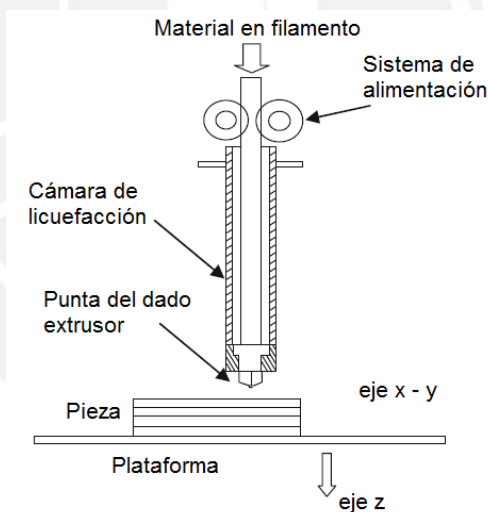
Según la norma ISO. ASTM 52900.2015 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles –Terminology [10], se definen 7 categorías de dentro de la manufactura aditiva:

- *Binde jetting*
- Deposición de energía directa
- *Material jetting*
- Fusión por cama de material en polvo
- Manufactura por laminación de objetos
- Estereolitografía
- Modelación por deposición fundida:

La modelación por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés (*Fused Deposition Modeling*) es la técnica de manufactura por adición por excelencia. Esto gracias a la expiración de la patente de esta técnica, lo que generó el desarrollo de impresoras 3D de bajo costo por un considerable número de pequeñas compañías que hizo asequible el uso y repotenciamiento de esta técnica a nivel mundial [3]. Sus aplicaciones, muy diversas, van desde el mundo de la construcción hasta la ciencia de la medicina.

Todo proceso de modelación por deposición fundida se basa en 6 pasos, los cuales, según el Dr. Ian Gibson en su libro “*Additive Manufacturing Technologies*” [5, pp. 144-153], son los siguientes:

- **Carga del material:** el material de extrusión debe de ser almacenado en forma de filamento en una cámara la cual pueda suplir a la máquina manufacturera continuamente. El filamento de material puede ser empujado continuamente para generar una presión mayor en el dado de extrusión.
- **Licuefacción del material:** luego de que el material es cargado por medio del sistema de alimentación a la cámara de licuefacción (ver **Figura 2**). En ella, por medio de resistencias, el filamento es derretido.



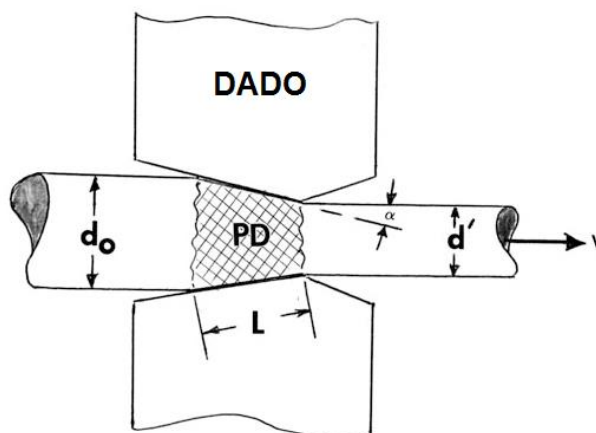
**Figura 2:** Modelación por deposición fundida [6, pp. 145]

- **Extrusión:** durante el proceso de extrusión el material fluiría a través del dado extrusor debido a la presión de la cámara de licuefacción. El correspondiente ratio de deformación se da aproximadamente según [4, pp. 920]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{d}{d_0}\right)v}{L} \quad [1]$$

**Ecuación 1:** Extrusión

Siendo  $d_0$  el diámetro inicial,  $d$  el diámetro extruido,  $L$  el largo de la zona de deformación plástica y  $v$  la velocidad de extrusión de acuerdo a la **Figura 3**.



**Figura 3:** Dado extrusor [4, pp. 921]

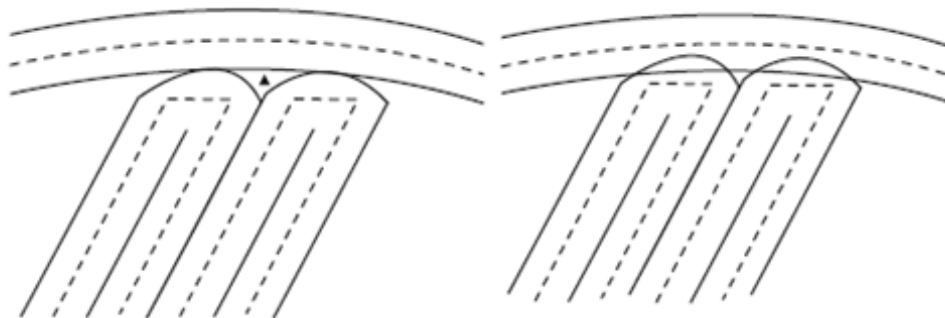
- **Solidificación:** luego de depositado el material caliente y extruido, éste se contrae. Esta contracción debe de ser controlada asegurando que la diferencia de temperaturas sea la mínima. En caso contrario, el componente modelado presentará severas distorsiones en su geometría.
- **Diseño de soportes:** usualmente la construcción de componentes mediante esta técnica implica el diseño de agujeros o superficies que carecen de apoyo en la plataforma de construcción. Es por ello que, para evitar el colapso del material depositado cuando éste aún no está en estado sólido, se crean columnas de soportes del mismo material, pero de una densidad aparente mucho menor. En la **Figura 4**

se puede observar el diseño de un can en donde la única superficie que tiene apoyo en la plataforma de construcción son sus patas, lo demás son columnas de soportes.



**Figura 4:** Diseño de soportes [11]

- **Ploteo y control de paso:** de acuerdo al *software* CAD, se definirá el comienzo de la impresión, así como la trayectoria del dado extrusor a lo largo de todo el proceso de fabricación. Lamentablemente, debido a la geometría de la boquilla, al establecer la trayectoria de relleno de la pieza, existen intersticios en cada cambio de dirección del dado extrusor como podemos apreciar en la **Figura 5**. Aquellos intersticios disminuyen las propiedades mecánicas de la pieza fabricada. Es posible disminuir la cantidad de intersticios dentro del componente a costa de un mayor tiempo de producción y mayor uso de material.

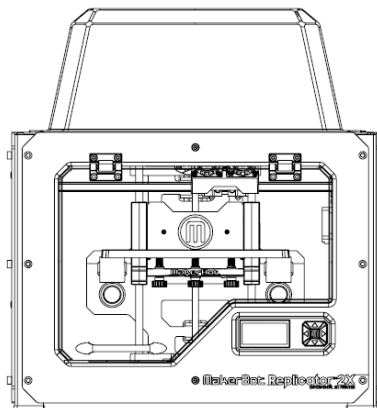


**Figura 5:** Trazado del filamento en proceso de modelación por deposición fundida [5, pp. 155]

### 1.1.1.1. Impresoras 3D para FDM

El principal protagonista en la manufactura por adición es la impresora 3D. Sin embargo, cada impresora está abdicada específicamente a alguna técnica de manufactura aditiva. Por ejemplo, las impresoras para la técnica de estereolitografía trabajan con resina líquida y deben de contar con un láser para endurecer aquella resina y crear los componentes tridimensionales. De la misma manera, una impresora para en la técnica de PBF (*Power Bed Fusion*), debe de poder fundir el polvo de metal y renovar la carga de polvo una vez que se haya acabado. Es por ello que, para modelación por deposición fundida es necesaria una máquina que sea capaz de suministrar un filamento plástico a una cámara de licuefacción para que posteriormente sea fundido, extruido y depositado.

Dentro de todas las variedades de impresoras 3D que se pueden encontrar en el mercado Stratasys nos ofrece la Maker Bot Replicator 2X (ver **Figura 6**), la segunda versión de la Maker Bot Replicator. A diferencia de su predecesora la Maker Bot Replicator 2X deja sus raíces de impresora Rep Rap para convertirse en una impresora semi profesional [12]. De igual forma, cuenta con características de *hardware* como la incorporación de una doble boquilla que habilita la impresión de piezas con dos materiales distintos, la mejora de la resolución máxima y la mejora de la cama caliente que permite que las primeras capas de material se adhieran a la plataforma y así se evita el movimiento de la pieza durante su construcción. Todas aquellas características hacen de la Maker Bot Replicator 2X una impresora semi profesional apta para el mercado y el uso tanto para la creación de piezas mecánicas como de piezas decorativas.



**Figura 6:** Impresora 3D FDM Maker Bot Replicator 2X [13]

Fuera de las mejoras implementadas a la Maker Bot Replicator 2X, ésta tiene un volumen de construcción máximo de 24,6 cm x 16,3 cm x 15,5 cm. Cuenta con dos boquillas extrusoras de 0,4 mm para filamentos de 1,75 mm. La resolución máxima de la impresora es de 0,1 mm, lo cual indica una calidad de impresión alta. Todos los datos antes mencionados podemos verlos en la **Tabla 1**. Finalmente, la impresora cuenta con un *software* muy intuitivo compatible con Windows, Ubuntu o Mac.

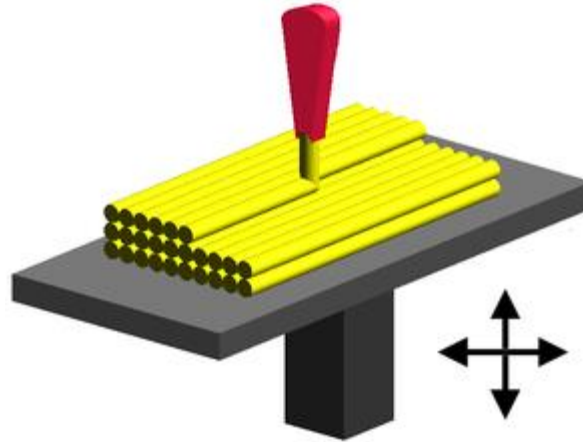
**Tabla 1:** Especificaciones de la Maker Bot Replicator 2X [13]

<b>Tecnología de impresión</b>	<b>Modelamiento por deposición fundida (FDM)</b>
<b>Volumen de impresión</b>	24,6 cm x 16,3 cm x 15,5 cm
<b>Diámetro del filamento</b>	1,75 mm
<b>Diámetro de la boquilla</b>	0,4 mm
<b>Peso</b>	12,6 kg
<b>Software</b>	MakerBot MakerWare™
<b>Compatibilidad</b>	Windows [7+], Ubuntu [ 11.1+], Mac OS [10.6+]
<b>Tipo de archivo</b>	STL, OBJ, Thing

### 1.1.1.2. Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión son variables y definen el tiempo de fabricación, acabado, propiedades mecánicas finales, entre otras cualidades que el componente terminado poseerá luego de ser impreso. Estos parámetros de impresión pueden ser variados a voluntad del operario o, en su defecto, por el *software* según los requerimientos del cliente. Algunos de estos parámetros son [14]:

- **Temperatura de impresión:** este parámetro intercede en el proceso de licuefacción del material en la cámara, valga la redundancia, de licuefacción, previa a la extrusión. La temperatura de impresión es directamente proporcional a la velocidad de impresión. Esto debido a que a mayor temperatura el material fluirá más rápido, sin embargo, una temperatura muy alta de impresión generará distorsiones a la hora de enfriarse. Es por ello que, para cada material, se recomienda una temperatura de impresión en función a sus propiedades viscoelásticas. Por ejemplo, para el plástico ABS se suele fijar una temperatura de 220 – 240 °C y para PLA, 190 – 210 °C.
- **Orientación de impresión:** este parámetro define la trayectoria que el extrusor recorrerá para construir la pieza. Al depositar el material, el extrusor creará una capa en forma de malla. Este enmallado interno influirá de gran manera en las propiedades mecánicas finales del componente. La orientación de impresión se puede variar en función a los requerimientos del operario, sin embargo, se recomienda orientaciones unidireccionales como 0°, 90°, 45° (ver **Figura 7**); orientaciones cruzadas como 0 – 90°, 45 – 45° o panal de abeja.



**Figura 7:** Orientación unidireccional del filamento depositado [15]

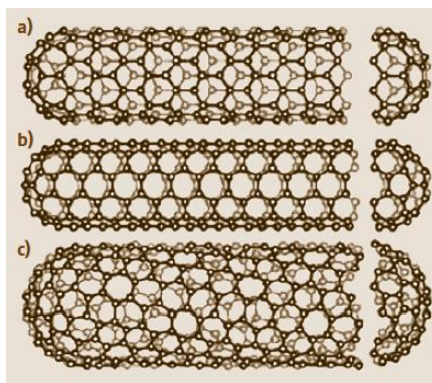
- Densidad de impresión o relleno:** este parámetro hace referencia a la cantidad de material que se deposita en la pieza por unidad de volumen. Mientras menos vacíos hayan en la pieza impresa, mayor será su densidad aparente y consecuentemente, la resistencia, el tiempo de producción y el material utilizado aumentarán. Usualmente para piezas decorativas se utiliza un relleno del 20%, por otro lado para componentes que tendrán un uso mecánico se recomienda un relleno del 100 % para garantizar buenas propiedades mecánicas.
- Altura de capa de impresión:** este parámetro modifica el desplazamiento de la plataforma de impresión, es decir, a mayor altura de capa de impresión mayor desplazamiento de la plataforma de impresión por lo que el componente “crecerá” más rápido. Lamentablemente, aquel aumento de velocidad de impresión reduce significativamente la calidad de la misma. Asimismo, una altura de capa de impresión igual o mayor al diámetro de dado extrusor provocaría una mala adhesión entre capas y por lo tanto, un componente quebradizo y con fisuras.

## 1.2. Refuerzos de materiales

### 1.2.1. Nanotubos de carbono

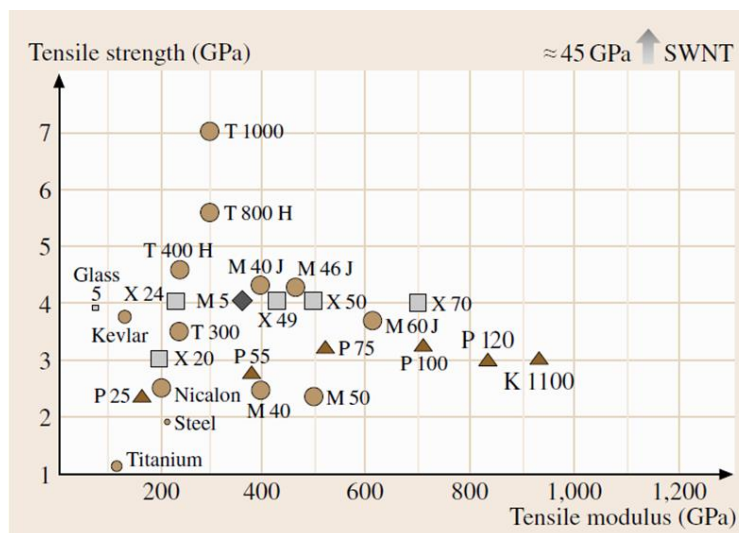
Los nanotubos de carbono son nanopartículas construidas de carbono en un 100 %. Su descubrimiento en el año 1985 por Iijima [16, pp. 68], un físico japonés especializado en materiales de avanzada y nanotecnología, revolucionó la industria y dio pie a que nuevos materiales reforzados con bases de polímeros puedan mejorar sus propiedades mecánicas y alcanzar nuevas propiedades para su uso en la industria como bicicletas de competencia, transistores, pinturas protectoras, entre otros [2].

Los nanotubos de carbono se clasifican en dos grandes tipos según su construcción: nanotubos de carbono de pared simple (SWNTs, *Single Wall Nanotubes*) y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNTs *Multi Wall Nanotubes*). En la **Figura 8** podemos apreciar diferentes esquemas de estructuras para SWNTs: a) en zigzag, b) *armchair*, y c) en helicoides [16, pp. 49]. La estructura básica de los nanotubos de carbono consta de láminas de grafeno enrolladas para dar origen a largos tubos de pequeños diámetros, más pequeños que el grosor del cabello humano. Tal característica geométrica en donde su ratio longitud-diámetro suele variar entre 150 a 2 500 y la relación entre el área superficial y su peso, entre 200 - 400 m<sup>2</sup>/g [16, pp. 77] es esencial para entender el mecanismo de disipación de energía conocido como Stick Slip (ver **Capítulo 1.3**)



**Figura 8:** Estructura atómica de los SWNTs [16, pp. 49]

Dentro de las propiedades mecánicas de los nanotubos destaca su alta resistencia a la tracción en el orden de los gigapascuales: 45 GPa para los de pared simple y 150 GPa para los de pared múltiple, cuyo valor es de 20 veces mayor en comparación al del mejor acero después de múltiples tratamientos térmicos (ver **Figura 9**) [16, pp. 79]. Finalmente, un parámetro importante con el que vamos a trabajar en esta investigación es la rigidez que los nanotubos poseen, y consecuentemente la capacidad de disipar energía. Aquel valor está fuertemente influenciado por la cantidad de paredes que los nanotubos poseen: a mayor cantidad de paredes su rigidez aumenta motivo por el cual para MWNTs se alcanza un valor de 1,3 TPa y para SWNTs un valor de 1 TPa [16, pp. 79].



**Figura 9:** Resistencia a la tracción vs. Módulo de Young para diversos materiales.<sup>1</sup> [16, pp. 79]

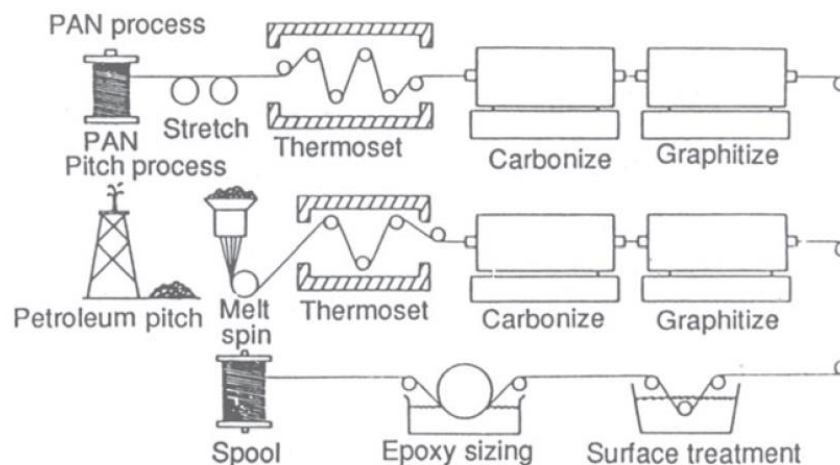
### 1.2.2. Fibra de carbono

La fibra de carbono (FC) es un material que inicialmente fue desarrollado para su uso en la industria aeroespacial, en particular por su baja densidad y su alta resistencia. Con el pasar del tiempo la tecnología ha permitido que el costo de adquisición de este material disminuya, de modo que pueda utilizarse en diversas aplicaciones.

Según John D. Buckley en el *Handbook de compuestos* [17, pp. 335], la fibra de carbono es usualmente producida de tres materiales base: rayón, poliacrilonitrilo y resina de petróleo. En el caso del rayón, las fibras son pirolizadas, carbonizadas y grafitizadas hasta obtener un material cuya composición química es de 100 % carbono. Para los demás materiales bases, algunos procesos extras son agregados, los cuales se ilustran en la

**Figura 10.**

<sup>1</sup> Triángulos corresponden a fibras de carbono a base de poliacrilonitrilo (PNA) en donde T1000 (Torayca) es la fibra con el máximo esfuerzo disponible en el mercado y los círculos corresponden a fibras de carbono a base de resina en donde K1100 (Amoco) es la fibra con el máximo módulo de Young disponible en el mercado. [16, pp. 79]



**Figura 10:** Producción de Fibra de Carbono usando poliacrilonitrilo (PAN) y resina de petróleo [17, pp. 335]

Mecánicamente las fibras de carbono poseen un módulo de Young que oscila entre 27.6 a 690 GPa. dependiendo de la producción, fibra, densidad volumétrica, dirección de los filamentos, tejido y del tratamiento térmico del compuesto al ser grafitizado [17, pp. 335].

Usualmente la fibra de carbono es utilizada en el refuerzo de materiales por su baja densidad en chasis de carros y diversos componentes mecánicos. De la misma manera, su la resistencia a la corrosión como a las altas temperaturas permite que este material sea utilizado en aplicaciones de máquinas térmicas, así como de componentes mecánicos sometidos a altas temperaturas [18].

### 1.3. Amortiguamiento en materiales reforzados

Cualquier cuerpo que tenga masa y elasticidad es capaz de vibrar [19, pp. 1], es así que los materiales reforzados no están exentos del estudio del movimiento oscilatorio. Asimismo, los materiales en general poseen propiedades de amortiguamiento cuyo estudio está condicionado en función a la magnitud del mismo, es decir, si el amortiguamiento es

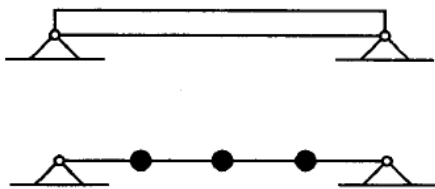
lo suficientemente grande puede limitar la amplitud de la oscilación frente a la resonancia o ser lo suficientemente pequeño para ser despreciable [19, pp. 2].

En primer lugar, los sistemas oscilatorios pueden ser clasificados generalmente de acuerdo a su linealidad. En otras palabras, frente al cumplimiento de la ley de proporcionalidad. Cuando un material trabaja dentro de su límite elástico recupera su forma original al ser retirada la carga y, por lo tanto, existe una proporcionalidad frente a los desplazamientos y fuerzas aplicadas [20, pp. 12]. Caso contrario, para sistemas no lineales, no existe una relación frente a las fuerzas aplicadas y el desplazamiento motivo por el cual su modo de análisis es diferente. Si bien los dos sistemas son calculables en el primero se puede utilizar métodos como la superposición de sus componentes (factor elástico, factor de amortiguamiento), así como análisis en dominio de la frecuencia entre otros. No obstante, para sistemas no lineales solo es posible su análisis en el dominio del tiempo.

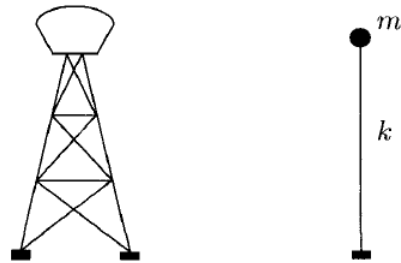
En segundo lugar, las vibraciones de un sistema pertenecen a dos tipos de clases: forzadas y libres. En el primer caso, el sistema oscila producto de una fuerza externa propia del mismo sistema, por ejemplo, un motor o un puente sometido a la fuerza del viento. Este es el caso en donde, si es que la frecuencia inherente al sistema, la frecuencia natural, coincide con la frecuencia de excitación se produce la resonancia del sistema, con consecuencias peligrosas. Por otro lado, los sistemas vibratorios libres vibran debido a la excitación de fuerzas externas. La frecuencia de vibración de estos sistemas reside en una o más de sus frecuencias naturales en función a sus propiedades de elasticidad y masa.

En tercer lugar, la comprensión de un sistema oscilatorio se da en función a los grados de libertad que el sistema posee. Cada grado de libertad se define como el número

de variables necesarios para determinar el estado de un sistema [21]. Si bien un sistema continuo o real tiene un número infinito de grados de libertad, no obstante, es posible la discretizar el sistema. Por ejemplo, una viga en voladizo puede ser representada por 3 puntos en un sistema como en la **Figura 11**; es decir por un sistema de tres grados de libertad; a su vez una viga en voladizo como en la **Figura 12** puede ser representada por un punto en el sistema o un grado de libertad [20, pp. 10]. Reducir los grados del sistema al mínimo facilita el cálculo del mismo con un alto grado de precisión.

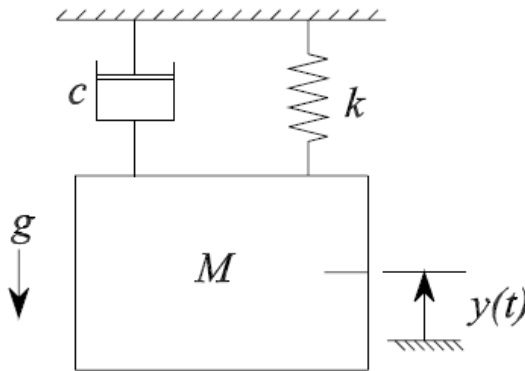


**Figura 11:** Sistema de 3 grados de libertad



**Figura 12:** Sistema de un grado de libertad

En cuarto lugar, los materiales están expuestos a la disipación de la energía por excitaciones externas [24, pp. 141] o amortiguamiento. Los sistemas vibratorios de un grado de libertad sujetos a vibración libre amortiguada presentan el siguiente esquema (**Figura 13**).



**Figura 13:** Sistema amortiguado de un grado de libertad [22]

La abstracción del mismo considera un sistema en donde existe una masa, un elemento elástico y un elemento amortiguador. En este sistema, el balance de la energía no es conservativo por la presencia del elemento amortiguado. es por ello que una vez excitado comenzará a oscilar producto del resorte y regresará a su posición de reposo al ser esta energía disipada. En este sentido, la **Ecuación 2** característica de este tipo de sistemas está representada por

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad [2]$$

**Ecuación 2:** Amortiguamiento diferencial de movimiento de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso.

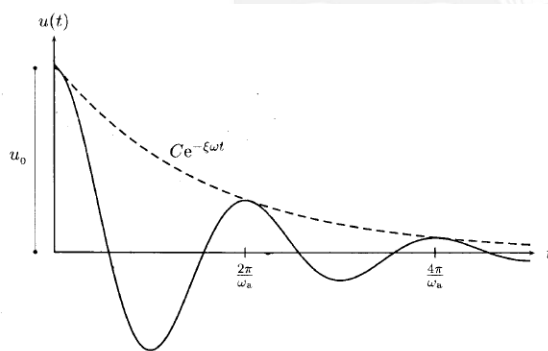
En donde  $M$  es la masa del sistema,  $c$  la constante de amortiguamiento y  $k$  la rigidez del elástico. Como es de saber, al ser una ecuación de segundo grado, el sistema guarda una relación entre las constantes (masa, amortiguamiento y rigidez) y tal relación implica un modo de oscilación distinto: sobre amortiguado, críticamente amortiguado y sub amortiguado. Es así como el valor de amortiguamiento se expresa en función del caso críticamente amortiguado mediante el ratio de amortiguamiento ( $\zeta$ ).

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad [3]$$

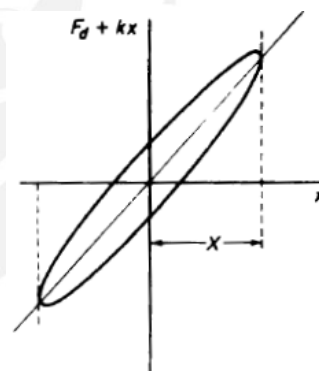
**Ecuación 3:** Ratio de amortiguamiento

Siendo la relación de 1 para el caso críticamente amortiguado en donde, evidentemente, la constante de amortiguamiento es igual al caso crítico; menor que 1, si es sub amortiguado; y mayor a 1 si es sobre amortiguado.

En la **Figura 14** en donde se puede visualizar, en el dominio del tiempo, el decaimiento de la amplitud de un sistema oscilatorio en un caso sub amortiguado ( $\zeta < 1$ ). Asimismo, adyacente a aquella gráfica, se puede visualizar la curva de histéresis que detalla la pérdida de energía por ciclo, es decir, el área encerrada en la curva de histéresis. [24, pp. 79] Esta área representa, en la **Figura 15**, la caída de la amplitud por la pérdida de energía por el amortiguamiento del sistema.



**Figura 14:** Respuesta en el dominio del tiempo



**Figura 15:** Curva de histéresis

Como se indica en la **Figura 15** el amortiguamiento disipa energía por cada ciclo de oscilación. Es así que, en sistemas lineales y bajo el principio de la superposición, tal energía disipada es la suma de las clases de amortiguamiento presentes en el sistema. Por

ello a continuación, se exponen las siguientes clases para una mayor comprensión de los análisis posteriores.

### ***1.3.1. Amortiguamiento estructural***

Cada vez que un material es sometido a fuerzas externas estos oscilan y luego de un periodo de tiempo vuelven a su posición de reposo sin la necesidad de un elemento de amortiguación externa [31]. Tal disipación de energía inherente al material es llamada amortiguamiento estructural.

El amortiguamiento estructural está relacionado con la componente imaginaria módulo complejo de elasticidad del material. Esta componente imaginaria corresponde al trabajo generado por las fuerzas no conservativas cada ciclo en el dominio elástico [31, pp 6]. Es así como la **Ecuación 4** representa al módulo de elasticidad en sus dos componentes:

$$E'' = E + iE \quad [4]$$

**Ecuación 4:** Módulo de elasticidad complejo

La componente real permite hallar la elasticidad bajo cargas estáticas, es decir, la rigidez del material [23]. Esta constante es calculable con la ayuda de ensayos de tracción estandarizados en donde el módulo de elasticidad guarda una relación proporcional con la deformación bajo la siguiente ecuación [31, pp 4]:

$$E_{real} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [5]$$

**Ecuación 5:** Módulo de elasticidad

Siendo  $E_{real}$  el módulo elástico,  $\sigma$  el esfuerzo aplicado y  $\varepsilon$  la deformación elástica.

Cabe recalcar que si bien las dos componentes, real e imaginaria, forman parte de un mismo módulo complejo cada una tiene representa una característica del material independiente: la real cuantifica la rigidez del material y la imaginaria, el amortiguamiento por histéresis del material.

### ***1.3.2. Amortiguamiento de Coulumb***

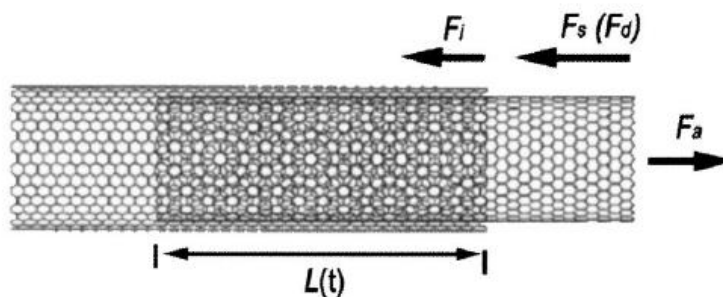
Así como el amortiguamiento puede ser producto inherente del material este también puede residir en fuerzas externas. El amortiguamiento de Coulumb es el resultado de la fricción entre dos superficies: el producto de la fuerza normal y el coeficiente de fricción [19, pp. 34].

#### ***1.3.2.1. Vibración por adherencia y deslizamiento***

El fenómeno *de* vibración por adherencia y deslizamiento, también como conocido como "*stick-slip*" es utilizado por Sara Tahan Litabari [26], Min-Fe Yu [27], Nader Himashu [28], Jang-Kyo Kim [29], Yuan-zhong Hu [30] entre otros investigadores del campo del amortiguamiento para describir la energía disipada por el material en comparación a las mismas matrices sin refuerzos.

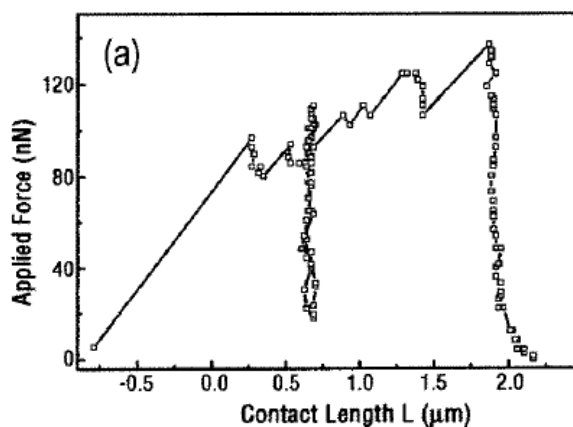
La disipación de energía por medio del fenómeno de *stick-slip* comienza con la aplicación de un esfuerzo al material reforzado como se muestra en la **Figura 16**. Aquel esfuerzo es transmitido al refuerzo, que se deformará. Cuando el esfuerzo llegue a un máximo la matriz se deslizará por la superficie del refuerzo liberando energía en forma de calor. En la **Figura 17** podemos el mecanismo de funcionamiento del *stick-slip*: al aumentar la fuerza, el refuerzo se estira aumentando su longitud de contacto. Luego, la fuerza aplicada en el refuerzo cae intempestivamente (a  $0.75 \mu\text{m}$  aproximadamente de longitud de contacto), es decir la matriz se desliza por la superficie del nanotubo de

carbono. Esto suscita la liberación de energía y por consiguiente un modo de amortiguamiento. Finalmente, el proceso se vuelve a repetir hasta que el sistema se estabilice



**Figura 16:** Esquema del mecanismo de disipación de energía por *Stick-Slip* [27]

Este fenómeno ocurre varias veces dentro la aplicación de algún esfuerzo externo oscilatorio y está directamente relacionado con el área de contacto entre los refuerzos y la matriz. Es por ello que, en el caso de los nanotubos de carbono, al tener un área de contacto grande con respecto a su volumen y una dispersión adecuada en todo el compuesto garantizarían un aumento en la capacidad de disipar energía producto de vibraciones.



**Figura 17:** Deslizamiento de la matriz por sobre el refuerzo. Liberación de energía. [27]

## 1.4. Métodos experimentales

### 1.4.1. Estructura del sistema dinámico

El método de experimentación utilizado en este trabajo de tesis corresponde al análisis modal. Este método de experimentación nos permite estudiar la dinámica del sistema de una estructura de modo que podamos identificar las frecuencias naturales esenciales para evaluar el factor de amortiguamiento. La esencia de la experimentación y el análisis modal reside en la simplificación del cálculo dinámico del sistema por medio de transformaciones matemáticas. Para ello es necesario obtener la función de respuesta en frecuencia (FRF), función que obtendremos por medio de los ensayos; luego, se convertirá por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) al espacio modal. Finalmente, se llevará a cabo la interpretación de datos. Gracias a este sistema de análisis se puede recopilar información acerca de las frecuencias naturales, ratio de amortiguamiento y entre otros [32] sin la necesidad de destruir las piezas a ensayar.

### 1.4.2. Selección de método de ensayo

Existen una gran variedad de herramientas para la realización de ensayos modales desde *shakers* hasta dispositivos electromagnéticos. Sin embargo, las limitaciones debido a las dimensiones de nuestras probetas, por el reducido espacio que proporciona la cama de la impresora 3D para imprimir, evita que podamos utilizar *shakers* o dispositivos electromagnéticos, por razones constructivas del mismo extruido del proceso FDM [34]. Es por ello que, una solución fue la de utilizar instrumentos de impactos o *Bump Test*.

El *Bump Test* consiste de un dispositivo de impacto, una herramienta de experimentación modal, muy común en los ensayos de vibraciones. Como se puede apreciar en la **Figura 18** consta de un mango y una celda de fuerza en la cabeza del martillo. Esta herramienta

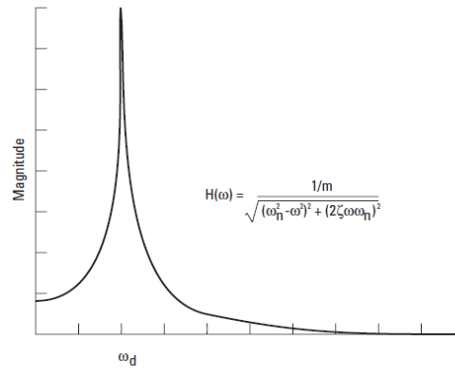
sigue el principio de momento lineal, es decir, la masa de la cabeza del martillo impartirá una cierta cantidad de energía en función a la velocidad con la que esta golpee la probeta. El golpe producto de la herramienta de medición es la fuerza de excitación que desestabiliza el sistema y produce la oscilación del mismo.



**Figura 18:** Martillo de impacto Brüel & Kjær 8203 [35]

#### **1.4.3. Análisis de datos**

Inmediatamente luego del impacto el componente comienza a oscilar libremente. Esta oscilación es capturada por un láser y mediante la transformada rápida de Fourier (TFT) convertida a una respuesta en el dominio de la frecuencia como podemos observar en la **Figura 19**. En Figura descrita son fácilmente identificables las frecuencias naturales del sistema.



**Figura 19:** Esquema de respuesta en frecuencia de un ensayo de amortiguamiento [33, pp. 6]

Luego de identificar las frecuencias naturales se evalúa la capacidad de amortiguamiento con el método de 3dB ancho de banda o también llamado potencia media. Este método según Junbo Jia en su libro *Essensial of Applied Dynamics Analysis* [25, pp. 254], consiste en identificar la(s) frecuencia(s) naturale(s) del sistema y las frecuencias de la amplitud media (equivalente a  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  la amplitud máxima o 3dB menos que esta). La **Figura 20** nos permite visualizar mejor el método de potencias medias siendo  $Q$  la amplitud máxima. De esta manera la esbeltez de la curva en el dominio de las frecuencias define la el ratio de amortiguamiento. Mientras más esbelta, menor ratio de amortiguamiento.

$$\zeta = \frac{3dB}{w_n} = \frac{w_2 - w_1}{2w_n}$$

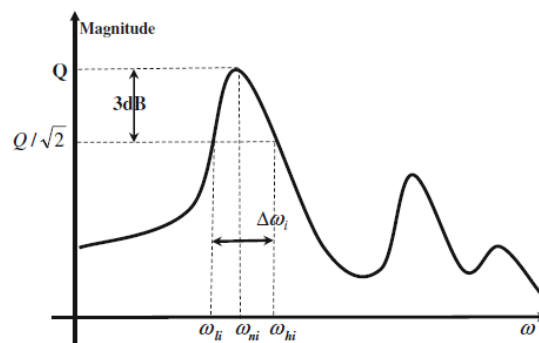
[6]

**Ecuación 6:** Ratio de amortiguamiento

$\zeta$ : ratio de amortiguamiento.

$w_2 - w_1$ : ancho de banda correspondiente a  $\frac{w_n}{\sqrt{2}}$  o a 3dB

$w_n$ : frecuencia natural



**Figura 20:** Método de 3dB en ancho de banda [25, pp. 254]

### 1.5. Hipótesis

El análisis del amortiguamiento en materiales reforzados es un tema tratado en investigaciones previas. Sin embargo, el análisis del amortiguamiento de probetas fabricadas por impresión 3D es novel. Es por ello que para la elaboración de las hipótesis nos basamos en investigaciones similares las cuales se mencionan a continuación.

De acuerdo a la publicación de Ambrosini, *Damping response of composites beams with carbon nanotubes* [36], los nanotubos de carbono benefician la disipación de energía en una matriz. En aquella investigación se obtuvo que un 5% en peso de nanotubos embebidos en una matriz epoxy aumentó entre un 33% y 37% los ratios de amortiguamiento de los diferentes especímenes que construyeron. De la misma manera, W. H. Liao en su investigación *Fabrication, Testing, and Modeling of Carbon Nanotube Composites for Vibration Damping* [37] indica que la adición de refuerzos, en este caso nanotubos de carbono aumenta la rigidez del material lo que perjudica el desempeño del material frente al amortiguamiento. En este caso Liao adhiere 2,0% de nanotubos de carbono en resina epoxy y experimenta un aumento de 300% de ratio de amortiguamiento. Finalmente, Kordani en su publicación *Damping Augmentation of Nanocomposites Using Carbon Nanotube/Epoxy* [38] utilizó probetas con 0,5% de

nanotubos en peso. El resultado fue el aumento de hasta 1050 % del ratio de amortiguamiento (ver **Tabla 2**).

**Tabla 2:** Porcentaje de aumento de ratio de amortiguamiento de los nanotubos de carbono [36], [37], [38].

Investigador	Modos de frecuencia	Ratio de amortiguamiento en matriz epoxy sin refuerzo	Ratio de amortiguamiento en matriz epoxy con refuerzos	Aumento
D. Ambrosini [36]	1 <sup>ra</sup>	0,0090	0,0120	33%
	2 <sup>da</sup>	0,0094	0,0128	36%
	3 <sup>ra</sup>	0,0092	0,0124	35%
W. H. Liao [37]	1 <sup>ra</sup>	0,0250	0,1000	300%
N. Kordani [38]	1 <sup>ra</sup>	0,0360	0,0750	108%
	2 <sup>da</sup>	0,0280	0,3220	1050%
	3 <sup>ra</sup>	0,0230	0,1420	517%

- **Hipótesis 1:** De acuerdo a las investigaciones recopiladas anteriormente los nanotubos de carbono tienden a aumentar las propiedades de amortiguamiento de los materiales reforzados. Es por ello que a lo largo de la variación de parámetros de impresión podremos ver que el material reforzado con nanotubos de carbono presentará valores más altos de ratio de amortiguamiento que los otros materiales.

Por otro lado, las propiedades mecánicas de los materiales reforzados tienen injerencia directa en las propiedades de amortiguamiento. Como se revisó anteriormente, en la investigación de Montalvo [31], el módulo de elasticidad tiene una relación directa con las tasas de deformaciones. Asimismo, de acuerdo a la investigación de Rice titulada *Measurement of Young's modulus and damping of fibers at cryogenic temperatures* [39],

esta sugiere una relación inversamente proporcional entre el módulo de elasticidad y el ratio de amortiguamiento.

- **Hipótesis 2:** Al variar los parámetros de impresión de las probetas se variarán las propiedades mecánicas de las mismas. Conforme se reduzca el porcentaje de relleno se reducirá la densidad y por ende el módulo de elasticidad. Aquella reducción del módulo de elasticidad tendrá como efecto el aumento del ratio de amortiguamiento en los materiales ensayados.



## CAPÍTULO 2

### 2. Procedimiento experimental

#### 2.1. Metodología

Para el análisis de amortiguamiento de los materiales reforzados con nanotubos y fibras de carbono se empleó la siguiente metodología de ensayo:

En primer lugar, se revisó una serie de investigaciones sobre el tema que nos compete; asimismo, se tomó en cuenta las limitaciones que el procedimiento experimental – en general – iba a tener (por ejemplo, el hecho de que la impresora 3D solo acepta la reproducción de piezas hasta un máximo de 20 cm. o el cálculo exacto del espesor de las probetas para que las mismas puedan estar aptas para las lecturas de desplazamiento que serían registradas por el transductor láser).

En segundo lugar, tomando en cuenta toda la información necesaria recopilada en el paso anterior, se empleó el programa denominado “Autodesk Inventor Professional” edición 2017 a fin de diseñar y con ello dimensionar las probetas.

En tercer lugar, se utilizó el software “Simplify 3D”, programa que permite controlar las variables de impresión, tales como la densidad de las probetas, mediante el porcentaje de relleno, y la orientación del enmallado interno, ambas consideradas variables principales para la investigación.

A continuación, con la ayuda de la impresora Makerbot Replicator 2X, ubicada en la Sala de Manufactura Digital de la PUCP, se fabricaron tres tipos de probetas: probetas de ABS, probetas de ABS + CNT y probetas de ABS + CF. En total, se obtuvo 54 probetas que serían usadas para los ensayos.

Finalmente, se preparó un banco de ensayos de caracterización de amortiguamiento de material, empleando el método de impacto (*bump test*), en el laboratorio de Acústica de la sección de Física de la PUCP.

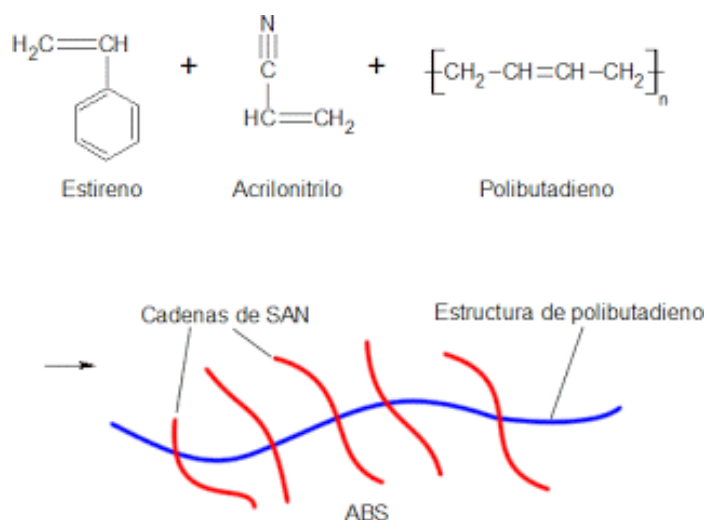
## **2.2. Materiales de trabajo**

En esta sección se describirán cada uno de los materiales empleados en el presente procedimiento experimental: composición, propiedades de sus elementos y su empleabilidad en la investigación.

### **2.2.1. Filamento de ABS**

El ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) está constituido por tres monómeros: bloques de acrilonitrilo, elemento que le otorga dureza y resistencia a ataques químicos; bloques de butadieno, que proporciona tenacidad; y bloques de estireno, que provee resistencia mecánica y rigidez.

De acuerdo a su estructura, el ABS posee una dura y rígida matriz de cadenas de SAN (estireno acrilonitrilo), la cual está entrelazada con la estructura del polibutadieno (como puede apreciarse en el esquema titulado **Figura 21**). Aquella sinergia entre las propiedades del copolímero nos proporciona características superiores sin perder textura, ligereza -todo ello a un precio aceptable para la industria [40]-.



**Figura 21:** Estructura del ABS [35]

A modo de ejemplo, en la **Tabla 3** se muestra la hoja de especificaciones del filamento para impresión 3D de ABS de la marca 3DX TECH, la cual fue utilizada para imprimir todas las probetas ABS empleadas en esta investigación (ver **Figura 22**).

**Tabla 3:** Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS marca 3DX TECH [41]

Propiedades	ABS	Unidades
Resistencia a la tracción.	41	MPa
Módulo de elasticidad (E).	1948	MPa
Alargamiento a la tracción.	4.03	%
Resistencia a la flexión.	67	MPa
Módulo de flexión.	1983	MPa
Temperatura de impresión.	220 - 240	°C
Temperatura de cama.	100 - 110	°C



**Figura 22:** Filamento para impresión 3D de ABS marca 3DX TECH [1]

### 2.2.1. Filamento de ABS + CNT

Para la elaboración de esta tesis se utilizó un filamento especial para impresión 3D marca 3DXTECH, de material compuesto por resina ABS y CNT. Este material se emplea principalmente en ámbitos donde se desea protección de descargas electrostáticas, así como en la creación de piezas funcionales por el método de modelación por deposición fundida, con plataforma de construcción en caliente.

Según el fabricante las características del filamento (ver **Figura 23**) se presentan en la **Tabla 4**



**Figura 23:** Filamento para impresión 3D de ABS + CNT de la marca 3DX TECH [1]

**Tabla 4:** Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS + CNT de la marca 3DX TECH [42]

<b>Propiedades</b>	<b>ABS + CNT</b>	<b>Unidades</b>
<b>Resistencia a la tracción</b>	42	MPa
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	2131	MPa
<b>Alargamiento a la tracción</b>	3.75	%
<b>Resistencia a la flexión</b>	80	MPa
<b>Módulo de flexión</b>	2174	MPa
<b>Temperatura de impresión</b>	220 - 260	°C
<b>Temperatura de cama</b>	100 - 110	°C

### 2.2.2. Filamento de ABS + CF

Para la elaboración de las probetas a base de ABS + CF se empleó el filamento CarbonX™ Carbon Fiber Reinforced ABS 3D Filament [43] distribuido por la empresa 3D TECH.

Este filamento tiene las características especiales de haber sido diseñado para la construcción de elementos estructurales. Posee alta rigidez, alta resistencia térmica y alta estabilidad dimensional.

Según el fabricante las características del filamento (**ver Figura 24**) se presentan en la

### Tabla 5.

**Tabla 5:** Propiedades mecánicas y características técnicas del filamento para impresión 3D de ABS + CF de la marca 3DX TECH [43]

Propiedades	ABS + CF	Unidades
Resistencia a la tracción.	36	MPa
Módulo de elasticidad (E)	3458	MPa
Alargamiento a la tracción.	1.75	%
Resistencia a la flexión.	76	MPa
Módulo de flexión.	3687	MPa
Temperatura de impresión.	220 - 260	°C
Temperatura de cama.	100 - 110	°C



**Figura 24:** Filamento para impresión 3D de ABS + CF de la marca 3DX TECH [1]

## 2.3. Impresión de las probetas

### 2.3.1. Selección de parámetros de impresión

Para la experimentación se analizó la información recopilada de trabajos anteriores, publicaciones y libros, para obtener parámetros más comunes y mejores utilizados en la modelación por deposición fundida.

En primer lugar, se definió el espesor de capa a utilizar en la fabricación de probetas. En base a la tesis “Estudio de las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica fabricados mediante impresión 3D” de Hendrick Maz Vargas [1, pp. 91], se pudo concluir que a un menor espesor de capa en la producción de piezas se incrementa la resistencia a la tracción, así como el módulo de elasticidad.

En segundo lugar, se definió la orientación del enmallado interno de las probetas, para lo cual se tomó como referencia la investigación realizada por A. Treviso en su artículo “*Damping in composites materials: Properties and models*” [44]. En aquel documento Treviso hizo hincapié en la orientación de materiales reforzados por capas en donde los materiales cuya construcción entrecruzada presentaron mejores propiedades de amortiguamiento que los unidireccionales. Asimismo, indicó que para pruebas de amortiguamiento unidireccional el ángulo que posee un máximo valor está alrededor de los 35° en flexión y 45° en torsión.

De la misma manera, en la tesis de Hendrick Vargas se determinó que las orientaciones unidireccionales 0° y 45° poseen las mejores propiedades mecánicas y de las orientaciones cruzadas 45°/-45° posee el más alto esfuerzo máximo.

En tercer lugar, se definió la densidad de las probetas, para lo cual se decidió introducir la densidad como variable en función al parámetro de la impresora llamado “*infill*” con unidades porcentuales de 100 % (relleno completo) a 60 %.

En resumen, para la fabricación de las probetas se utilizó un espesor de capa de 0,2 mm. Así, se fabricó probetas en dos orientaciones, la mejor orientación cruzada, 45°/-45°, y la mejor orientación unidireccional, 0°. De la misma manera, el relleno de las

probetas se varió en función al parámetro “*infill*” de la impresora de 100 % a 60 % en intervalos de 20 %. Se puede apreciar de manera de esquema en la **Tabla 5**.

**Tabla 6:** Parámetro escogidos para experimentación

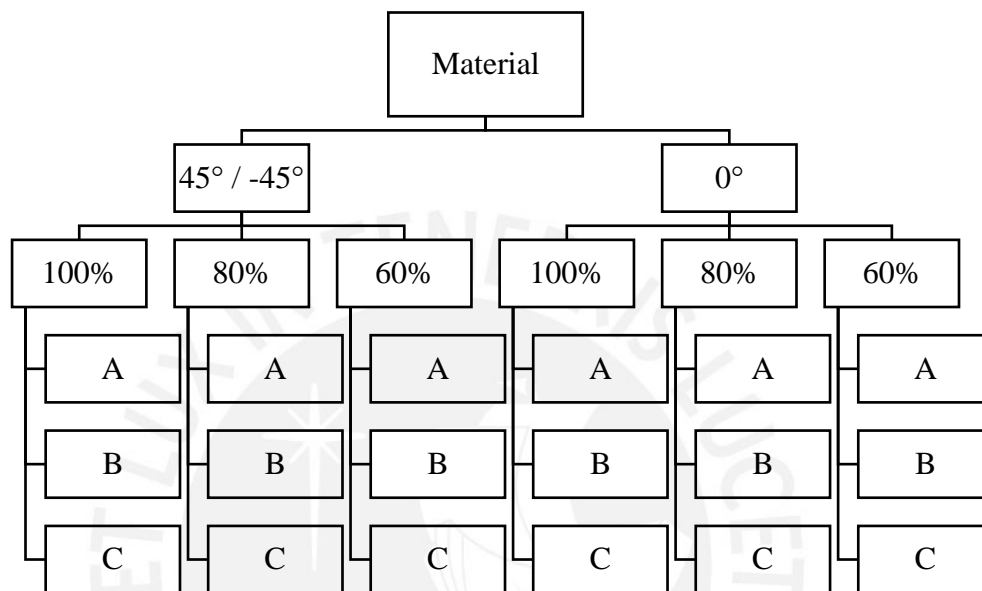
<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>
<b>Material</b>	ABS
	ABS + CNT
	ABS + CF
<b>Orientaciones</b>	0°
	45°/-45°
<b>Espesor de capa</b>	0,2 mm.
<b>Relleno</b>	100%
	80%
	60%

### 2.3.1. Selección de muestra

De acuerdo a los parámetros escogidos se seleccionó el número de muestras a imprimir (**Figura 25**):

- Por cada material, ABS; ABS + CNT y ABS + CF, se prepararán dos juegos de cada orientación: cruzada a 45° / -45° y unidireccional a 0°.
- Para orientación se prepararán tres juegos de cada porcentaje de relleno: 100%, 80%, y 60%.
- Para cada porcentaje de relleno se determinó que se utilizarán tres juegos de probeta: A, B y C debido a las limitantes de disponibilidad de la impresora, tiempo de impresión y mínimo de muestras para obtener un análisis estadístico representativo.

- A cada probeta pasará por 10 ensayos de impacto (10 golpes con el martillo de impacto), el resultado del ratio de amortiguamiento será el promedio de cada una de las mediciones de los ensayos realizados.



**Figura 25:** Distribución de muestras

En resumen, se fabricarán 18 probetas de cada material (ABS, ABS + CNT y ABS + CF), en total 54.

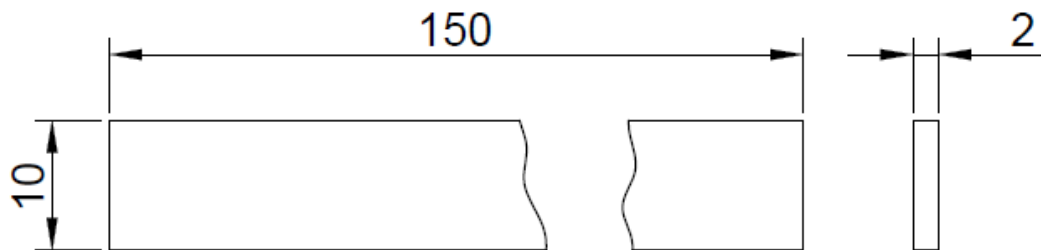
### 2.3.2. Diseño de probetas

El dimensionamiento se hizo en función a experimentos, recomendaciones, investigaciones, publicaciones y restricciones constructivas realizados con materiales reforzados con nanotubos y fibra de carbono en vibración pasiva en voladizo. Tales son los casos de:

- Respuesta al amortiguamiento de compuestos con nanotubos de carbono de Daniel Ambrosini [36], en donde utilizan probetas de rectas de 320 mm. x 15 mm.

- Aumento del amortiguamiento en vibración pasiva utilizando compuestos reforzados de nanotubos de carbono-epoxy de N. Jalili [28], en donde utilizan probetas de rectas 11,5 pulgadas (292,1 mm.)
- La norma ASTM E756.05 [34] recomienda un ancho de la probeta no menor a 10 mm.
- Las dimensiones de la cama caliente de la impresora 3D en donde el máximo permisible de largo es 24,6 cm.
- Ensayos de vibración cualitativa para determinar espesor, en los que se determinó que un espesor de 2 mm. garantiza una correcta lectura por el láser.

Dado los datos se construyó la siguiente probeta de la **Figura 26** de 150 mm. x 10 mm. x 2 mm.



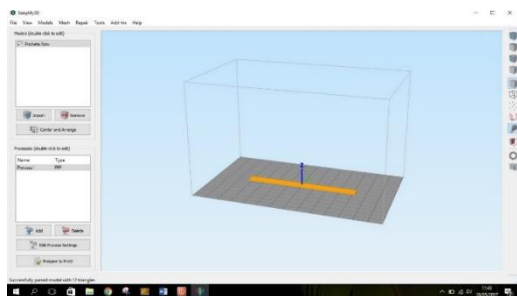
**Figura 26:** Probeta de ensayos de amortiguamiento

### 2.3.3. Operación de impresión

En primer lugar, se diseñó las probetas en Autodesk Professional Inventor 2017. En segundo lugar se convirtió el archivo de extensión .dwg a .stl para poder utilizar el *software* Simplify 3D. En tercer lugar, se cargó el cartucho de filamento a la impresora.

Acto seguido se encendió el programa Simplify 3D y la impresora para modificar los parámetros de impresión. Luego de establecidos los parámetros, se adhirió una cinta adhesiva de papel a la cama caliente de la impresora para evitar que el componente se dañe a la hora de retirarlo. A continuación, se dio la orden de empezar el precalentamiento del extrusor y de la cama caliente, la temperatura de trabajo se estableció a 230°C y 110°C respectivamente. Inmediatamente después de alcanzar la temperatura establecida se ejecutó el programa para comenzar la impresión de las probetas. La impresora tardó entre 6 y 9 minutos para imprimir cada probeta. Finalmente, se inspeccionó, registró y almacenó cada probeta. En las **Figuras 27 a 34** se puede apreciar un recopilatorio del procedimiento antes descrito.





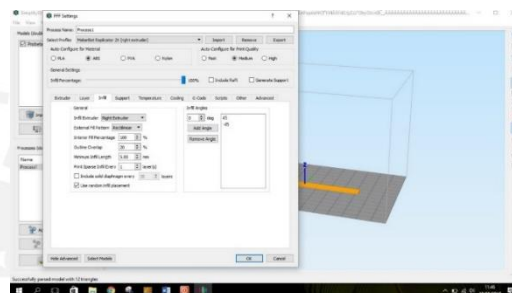
**Figura 27:** Programa de edición para impresión 3D, Simplify 3D



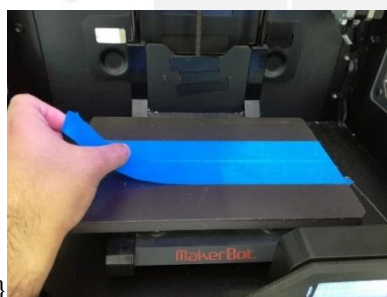
**Figura 28:** Carga de cartucho de filamento en la impresora 3D



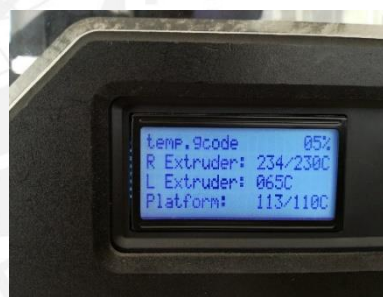
**Figura 29:** Mantenimiento al cabezal extrusor de la impresora 3D



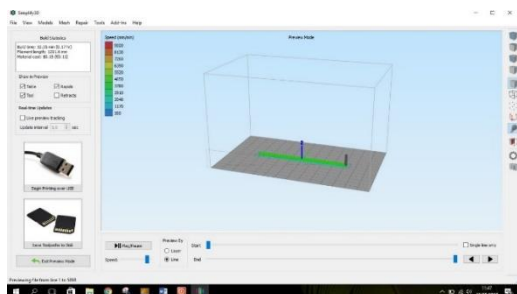
**Figura 30:** Modificación de los parámetros de impresión en Simplify 3D



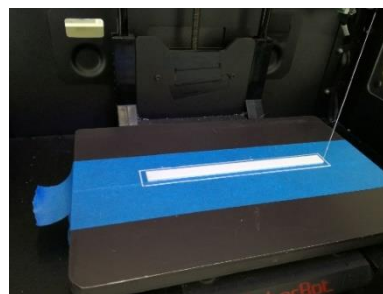
**Figura 31:** Colocación de la cinta adhesiva de papel en la cama caliente



**Figura 32:** Pre calentamiento del cabezal extrusor y cama caliente



**Figura 33:** Monitoreo de impresión 3D mediante Simplify 3D

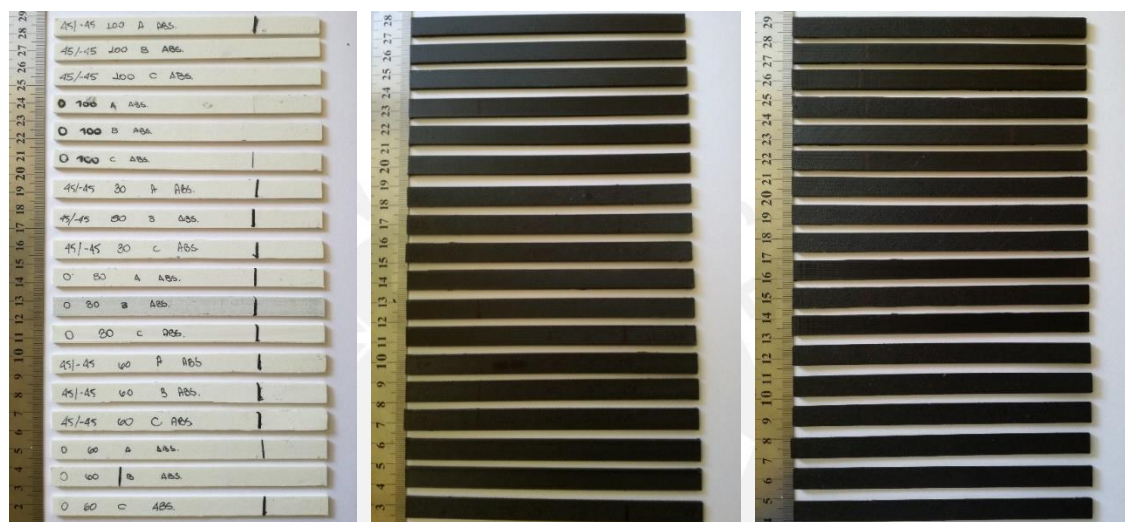


**Figura 34:** Enfriado de la probeta impresa

## 2.4. Evaluación de las probetas

### 2.4.1. Inspección visual

Las probetas fueron inspeccionadas visualmente para determinar posibles defectos de manufactura como cavidades no rellenas, discontinuidades o fisuras. En las **Figuras 35, 36 y 37** se muestran los sets de probetas utilizadas en los ensayos



**Figura 35:** Probetas de ABS

**Figura 36:** Probetas de ABS +  
CNT

**Figura 37:** Probetas de ABS +  
CF

Luego de inspeccionar visualmente las probetas, con la ayuda del microscopio Leica de 50X de la **Figura 38**, se observó el trazo dejado por el cabezal extrusor al construir las probetas.



**Figura 38:** Microscopio Leica 50X

#### 2.4.2. Determinación de la densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se utilizó un vernier digital marca Mitutoyo para medir las dimensiones de las probetas. Se tomó tres mediciones de cada dimensión, largo, ancho y espesor para hallar el volumen según la **Ecuación 7**. Acto seguido se utilizó una balanza digital marca Mettler Toledo del CITE Materiales PUCP de la **Figura 39** capaz de medir hasta una décima de miligramo para determinar la masa de cada probeta. Finalmente se procedió a dividir la masa entre el volumen para calcular la densidad aparente de cada espécimen según la **Ecuación 8**.

$$Volumen = ancho \times largo \times espesor$$

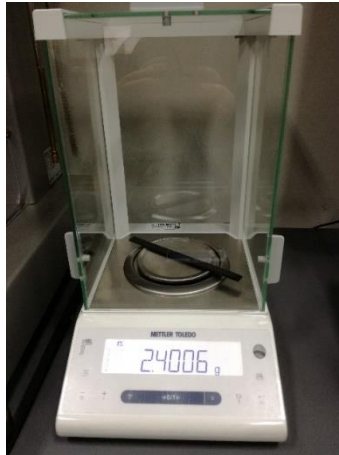
[7]

**Ecuación 7:** Volumen

$$\rho = \frac{Masa}{Volumen}$$

[8]

**Ecuación 8:** Densidad



**Figura 39:** Balanza digital Mettler Toledo

## 2.5. Ensayos de amortiguamiento

### 2.5.1. Implementación

Para los ensayos de amortiguamiento de las probetas se implementó el banco de ensayos de la **Figura 40** en el laboratorio de acústica de la Sección de Física. Para este banco de ensayos se utilizó:



**Figura 40:** Banco de ensayos de amortiguamiento

- Un transductor láser de velocidad tipo 8323 marca Brüel & Kjær, el cual mide la velocidad de vibración sin tocar la superficie vibrante. Ver **Figura 41**.



**Figura 41:** Transductor láser de velocidad tipo 8323 marca Brüel & Kjær

- Un martillo de impacto tipo 8203 marca Brüel & Kjær, el cual mide la fuerza aplicada sobre una estructura. Ver **Figura 42**.



**Figura 42:** Martillo de impacto tipo 8203 marca Brüel & Kjær

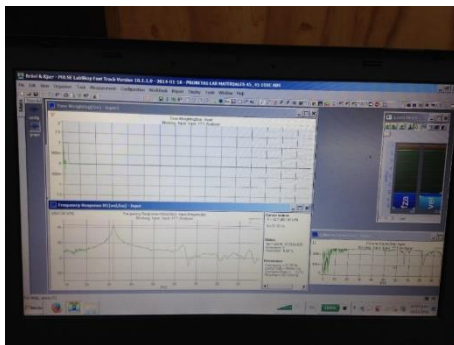
- Una mordaza marca Stanley, para sujetar la probeta en voladizo
- Sistema de adquisición de data tipo 3160-A-042 marca Brüel & Kjær
- Burbuja nivel.

- Programa PULSE™ the Multianalyzer System Type 3560, marca Brüel & Kjær, el cual procesará los datos recogidos, generará las graficas correspondientes y nos otorgará la data necesaria para el análisis posterior.

### 2.5.2. Procedimiento de ensayo

Los experimentos para la determinación del ratio de amortiguamiento del material se realizaron en el laboratorio de acústica de la Sección de Física de la PUCP, con el apoyo del profesor Richard Rivera, bajo el siguiente procedimiento (ver **Figuras de 43 a 48**).

En primer lugar, se inicia el programa PULSE Mutli-analyzer System como se puede apreciar en la **Figura 43**. Luego, se conectó el martillo de impacto al sistema de adquisición de data, así como el transductor láser de velocidad. Posteriormente se establecieron los parámetros de medición del ensayo: tiempo de duración de la medición, 8 segundos; ancho de banda, de 0 a 100 Hz, número de ensayos por probeta, 10. A continuación, se instaló la mordaza en una mesa fija. Acto seguido se colocó una probeta impresa y se adhirió una etiqueta refractaria a 1 cm. del extremo en voladizo. Después de tener la probeta sujeta se encendió el láser y se procedió a enfocar la luz en la etiqueta refractaria **Figura 47**. Finalmente se procedió a dar inicio al ensayo. Para ello se golpeó con un golpe seco la probeta a unos 2 cm. del extremo empotrado, luego de esperar que los datos sean registrados y la probeta haya terminado de vibrar se vuelve a golpear hasta tener un total de 10 ensayos de modo se pueda tener una lectura promedio. Para concluir, se retira de la mesa, se marca, se mide la longitud del extremo en voladizo, se registra, inspecciona y almacena.



**Figura 43:** Programa PULSETM the Multianalyzer System Type 3560, marca Brüel & Kjær



**Figura 44:** Conexión de los instrumentos de medición



**Figura 45:** Verificación del paralelismo del haz de luz con el suelo



**Figura 46:** Indicador de refracción del haz de luz



**Figura 47:** Posicionamiento de la probeta

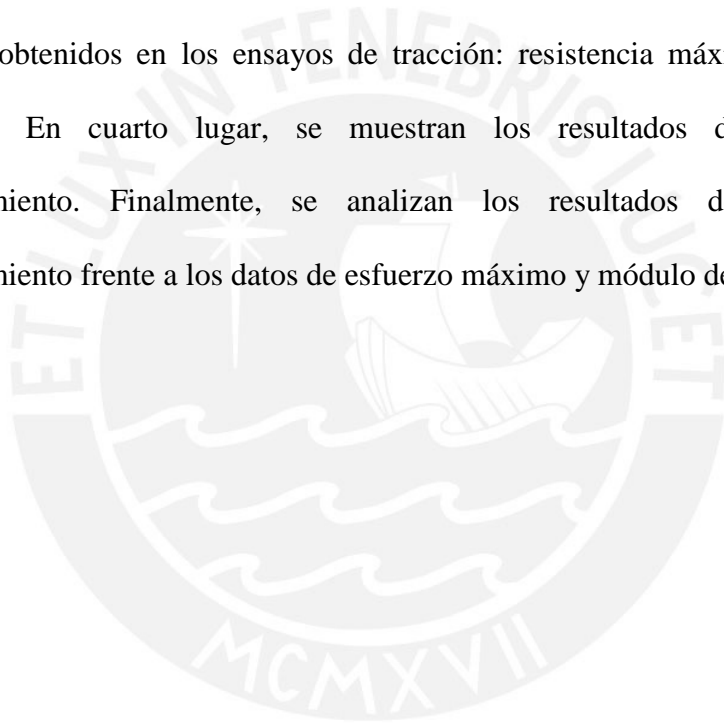


**Figura 48:** Ensayo de amortiguamiento

## CAPÍTULO 3

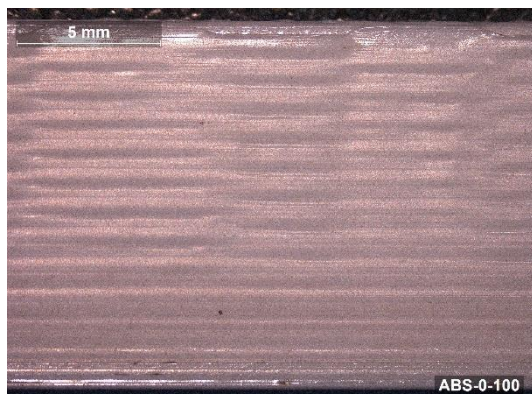
### 3. Resultados y discusión

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados. En primer lugar, se da a conocer la estructura macrográfica de las probetas para cada uno de los porcentajes de relleno ensayados. En segundo lugar, se presentan los datos de los ensayos de densidad según porcentaje de relleno. En tercer lugar, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción: resistencia máxima y el módulo de elasticidad. En cuarto lugar, se muestran los resultados de los ensayos de amortiguamiento. Finalmente, se analizan los resultados de los ensayos de amortiguamiento frente a los datos de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad.

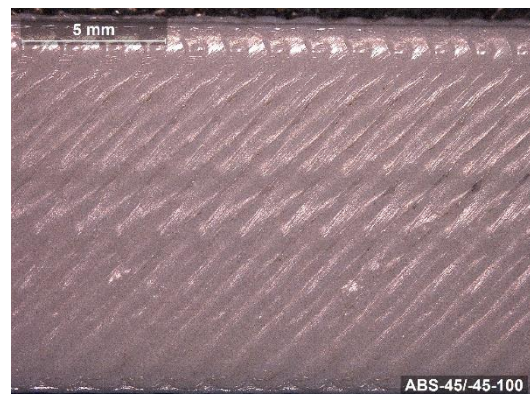


### 3.1. Inspección macrográfica

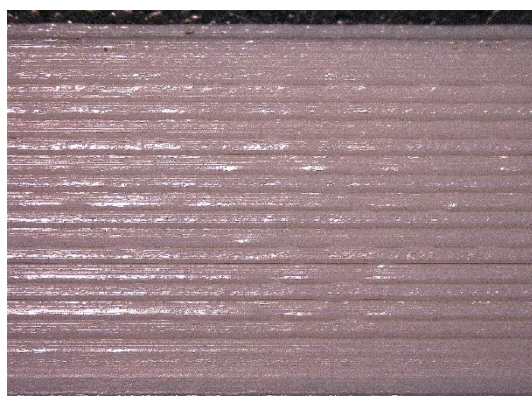
Las **Figuras 49 a 54** corresponden a la superficie de probetas de ABS con diferente porcentaje de relleno, para orientaciones de impresión de  $0^\circ$  y  $45^\circ/-45^\circ$ . Se puede visualizar fácilmente que conforme se reduce el porcentaje de relleno aumentan los vacíos en el enmallado (**Figuras 53 y 54 versus Figura 51 y 52**). Tales vacíos pueden ser considerados como una imperfección en la construcción de la probeta; la reducción del porcentaje de relleno implica una disminución en la cantidad de material en la probeta, lo cual posteriormente se deviene en la reducción de sus propiedades mecánicas. En la **Figura 53**, también es posible ver más allá de los vacíos, cada filamento extruido y depositado. Si bien estas son imperfecciones en el enmallado inherente a la reducción de porcentaje de relleno, la falta de fusión del material podría representar una disminución adicional de las propiedades mecánicas pero a la vez un aumento de la capacidad de amortiguamiento por la fricción interna entre filamentos, es decir, por amortiguamiento de Coulumb.



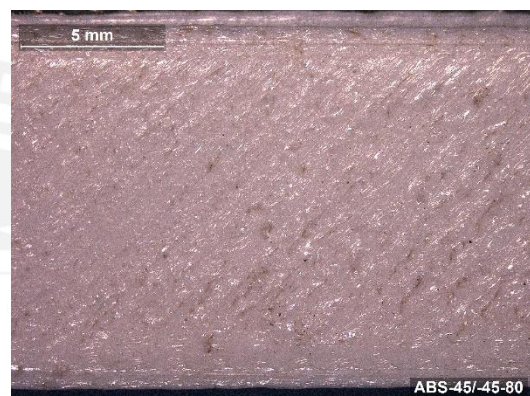
**Figura 49:** ABS - 0° - 100%



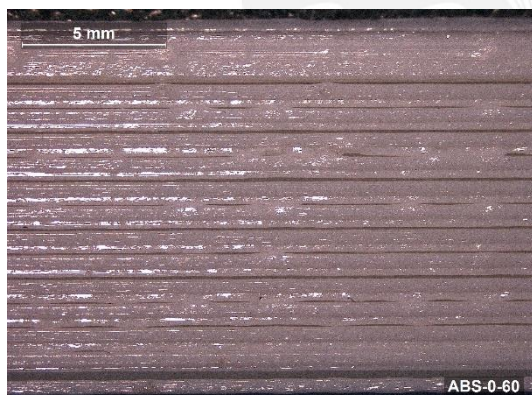
**Figura 50:** ABS - 45°/-45° - 100%



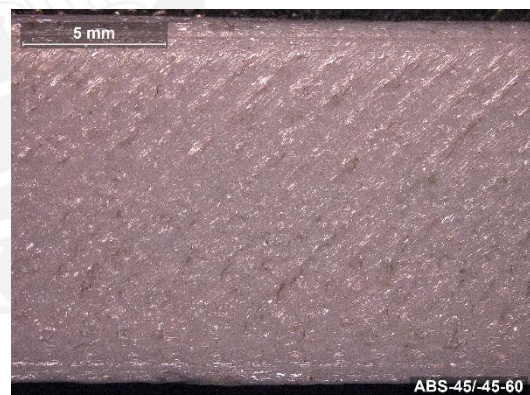
**Figura 51:** ABS - 0° - 80%



**Figura 52:** ABS - 45°/-45° - 80%



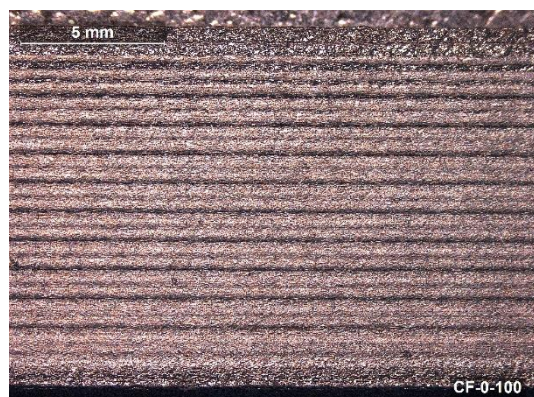
**Figura 53:** ABS - 0° - 60%



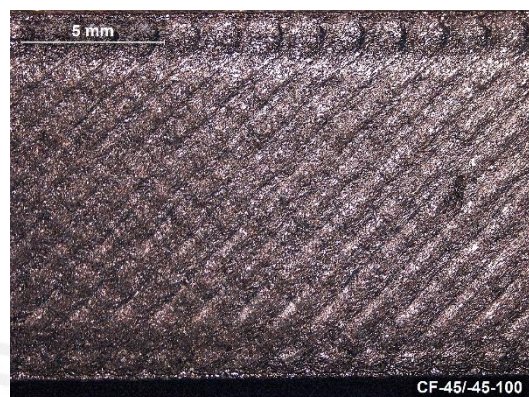
**Figura 54:** ABS - 45°/-45° - 60%

Las **Figuras 55 a 60** pertenecen al ABS + CF. En este material se pueden observar las imperfecciones del trazado desde porcentajes de relleno de 100 % (ver **Figuras 55 y 56**). Al igual que en el caso anterior, conforme se reduce el porcentaje de relleno los vacíos en el enmallado se incrementan. En la **Figura 59** se pueden apreciar tales vacíos a lo largo

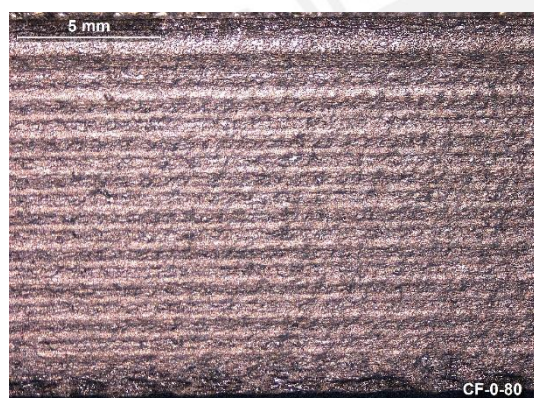
de los filamentos, sin embargo, se puede ver la fusión que existe entre los filamentos depositados.



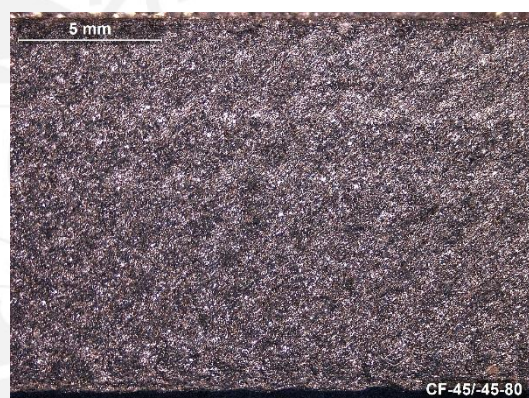
**Figura 55:** ABS + CF - 0° - 100 %



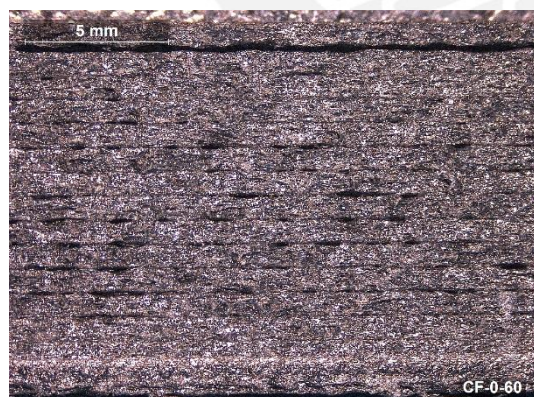
**Figura 56:** ABS + CF - 45°/-45° - 100 %



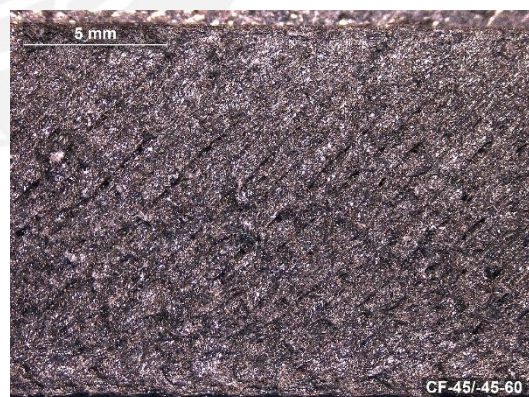
**Figura 57:** ABS + CF - 0° - 80 %



**Figura 58:** ABS + CF - 45°/-45° - 80 %



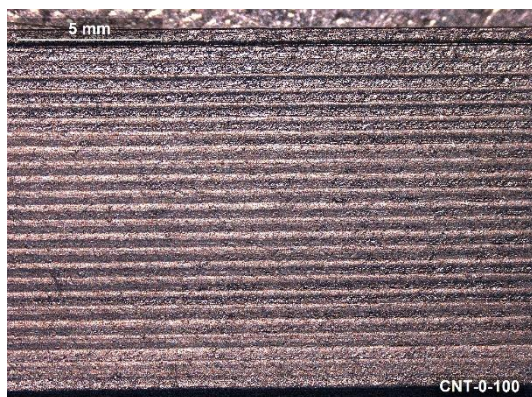
**Figura 59:** ABS + CF - 0° - 60 %



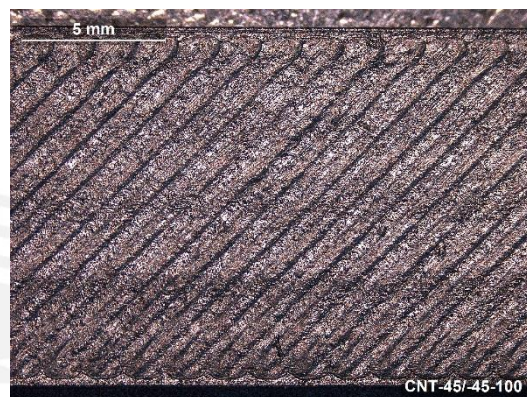
**Figura 60:** ABS + CF - 45°/-45° - 60 %

Finalmente, las **Figuras 61 a 66** pertenecen al ABS + CNT, donde al igual que los dos materiales anteriores se observa que a medida que se disminuye el porcentaje de relleno los vacíos aumentan, no obstante, en este caso el efecto es más drástico sobre, todo

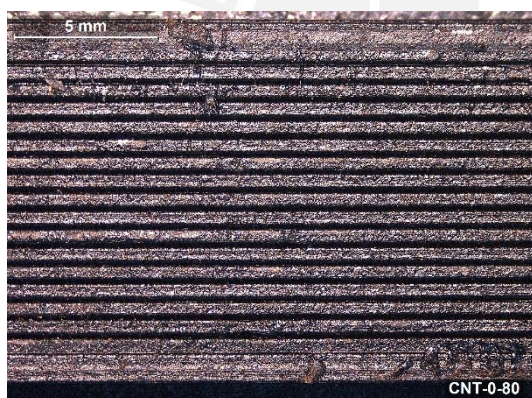
para la orientación cruzada. En las **Figuras 64 y 66** se puede observar claramente la estructura entrecruzada de los filamentos con vacíos más grandes conforme se disminuye el porcentaje de relleno. Cabe señalar que, a pesar de tener vacíos más severos que el ABS, no presenta falta de fusión entre los filamentos.



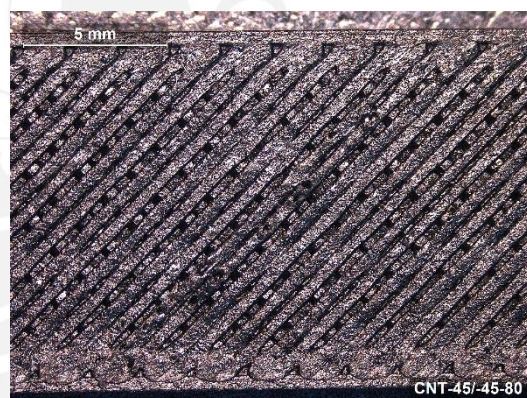
**Figura 61:** ABS + CNT - 0° - 100 %



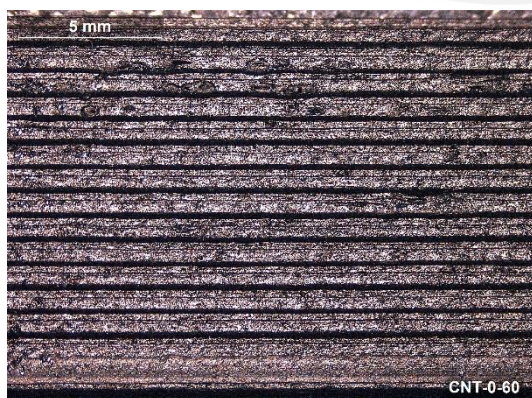
**Figura 62:** ABS + CNT - 45°/45° - 100 %



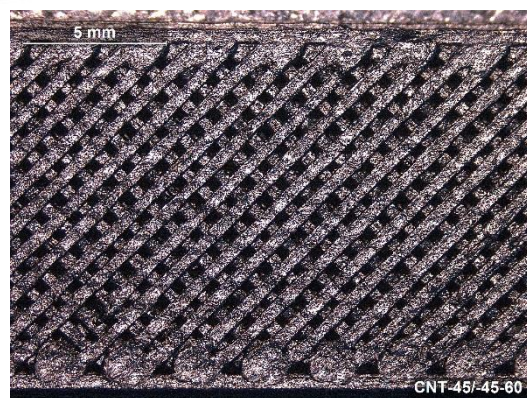
**Figura 63:** ABS + CNT - 0° - 80 %



**Figura 64:** ABS + CNT - 45°/45° - 80 %



**Figura 65:** ABS + CNT - 0° - 60 %



**Figura 66:** ABS + CNT - 45°/45° - 60 %

### 3.2. Densidad aparente

De acuerdo con los datos presentados en la **Tabla 7** las densidades aparentes de los materiales ensayados al 100 % de relleno oscila entre 912,64 y 1 015,52 kg/m<sup>3</sup>, estos valores son ligeramente menores al valor de densidad absoluta del ABS, que se encuentra en el rango de 1000 y 1100 kg/m<sup>3</sup>. Esta diferencia entre la densidad absoluta y aparente es el resultado de imperfecciones en el proceso de fabricación de las probetas **Figuras (49 – 50, 55 – 56, 61 – 62)**. Es por este motivo que aun al 100 % de relleno, la densidad aparente no iguala a la densidad absoluta.

De la misma manera como se visualiza en las **Figuras 49 a 66**, al reducir el porcentaje de relleno de 100% a 80% y subsecuentemente a 60%, la unión entre filamentos es cada vez menor, así como el aumento de vacíos en la matriz, mayor. Por lo tanto, se puede establecer una relación directa entre porcentaje de relleno y densidad. No obstante, la relación entre densidades no es lineal como sugiere el porcentaje de relleno. Es decir, a un porcentaje de relleno de 80 % la probeta no necesariamente tendrá una densidad 20 % menor a la de una probeta construida con 100% de relleno. En la **Tabla 7** para el ABS, un relleno del 80 %, representa el 90,1% de la densidad al 100 % de relleno y sucesivamente un relleno al 60 % representa un 72,2% de la densidad al 100 % de relleno. En resumen, el porcentaje de relleno como medida de la densidad no presenta tendencias lineales en ninguno de los materiales ensayados.

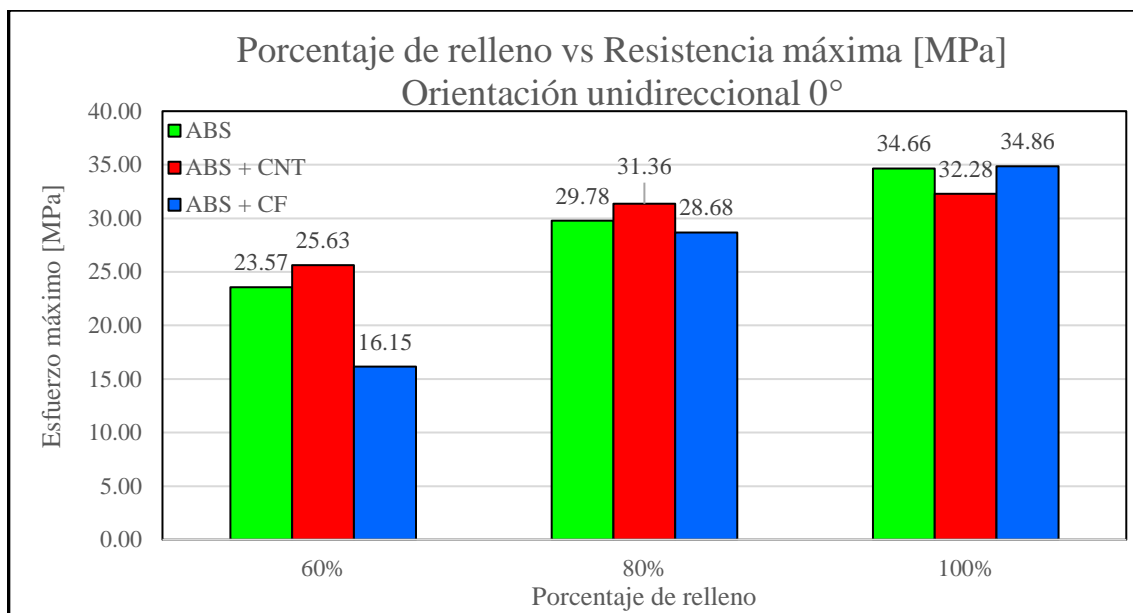
**Tabla 7:** Densidades aparente de materiales reforzados.

Material	Relleno	Densidad aparentes [kg/m <sup>3</sup> ]			
		Orientación	% de relleno	Orientación	% de relleno
		0°	%	45°/-45°	%
ABS	100 %	962,91	100	976,31	100
	80 %	867,56	90,1	878,05	89,94
	60 %	695,24	72,1	686,38	70,30
ABS + CNT	100 %	912,64	100	962,55	100
	80 %	841,45	92,2	842,94	87,57
	60 %	688,41	75,43	667,66	69,36
ABS + CF	100 %	972,59	100	1 015,52	100
	80 %	850,34	87,43	951,07	93,65
	60 %	641,91	65,9	646,56	63,67

### 3.3. Resultados de ensayos de tracción

#### 3.3.1. Esfuerzo máximo

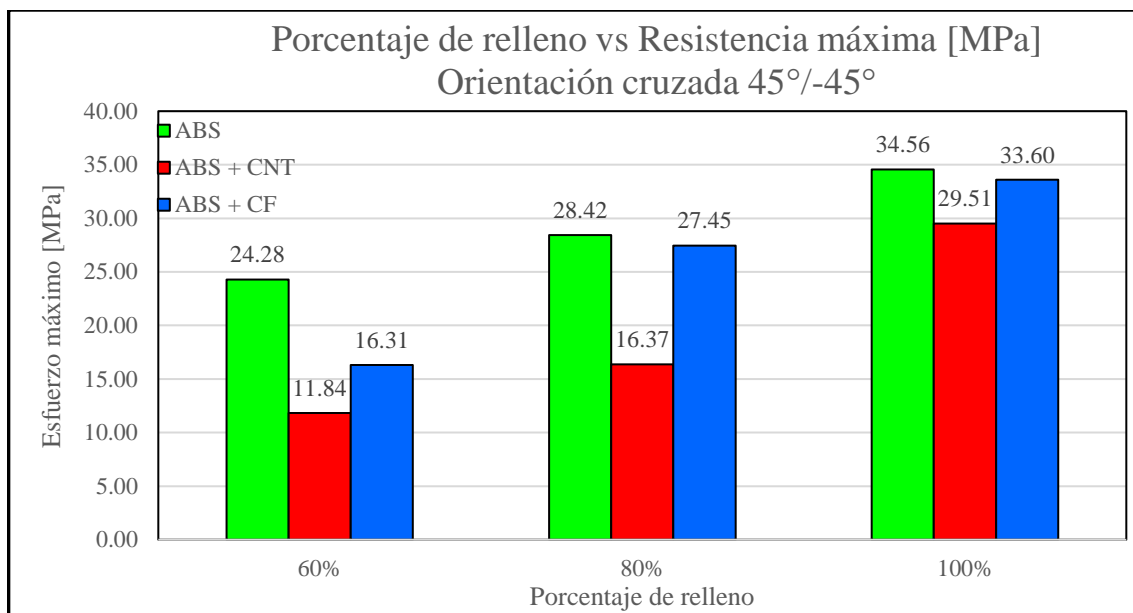
En la **Figura 67** se muestra el esfuerzo máximo para la orientación unidireccional, para todos los porcentaje de relleno. Los tres materiales evaluados poseen resistencias máximas similares en donde el ABS y el ABS + CF tienen los valores más altos con 34,66 MPa y 34,86 MPa, respectivamente, para un 100% de relleno. Para 80 % de relleno, el ABS + CNT presenta el mayor valor de resiste la tendencia se mantiene: el valor de resistencia máxima de los tres materiales disminuye y el ABS + CNT posee el mayor valor con 25,63 MPa.



**Figura 67:** Porcentaje de relleno vs Resistencia máxima [MPa] - Orientación unidireccional 0°

En la **Figura 68** se representan gráficamente los datos para la orientación cruzada.

Al 100 % de porcentaje de relleno la distribución de valores es similar a la **Figura 67**: el ABS y el ABS + CF posee los valores más altos con 34,56 MPa y 33,60 MPa respectivamente. Al 80 % de relleno, el ABS + CNT posee un valor de esfuerzo máximo de 16,37 MPa muy por debajo de los valores de ABS y ABS + CF. Esta caída del ABS + representa un 44,52 % de su valor. Finalmente, al 60 % de relleno el ABS tiene valores superiores al ABS + CNT y ABS + CF en donde este último tuvo una caída pronunciada de 40,59% hasta un valor del 16,31 MPa.

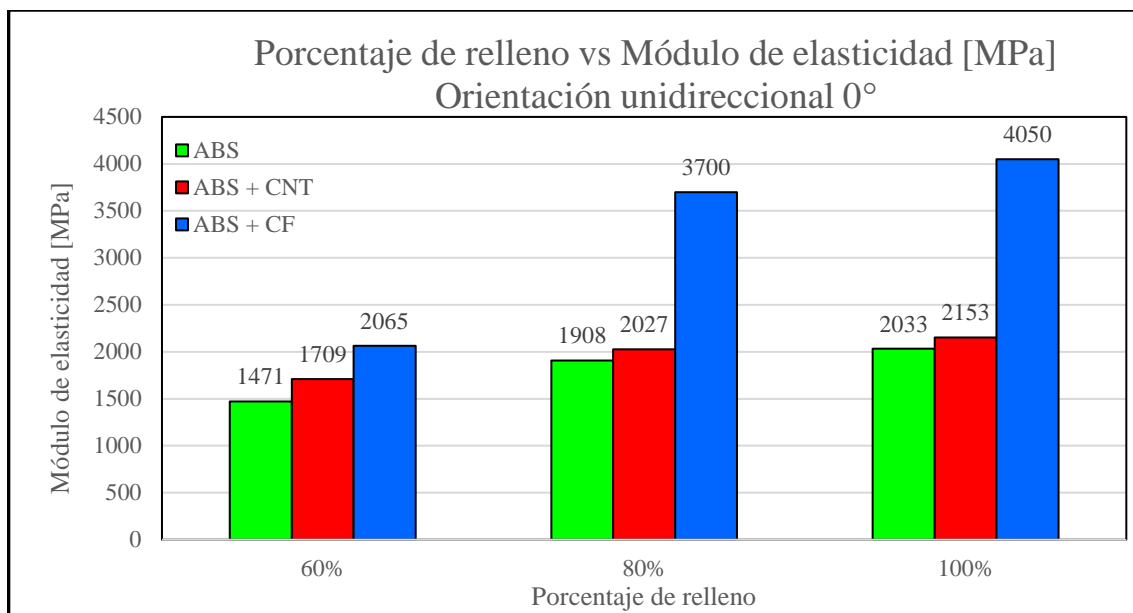


**Figura 68:** Porcentaje de relleno vs Resistencia máxima [MPa] - Orientación cruzada 45°/-45°

Comparativamente entre las **Figura 67 y 68**, para el ABS + CNT, existe una diferencia entre los valores por orientación, en donde la orientación cruzada presenta los mayores valores de esfuerzo máximo. Por otro lado, los valores del ABS son similares para la orientación cruzada u orientación unidireccional. En conclusión, la reducción del porcentaje de relleno y por lo tanto de la densidad tienen correlación con la disminución del esfuerzo máximo de los materiales –ello, no obstante, a diferentes ratios–.

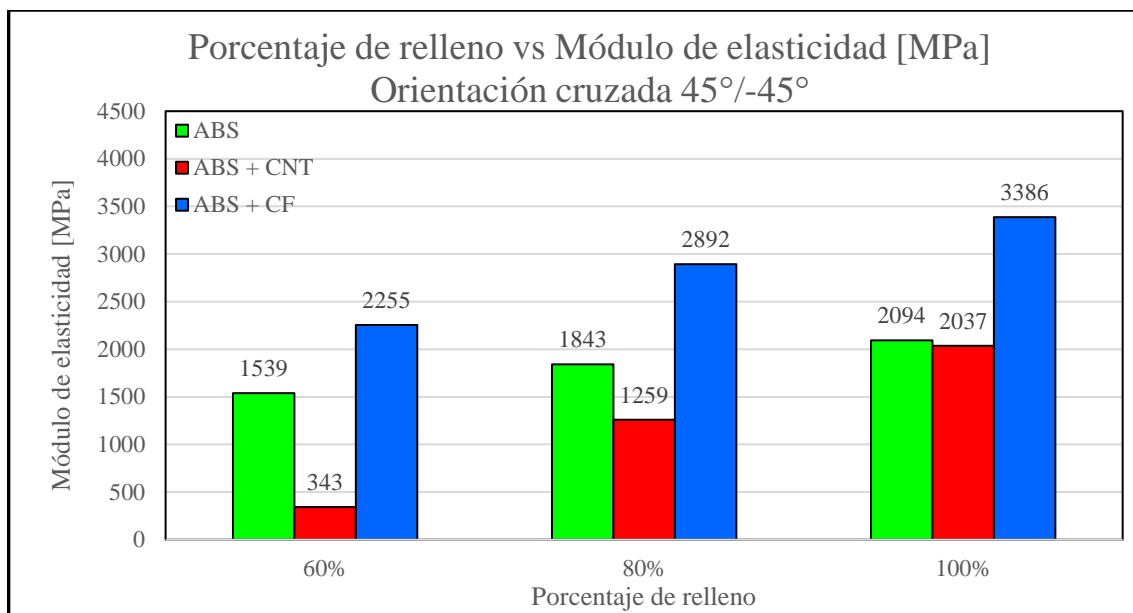
### 3.3.2. Módulo de elasticidad

En la **Figura 69**, el ABS + CF tiene valores superiores de módulo de elasticidad en comparación al ABS + CNT y al ABS, en todos los porcentajes de relleno evaluados. Para 100 % de relleno, el valor de módulo de elasticidad del ABS + CF es casi el doble que los valores del ABS y ABS + CNT con 4050 MPa. Para 60 % de relleno los valores de módulo de elasticidad del ABS + CNT y del ABS decrecen a un ratio muy cercano uno del otro. El ABS + CF presenta una disminución del 44,18% de su módulo de elasticidad en relación al porcentaje de relleno de 100% y de 60%.



**Figura 69:** Porcentaje de relleno vs Módulo de elasticidad [MPa] - Orientación unidireccional 0°

En la **Figura 70**, el ABS + CF posee los valores más altos de módulo de elasticidad a lo largo de todos los puntos ensayados. Por otro lado, para el ABS y ABS + CNT los valores de módulo de elasticidad son similares a 100% de relleno, sin embargo, conforme el porcentaje de relleno disminuye la diferencia entre los dos módulos de elasticidad se incrementa: a 60% de relleno el ABS posee 1539 MPa y el ABS + CNT 343 MPa. Finalmente, a lo largo de la disminución del porcentaje de relleno el ABS es el material en el cual el módulo de elasticidad se ve menos disminuido en un 11,98% al 80% y un 16,49% a un 60% de relleno.



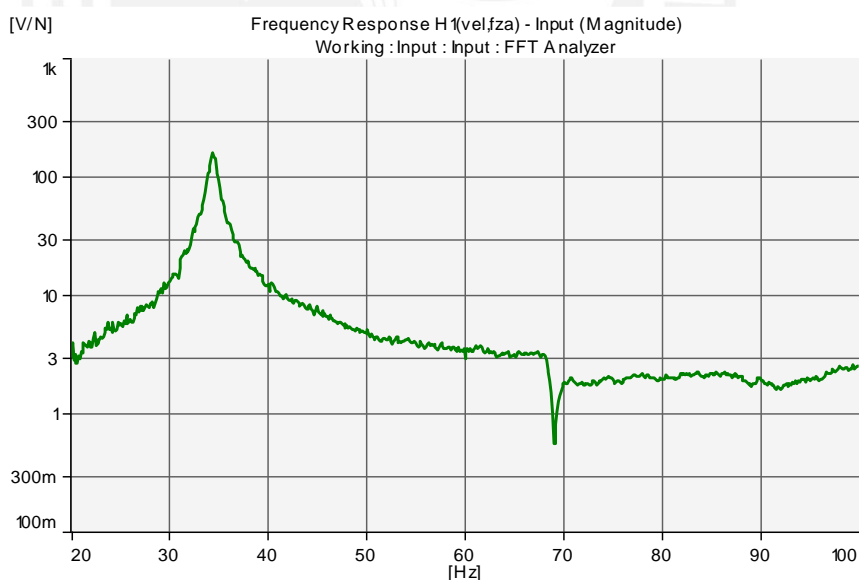
**Figura 70:** Porcentaje de relleno vs Módulo de elasticidad [MPa] - Orientación cruzada 45°/-45°

De acuerdo a las **Figuras 69 y 70**, los valores a 100% de relleno presentan una coherencia con los valores recopilados en la investigación de Maz [1]. En segundo lugar, la orientación unidireccional presenta mayores valores de módulo de elasticidad que la orientación cruzada. En tercer lugar, existe una relación proporcional entre el porcentaje de relleno y el módulo de elasticidad, sin embargo, el ratio de disminución del módulo de elasticidad en función al porcentaje de relleno es diferente para cada material. Cabe resaltar que el módulo de elasticidad del ABS parece no ser afectado en gran medida por la reducción de porcentaje de relleno. De la misma manera el ABS + CF posee los valores más altos para las dos orientaciones siendo la orientación unidireccional aquella en la cual se tienen los valores más altos.

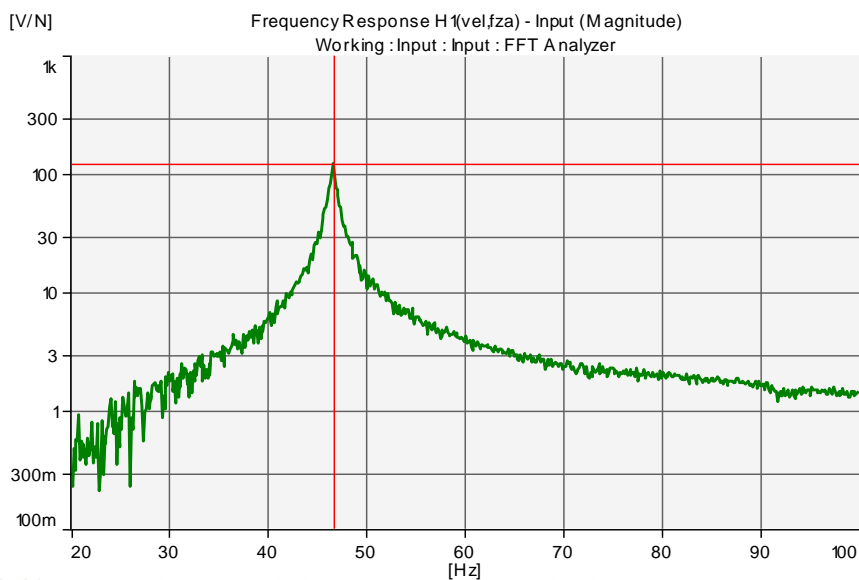
### 3.4. Ensayo de amortiguamiento

Dentro del rango de 0 a 100 Hz, se identificó en todas las mediciones, un pico referente a la primera frecuencia natural del sistema. Aquella frecuencia se encuentra aproximadamente en el rango de 30 a 40 Hz, obteniéndose los mayores valores para el

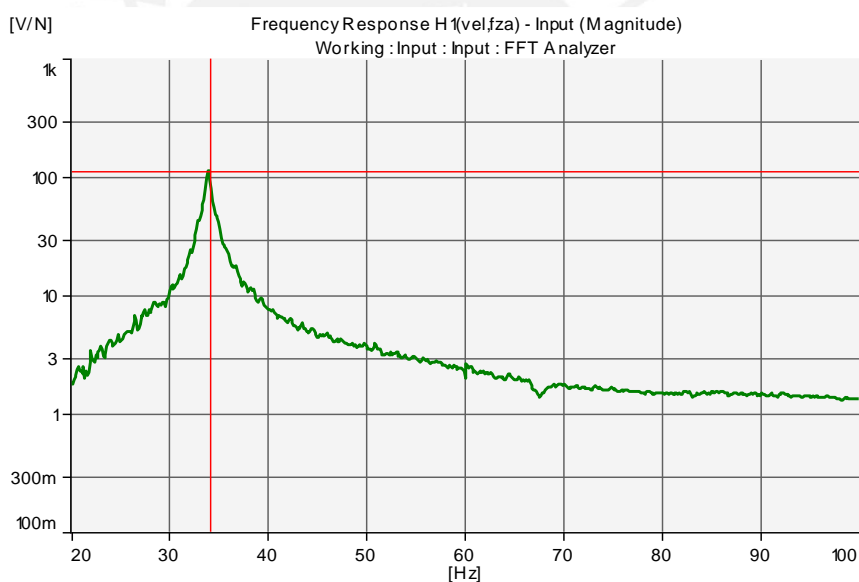
ABS + CF y los menores para el ABS + CNT. Como ejemplo se puede apreciar las **Figuras 71 a 73**, para orientación  $0^\circ$  a 60% de relleno y las frecuencias naturales de 34,38 Hz, 46,63 Hz y 33,88 Hz para el ABS, ABS + CF y el ABS + CNT respectivamente. De la misma manera se puede verificar visualmente que la capacidad de amortiguamiento de los materiales evaluados es pequeña dada el área reducida por debajo de la curva, a 3dB, en otras palabras, la esbeltez del pico. Tal observación se confirma con la data recopilada en la **Tabla 8** donde el mayor valor del ratio de amortiguamiento es de 1,40% para el ABS + CNT y los demás valores rondan el 1,00%. Si bien los valores de ratio de amortiguamiento son bajos, comparados con otros materiales como el caucho ( $\zeta \approx 5,00\%$ ) a simple vista, este análisis se debe de realizar en conjunto con los valores de módulo de elasticidad, análisis que se realiza en el **Capítulo 3.5**.



**Figura 71:** ABS en orientación  $0^\circ$  al 60% de relleno



**Figura 72:** ABS + CF en orientación  $0^\circ$  al 60% de relleno



**Figura 73:** ABS + CNT en orientación  $0^\circ$  al 60% de relleno

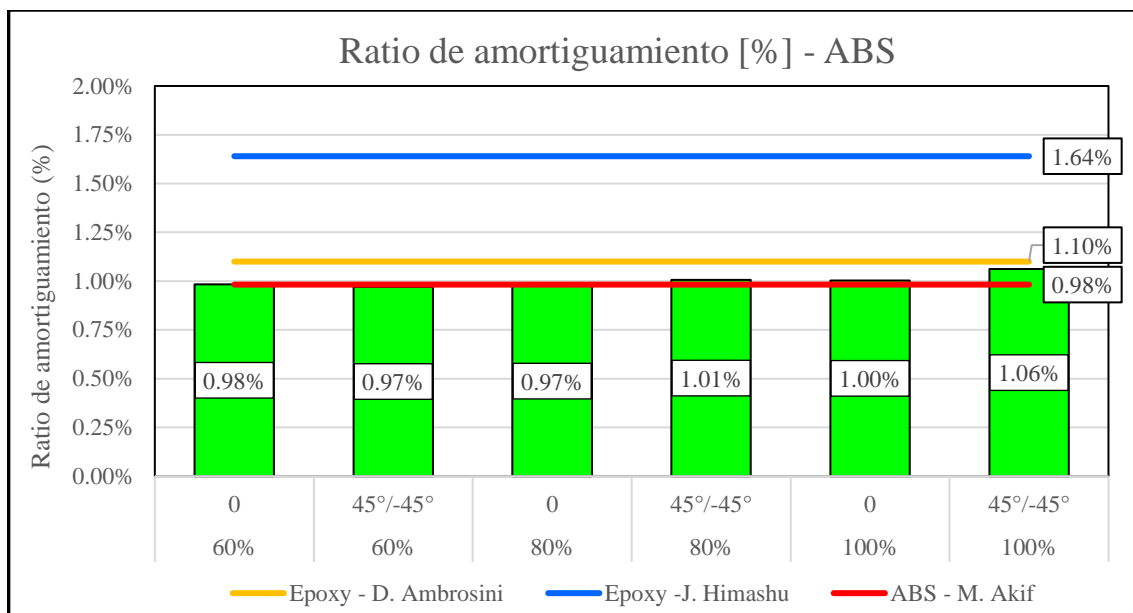
En segundo lugar, se muestran las **Figuras 70 a 87**<sup>2</sup> elaboradas a partir de las **Tablas 7 y 8** que explican la relación entre los ratios de amortiguamientos y valores de densidad para cada material ensayado.

<sup>2</sup> Excepto la **Figura 83** que pertenece a [46].

**Tabla 8:** Resultados de Ratio de amortiguamiento [%]

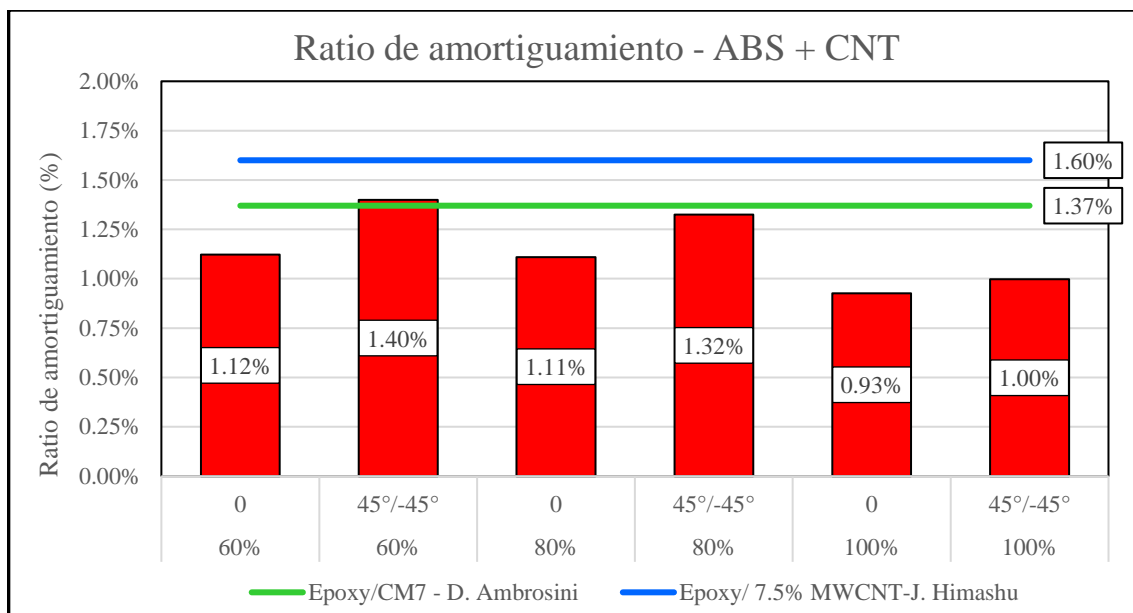
Material	Relleno	Ratio de amortiguamiento [%]	
		0°	45°/-45°
ABS	100 %	1,00	1,06
	80 %	0,97	1,01
	60 %	0,98	0,97
ABS + CNT	100 %	0,93	1,00
	80 %	1,11	1,32
	60 %	1,12	1,40
ABS + CF	100 %	0,72	0,52
	80 %	0,75	0,86
	60 %	0,71	1,05

En la **Figura 74** se pueden observar los valores de ratio de amortiguamiento pertenecientes al ABS. Según la investigación titulada *Free vibration analyses of ABS rectangular plates with completely free boundaries* realizada por M. Akif a placas macizas de ABS [45], estos resultados de amortiguamiento fueron muy semejantes (**Figura 74** línea naranja y roja) a los realizados en esta tesis: de acuerdo a M. Akif el ratio de amortiguamiento para el ABS es de 0,982%. Para los especímenes con porcentaje de relleno al 100 %, los más cercanos en densidad a las placas macizas de ABS de la investigación de M. Akif [45], se reporta un 1,003% y un 1,062% para orientación unidireccional y orientación cruzada respectivamente.



**Figura 74:** Ratio de amortiguamiento [%] – ABS

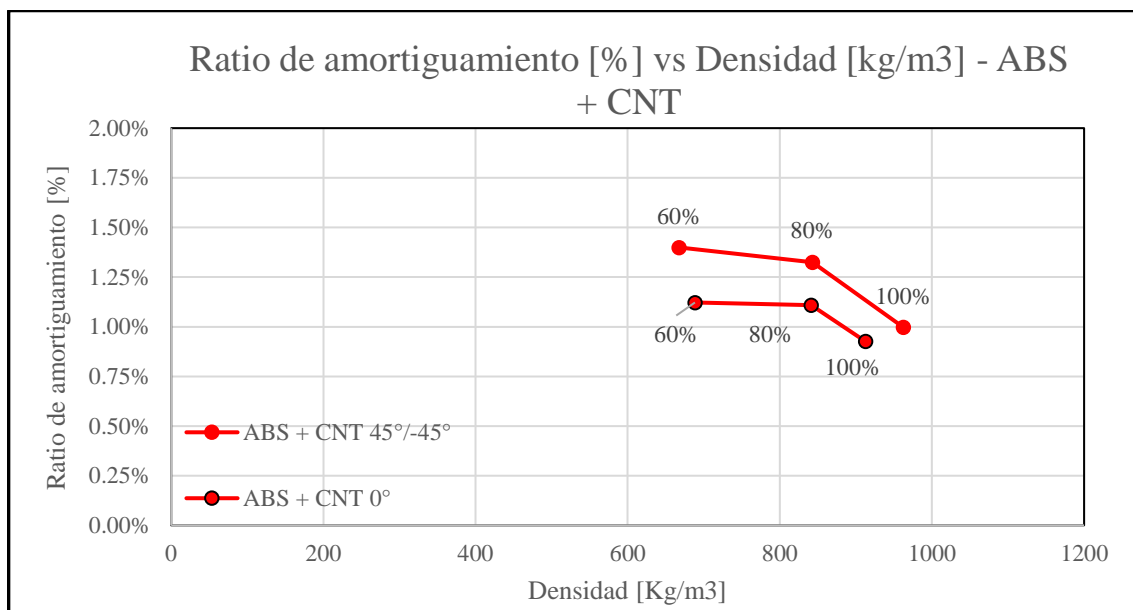
En la **Figura 75**, se muestran los valores obtenidos para el ABS + CNT. Se observa que los menores valores alcanzados son de 0,93 % y de 1,00 % para porcentajes de relleno al 100 % en orientación unidireccional y cruzada respectivamente. Los mayores valores alcanzados por orientación son de 1,40 % y 1,12 % para orientación cruzada y orientación unidireccional respectivamente a 60 % de relleno. Asimismo, en la **Figura 75** se puede observar los valores recopilados de investigaciones previas realizadas con matriz epoxy reforzada con fibra de carbono y nanotubos de carbono por D. Ambrosini [36] y N. Jalili [33], donde se determinaron los valores de 1,37 % y 1,60 %, que son respectivamente ratios ligeramente superiores a los obtenidos en esta tesis. Esta diferencia es debida a que la matriz de resina epoxy, utilizada en las investigaciones de Ambrosini y Jalili, presenta mayor valor de ratio de amortiguamiento que el ABS (**Figura 73**).



**Figura 75:** Ratio de amortiguamiento - ABS + CNT

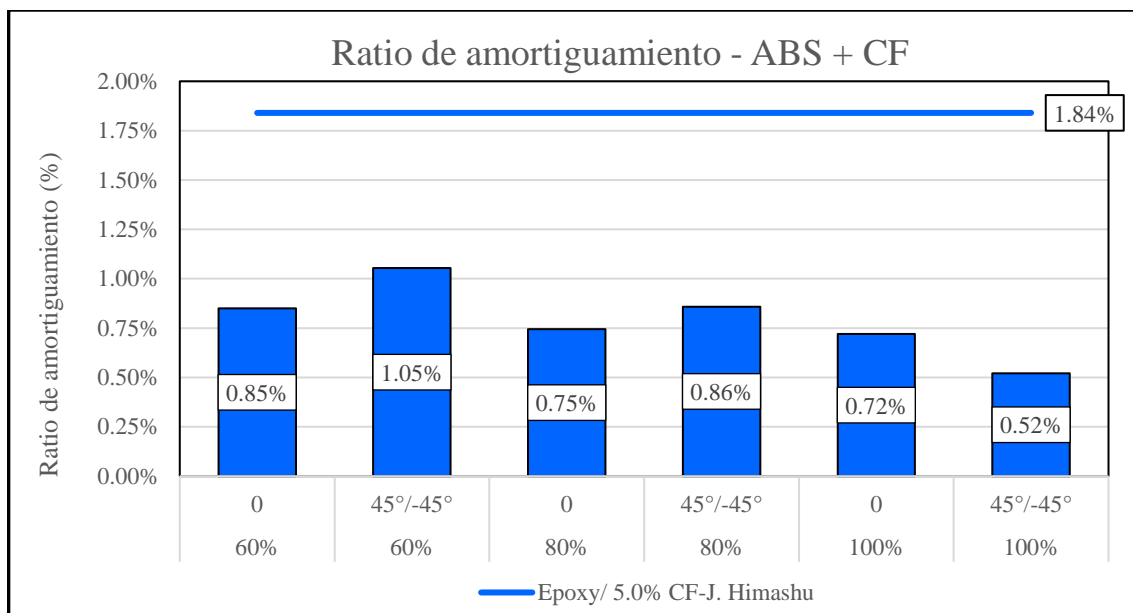
En la **Figura 76** es evidente la predominancia de los valores de ratio de amortiguamiento de las probetas con orientación cruzada sobre las de orientación unidireccional. Asimismo, la tendencia de aumento del ratio de amortiguamiento no es similar en los primeros puntos evaluados: para orientación unidireccional aumenta 19,25% y en orientación cruzada, 32,89% para el mismo rango observador (de 100% a 80% de relleno). Mismo escenario para el siguiente punto a (de 80% a 60% de relleno), en donde el ratio de amortiguamiento aumenta un 1,18% y un 5,62% en orientación unidireccional y cruzada respectivamente. Análogamente una correlación entre el módulo de elasticidad y el amortiguamiento puede ser observada en las diferentes orientaciones. Se puede advertir que para la orientación cruzada el valor del módulo de elasticidad disminuyó considerablemente, así como el ratio de amortiguamiento aumentó (**Figura 70**). No obstante, para la orientación unidireccional el módulo de elasticidad no presentó una variación considerable a lo largo de los porcentajes de relleno evaluados (**Figura 71**)

por lo que el valor de ratio de amortiguamiento presenta un aumento de 100% a 80% de relleno, pero a 60% no hay cambios (aumento del 1,18%).



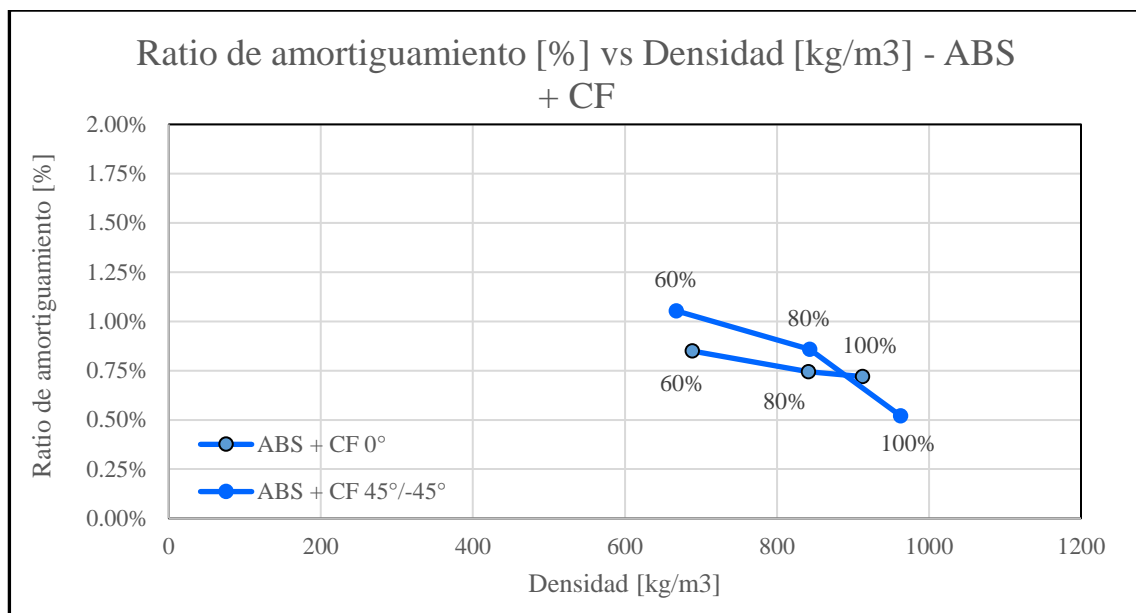
**Figura 76:** Ratio de amortiguamiento [%] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CNT

En la **Figura 77**, se grafican los valores de ratio de amortiguamiento para el ABS + CF. De acuerdo a la investigación de N. Jalili [33] el valor de la ratio de amortiguamiento del compuesto Epoxy + CF es de 1,84% sin embargo, los valores recolectados en esta tesis son menores, siendo 1,05% el valor de ratio de amortiguamiento más alto.



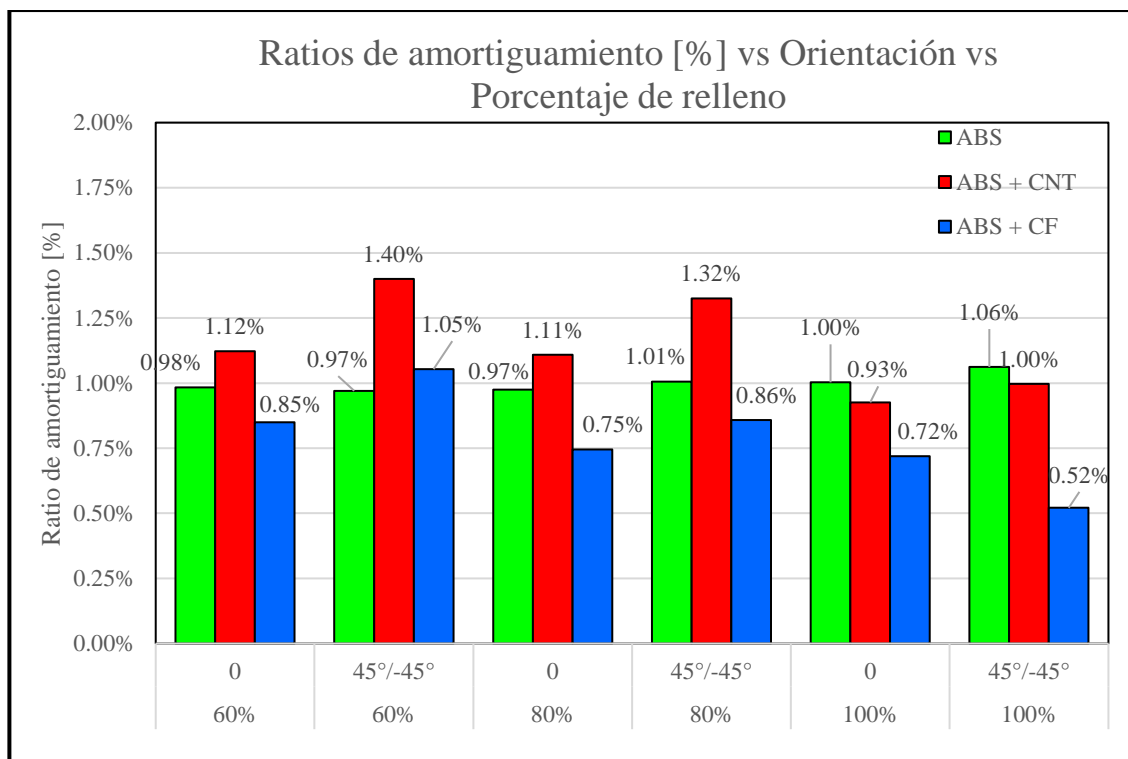
**Figura 77:** Ratio de amortiguamiento - ABS + CF

En la **Figura 78** es evidente que para las dos orientaciones el valor del ratio de amortiguamiento aumenta conforme disminuye el porcentaje de relleno. Para orientación unidireccional el ratio de amortiguamiento aumenta en 3,52 % y para el siguiente punto aumenta un 14,05%. Para orientación cruzada el ABS + CF tiene una tendencia más pronunciada que la orientación unidireccional: de 100% de relleno a 80% el ratio de amortiguamiento aumentó un 64,73% y para el siguiente punto un 22,76%. Asimismo, se puede evidenciar una predominancia en términos de amortiguamiento de la orientación cruzada por sobre la orientación unidireccional al igual que en el ABS + CNT (**Figura 76**).



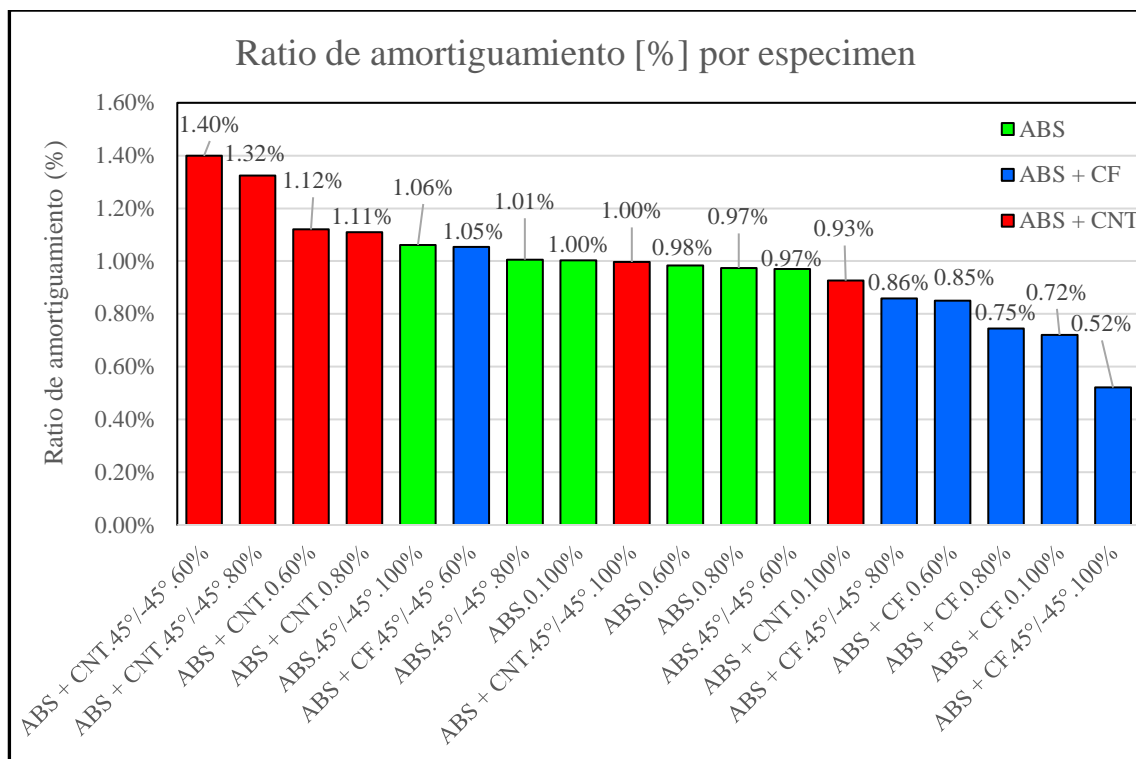
**Figura 78:** Ratio de amortiguamiento [%] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CF

En la **Figura 79** se pueden apreciar los ratios de amortiguamiento de acuerdo a su orientación y porcentaje de relleno para todos los materiales ensayados. En primer lugar, el ABS + CNT posee los valores más altos en cada una de los porcentajes de relleno: 1,40% para 60% y 1,32% para 80%. Sin embargo, al 100% de relleno el ABS supera al ABS + CNT. En este caso en particular el ABS + CNT al 100% no presenta características extraordinarias de amortiguamiento. Sin embargo, conforme se reduce su porcentaje de relleno y por lo tanto su módulo de elasticidad las propiedades de amortiguamiento aumentan considerablemente. En segundo lugar, la orientación cruzada, en general, presenta los mayores valores de ratio de amortiguamiento. Para orientación unidireccional se aprecia una ligera tendencia al aumento de los valores de ratio de amortiguamiento para ABS + CNT y ABS + CF, sin embargo, los valores no llegan a alcanzar a los de su orientación par.



**Figura 79:** Ratios de amortiguamiento vs Orientación vs Porcentaje de relleno

En la **Figura 80**, se observa un consolidado de los ratios de amortiguamiento para el ABS + CNT, el ABS + CF y ABS. Es así que identificamos el valor de 1,40% como el más alto recopilado el cual pertenece al ABS + CNT en orientación cruzada a un 60% de relleno mientras que el más bajo, de 0,52%, pertenece al ABS + CF en orientación cruzada y 100% de porcentaje de relleno. En líneas generales el ABS + CNT está presente en todo el percentil 80 de los valores recopilados, mientras que el ABS + CF queda relegado en su totalidad a los valores más bajos. Este comportamiento guarda cierta relación con los altos valores de módulo de elasticidad registrados en las pruebas de tracción (**Capítulo 3.3**), análogamente los valores de mayor módulo de elasticidad corresponden a los porcentajes de relleno de 100% que como se puede observar en la **Figura 80** son los de menor valor de ratio de amortiguamiento de toda la investigación.

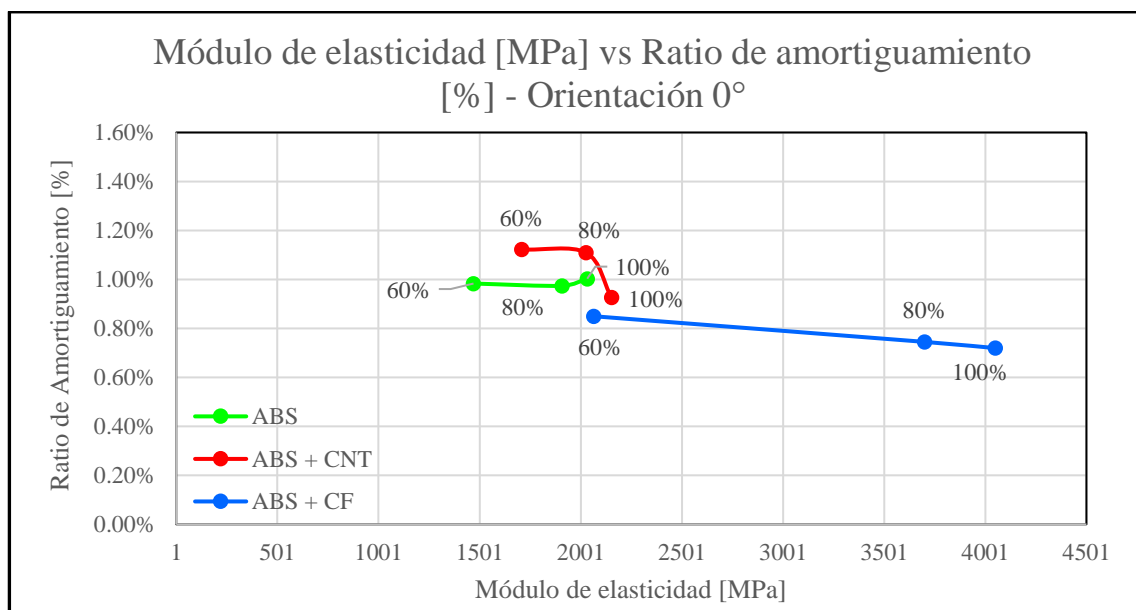


**Figura 80:** Ratio de amortiguamiento por espécimen

### 3.5. Módulo de elasticidad y amortiguamiento

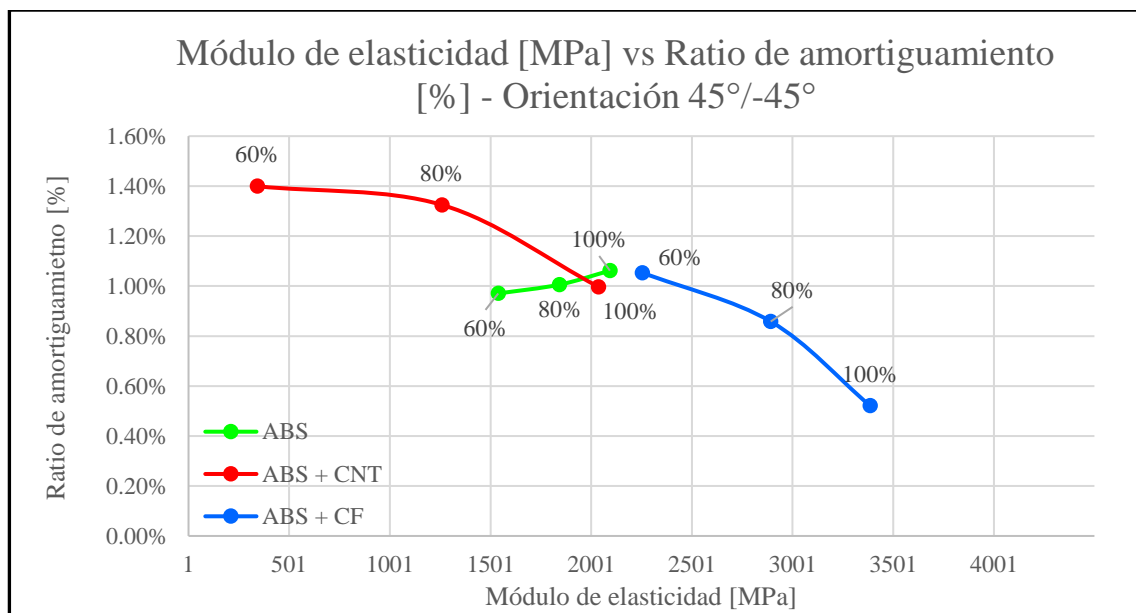
De acuerdo a los resultados presentados anteriormente se distribuyeron los valores de ratio de amortiguamiento en función de los valores de módulo de elasticidad para cada uno de los especímenes de acuerdo a su orientación. En la **Figura 81**, se puede visualizar el aumento de ratio de amortiguamiento conforme se reduce el módulo de elasticidad. Para el caso del ABS + CNT de 100% de relleno a 80% de relleno, el ratio de amortiguamiento tuvo un aumento considerable en comparación con los demás materiales. Es probable que el repentino aumento se deba a la aparición de vacíos y faltas de fusión entre los filamentos que adhieran un mecanismo extra de disipación de energía por fricción, como se pudo ver en la inspección micrográfica (**Capítulo 3.1**). Para el siguiente punto, de 60% de relleno, el aumento del ratio de amortiguamiento es mínimo: 1,18%. Caso contrario se presenta en el ABS, cuyo aumento de ratio de amortiguamiento frente a la poca disminución del

módulo de elasticidad es casi nula para 80% y 60% de relleno. Finalmente, el ABS + CF si bien presenta una disminución considerable del módulo de elasticidad de 100% a 80% de relleno solo logra aumentar un 18,07% a costas de un 49,00% de su módulo de elasticidad.



**Figura 81:** Módulo de elasticidad [MPa] vs Ratio de amortiguamiento [%] – Orientación 0°

En la **Figura 82**, se grafican los valores de amortiguamiento y módulo de elasticidad para orientación cruzada. Son evidentes las tendencias presentes en el ABS + CF y en el ABS + CNT, en donde conforme disminuye el módulo de elasticidad se presenta un aumento del ratio de amortiguamiento. Para el ABS + CNT, en total para una reducción del 83,18% del módulo de elasticidad se obtuvo un aumento del 40,37 % de ratio de amortiguamiento. Asimismo, para el ABS + CF, para una reducción de 33,40 % en el módulo de elasticidad, el ratio de amortiguamiento aumentó 102,22%, al pasar de 100% de relleno a 60% de relleno. Finalmente, debido a la poca variación del módulo de elasticidad en el ABS no se puede definir una tendencia.



**Figura 82:** Módulo de elasticidad [MPa] vs Ratio de amortiguamiento [%] – Orientación 45°/-45°

En la **Figura 83** se presenta la ubicación de los valores de ratio de amortiguamiento y de módulo de elasticidad en el mapa de rigidez – amortiguamiento. El mapa se divide en dos secciones (por la línea de 0.6 GPa), en los materiales que tienen altas propiedades mecánicas y de amortiguamiento y los que no. De acuerdo a la ubicación de los materiales ensayados: verde para ABS, rojo para ABS + CNT y azul para ABS + CF, los materiales se encuentran cercanos al área de plásticos duros y sus relaciones entre propiedades mecánicas y de amortiguamientos son similares. Por otro lado, si bien en el área por sobre la línea de 0.6 GPa predominan materiales experimentales, se puede decir que el PMMA, el polietileno y otros materiales poseen mejores características que el ABS y el ABS reforzado.

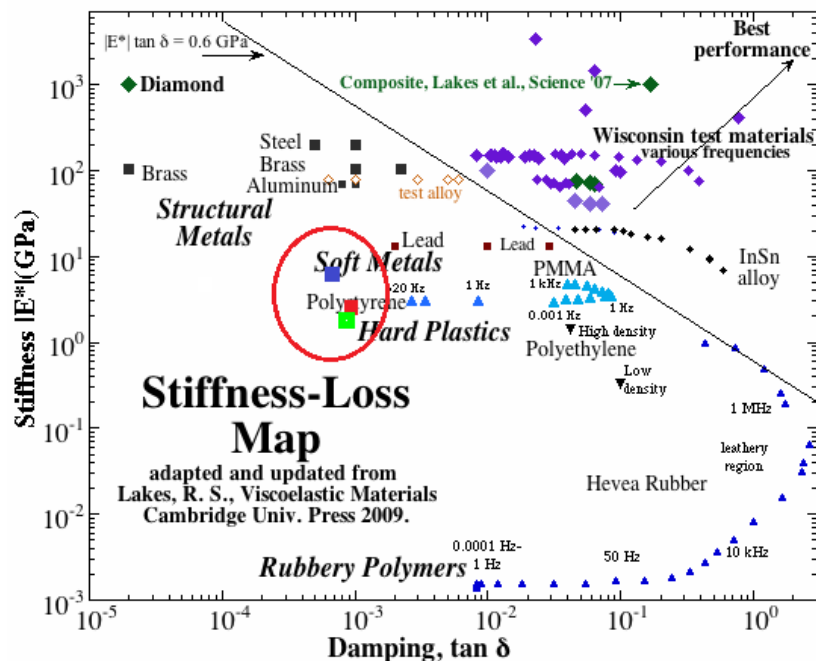
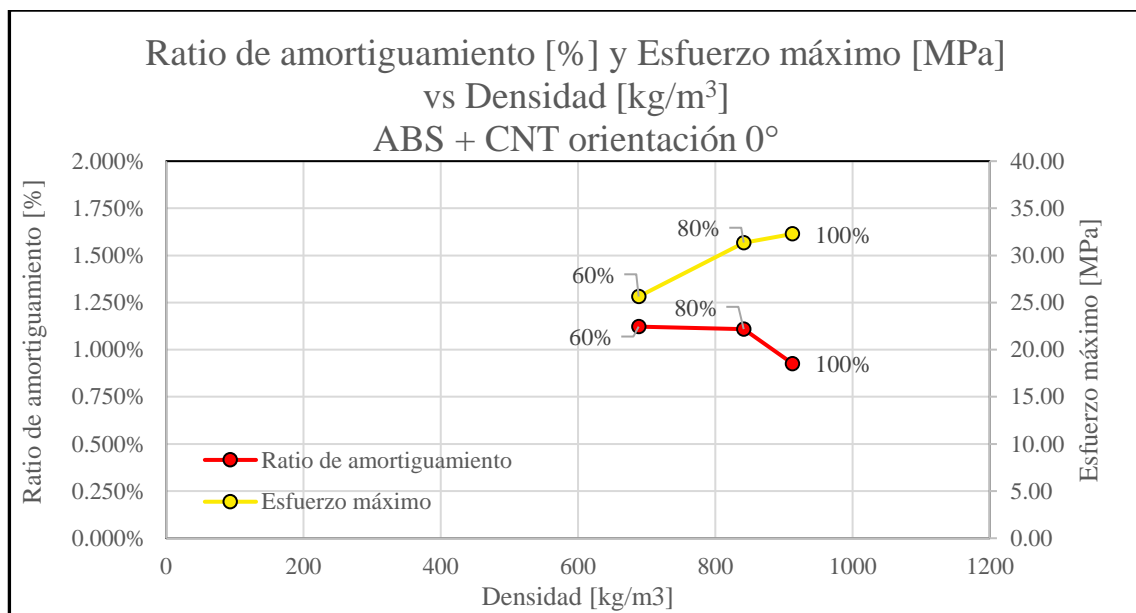


Figura 83: Mapa de rigidez – amortiguamiento [46]

### 3.6. Esfuerzo máximo y amortiguamiento

En la **Figura 84**, para el ABS + CNT en orientación unidireccional, se aprecia una disminución del esfuerzo máximo en los primeros puntos de medición (100% de relleno a 80% de relleno) de 2,85%; mientras que el ratio de amortiguamiento presentó un aumento del 19,75%. Sin embargo, para el siguiente punto (60% de relleno) el esfuerzo máximo se redujo un 18,26% y el ratio de amortiguamiento aumentó un 1,18%. Es así que se obtiene un incremento importante del ratio de amortiguamiento a costas de una pérdida de propiedades mecánicas muy pequeña para valores de densidad cercanos al 100% de relleno.

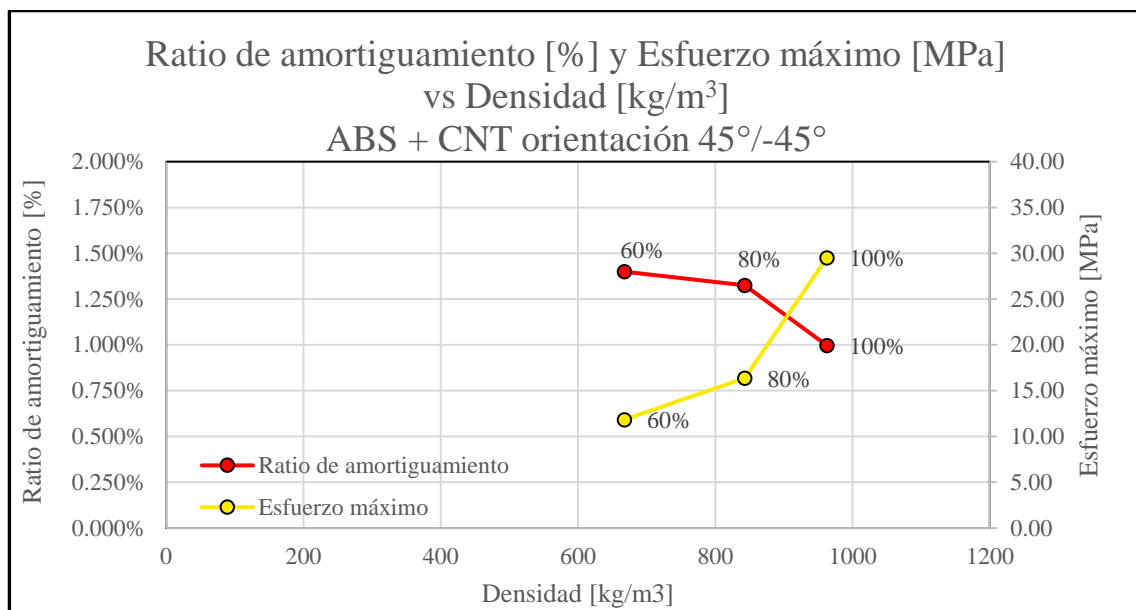


**Figura 84:** Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CNT Orientación 0°

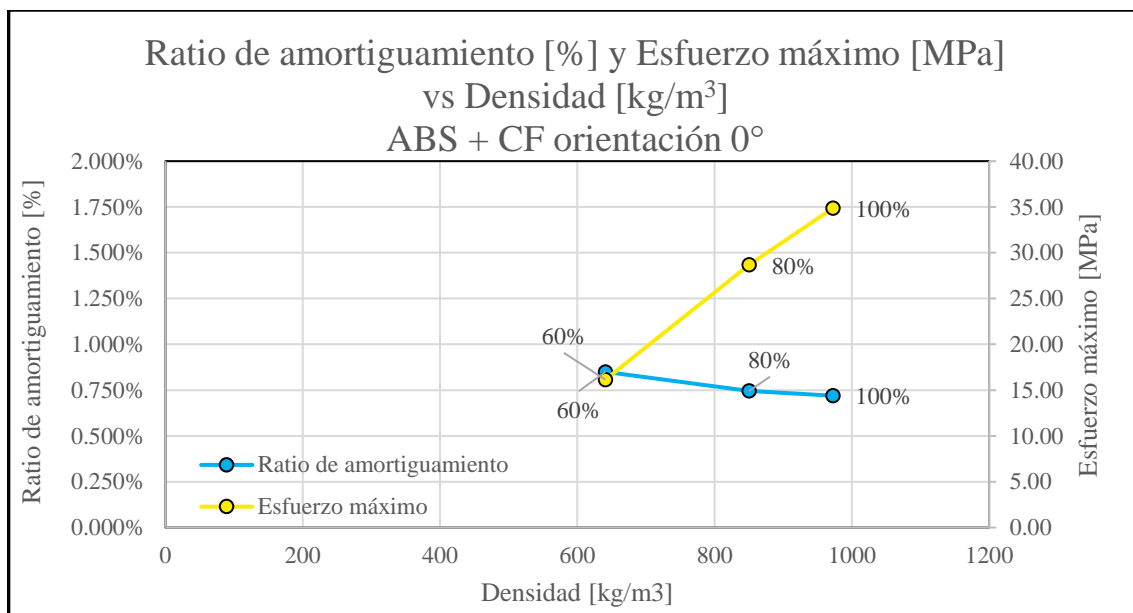
En la **Figura 85** para el ABS + CNT en orientación cruzada, en los primeros puntos de medición (100% de relleno y 80% de relleno) el esfuerzo máximo se reduce un 44,52% y el ratio de amortiguamiento aumenta un 32,89%. Para el último punto, de 60% de relleno el esfuerzo máximo se reduce un 27,68% frente a un aumento de 5,62% de ratio de amortiguamiento. De la misma manera como para ABS + CNT en orientación unidireccional el incremento del ratio de amortiguamiento es mayor a valores más cercanos del 100% de relleno.

En la **Figura 86**, se grafica el ratio de amortiguamiento y esfuerzo máximo para ABS + CF en orientación unidireccional. Se puede notar que el esfuerzo máximo se reduce un 17,73% frente a un aumento de 3,52% de ratio de amortiguamiento, a diferencia de los siguientes puntos en la gráfica (de 80% de relleno a 60%) en donde el esfuerzo se reduce un 43,7% mientras que el ratio de amortiguamiento aumenta 14,05%. Este aumento del ratio de amortiguamiento reside en la reducción significativa del módulo de elasticidad de

80% de relleno a 60% de relleno frente a la poca variación para 100% de relleno a 80% de relleno en la **Figura 71**.

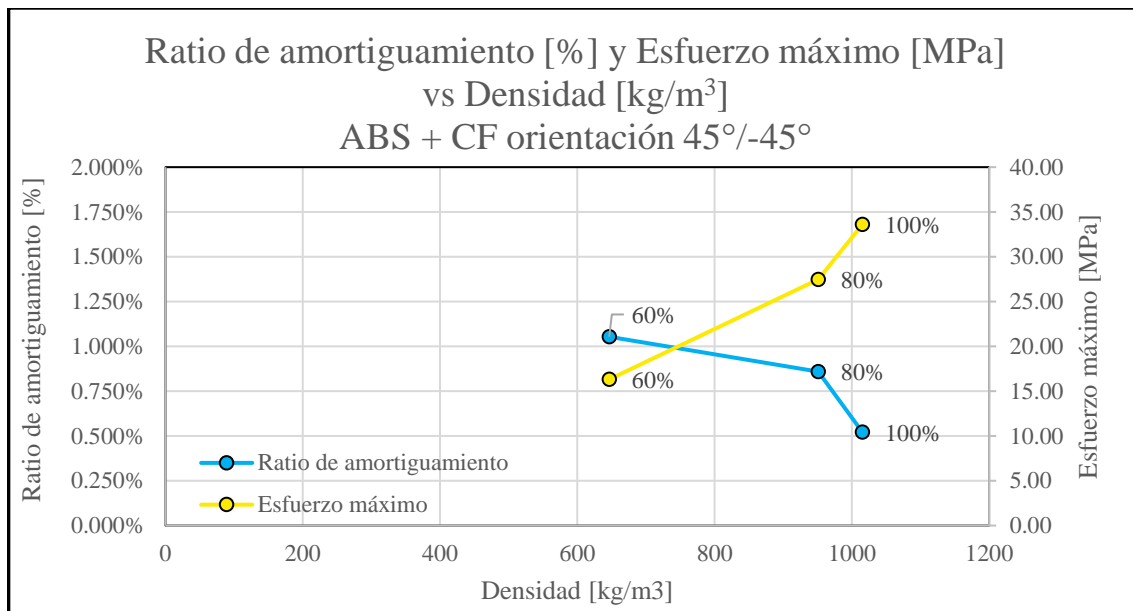


**Figura 85:** Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CNT  
Orientación 45°/-45°



**Figura 86:** Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CF  
Orientación 0°

Finalmente, en la **Figura 87**, para ABS + CF en orientación cruzada el ratio de amortiguamiento aumenta un 64,73% frente a una disminución del 18,30% del esfuerzo máximo en 80% de relleno. Y para 60% de relleno la disminución del esfuerzo máximo es de un 40,59% para alcanzar un aumento de 22,76% de ratio de amortiguamiento. Para este caso en porcentajes de relleno cercanos al 100% se obtiene un aumento mayor de las propiedades de amortiguamiento frente a una menor disminución del esfuerzo máximo.



**Figura 87:** Ratio de amortiguamiento [%] y Esfuerzo máximo [MPa] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>] - ABS + CF  
Orientación 45°/-45°

## CAPÍTULO 4

### 4. Conclusiones

- El ABS + CNT, posee valores de ratio de amortiguamiento de hasta 1,40% siendo el material con valores más altos de los tres ensayados; los valores del ABS sin refuerzo se encuentran en el rango de 1.06% y 0.97%, y el ABS + CF dentro del rango de 0.86% y 0.52% (con excepción de 1.05%), siendo este material el de menor capacidad de amortiguamiento. Por lo tanto, los refuerzos de nanotubos de carbono lograron aumentar las propiedades de amortiguamiento del ABS.
- A pesar que el ABS + CNT posee los valores más altos de amortiguamiento de la investigación, los valores alcanzados no son comparables con los de otros polímeros como el polietileno o el PMMA ( $\zeta \approx 0,4$ ), que cuentan con mayores valores de amortiguamiento y mejores propiedades mecánicas. Asimismo, estos otros materiales pueden ser utilizados también en impresión 3D.
- En general, los valores de ratio de amortiguamiento hallados son pequeños, por debajo de 1,5% por lo tanto, no son recomendables como elementos de disipación de vibraciones.
- En el ABS + CNT y ABS + CF se puede notar un aumento de las propiedades de amortiguamiento al reducir la densidad. La reducción de densidad propicia dos efectos directamente relacionados: el primero es el aumento de intersticios en el enmallado, por ende, el aumento de fricción entre filamentos, y el segundo es la disminución del módulo de elasticidad y por consiguiente el aumento de las propiedades de amortiguamiento. De acuerdo a estos dos efectos y a la data

recolectada, se comprueba que la reducción de la densidad incrementa el ratio de amortiguamiento. Sin embargo, para atribuir causalidades se debe de realizar una investigación más exhaustiva acerca de estos modos de amortiguamiento.

- Las propiedades de amortiguamiento del ABS + CNT son mayores a las del ABS, a densidades y propiedades mecánicas similares, por lo que se puede inferir que otros modos de amortiguamiento estén interactuando con el sistema, como es el caso del amortiguamiento de Coulumb por vibración *stick-slip*.
- Dentro de la variación de la densidad, el ratio de amortiguamiento posee un mínimo incremento marginal, en relación a las propiedades mecánicas, conforme se acerca a valores de 60% de relleno.
- Los valores de orientación cruzada presentan mejores propiedades de amortiguamiento para el ABS + CNT y ABS + CF. Sin embargo, para el ABS no se observa predominancia alguna.
- Existe una correlación entre el módulo de elasticidad y el ratio de amortiguamiento. En el caso de ABS + CF los valores de ratio de amortiguamiento son los más bajos mientras que sus valores de módulo de elasticidad los más altos. Por ejemplo, 0.72% de amortiguamiento corresponde a 4050 MPa de módulo de elasticidad. La correlación inversa se puede observar el ABS + CNT con 1.4% de amortiguamiento a 343 MPa.
- De acuerdo a los ensayos de tracción, la orientación unidireccional presenta ligeramente mejores valores de esfuerzo máximo para el ABS y el ABS + CF. No obstante, con el ABS + CNT, la diferencia entre valores de esfuerzo máximo entre las dos orientaciones es de hasta en un 116% mayor para el caso de relleno al 60%.

De la misma manera, la orientación unidireccional presenta valores más altos de módulo de elasticidad para los 3 materiales evaluados. Similarmente para el esfuerzo máximo, la diferencia entre las dos orientaciones con el ABS + CNT alcanza un 398% para el caso de relleno a 60%. Es así que, de acuerdo a las propiedades mecánicas expuestas la orientación unidireccional presenta valores superiores para el ABS y ABS + CF y valores sustancialmente superiores para el ABS + CNT.

- El proceso de impresión 3D no crea componentes 100% macizos. Por lo tanto, existiría disipación de energía por fricción de filamentos o roces con intersticios aún en muestras impresas con un relleno del 100%. De la misma manera, la reducción del porcentaje de relleno mediante los parámetros no corresponde a una reducción lineal. Motivo por el cual tales valores proporcionados por la impresora no deben de utilizarse como valores análogos a la densidad.

## Bibliografía

- [1] H. Maz, “Estudio de las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica fabricados mediante impresión 3D”, Tesis de bachiller, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú: Lima, 2016.
- [2] M. De Volder et al, “Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications”, *SCIENCE*, Vol. 339, pp. 535-539, feb. 2013.
- [3] P. Minetola, et al, “Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades”, *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 1027-1032, 2016.
- [4] L. Murr, *Handbook of materials structures, properties, processing and performance*. Springer, USA: Texas, El Paso, 2015.
- [5] I. Gibson et al. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer. USA: Utah, Logan, 2010.
- [6] Vazhnov, A. *Impresión 3D: como cambiar al mundo*. Editorial Baikal, México, 2014.
- [7] S. Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects”, US005121329A, 16-jun-1992.
- [8] S. Telfer et al. “Embracing Additive Manufacture: Implications for foot and ankle orthosis design”. *BMC Musculoskeletal Disorders*, pp. 13-84. 2012.
- [9] A. Zadpoor and J. Malda. “Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs”. *Annals of Biomedical Engineering*. 2016.
- [10] *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*, ISO/ASTM 52900.2015
- [11] “Criterios de diseño y fabricación mediante impresión 3D”, *DYOR: Do Your Own Robot*. [En línea] Disponible en: <http://dyor.roboticafacil.es/criterios-de-diseno-y-fabricacion-mediante-impresion-3d/>. [Accedido: 9-ene-2018]

- [12] P. Fernandez, A fondo: Makerbot Replicator 2x, *Compra Impresoras 3D*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.compraimpresora3d.com/makerbot-replicator-2x/>. [Accedido: 5-nov-2016]
- [13] *Replicator 2X Experimental 3D Printer: User Manual*, MakerBot, USA: New York, Brooklyn. 2015.
- [14] R. Diosdado, “Manual de CURA”, *Maker Zona*. [En línea]. Disponible en: <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>. [Accedido: 3-nov-2016]
- [15] J. Maturana, “Estas son las tecnologías de impresión 3D que hay sobre la mesa y lo que puedes esperar de ellas”, *XATAKA*. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>. [Accedido: 3-nov-2016]
- [16] M. Monthieux et al, *Handbook of Nano-technology*, B. Busham. USA: Ohio, Columbus, 2017, Ch 3.
- [17] J. D. Buckley, *Handbook of Composites*, S. T. Peters, UK: London, 1998, Ch. 15.
- [18] “¿Qué es la fibra de carbono?”, *Fibra de carbono.es*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fibradecarbono.es/articulos/que-es-fibra-carbono/>. [Accedido: 15-may-2017]
- [19] W. Thomson, *Theory of Vibration with applications*. George Allen & Unwin LTD. London. 1983.
- [20] J. Hurtado Gómez. Introducción a la dinámica de estructuras. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Colombia. 2000.
- [21] J. Rico Martínez. Sistemas Vibratorios de un Grado de Libertad Sujetos a Vibración Libre No Amortiguada. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica – Universidad de Guanajuato. México.

- [22] J. Rico Martínez. *Sistemas Vibratorios de un Grado de Libertad Sujetos a Vibración Libre Amortiguada*. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica – Universidad de Guanajuato. México.
- [23] J. Alencastre. *Amortiguamiento equivalente*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Lima. 2019.
- [24] J. Connor and S. Laflamme, *Structural Motion Engineering*, Springer, Suiza, 2014.
- [25] J. Jia, *Essential of Applied Dynamics Analysis*, Springer, Germany: Berlin, 2014
- [26] S. T. Latibari et al, “Investigation of interfacial damping nanotube-based composites”, *Composites, Part B*, No. 50, pp. 354-361, 2013.
- [27] M. Yu, “Fundamental Mechanical Properties of Carbon Nanotubes: Current Understanding and Related Experimental Studies”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 126, pp 271-278, jul. 2004.
- [28] N. Jalili, “Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites”, *Composite Science and Technology*, No. 65, pp. 2079-2093, 2015.
- [29] J. Kim, “Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes”, *Composite Science and Technology*, No. 71, pp. 1486-1494, 2011.
- [30] Y. Hu, “Energy dissipation in atomic-scale friction”, *Friction 1*, Vol. 1, pp. 24-40. 2013.
- [31] D. Montalvo et al, “Experimental measurement of the complex Young’s modulus on CFRP laminate considering the constant hysteretic damping model”, *Composites Structures*, No 97, pp 91-98, 2014
- [32] “Modal Analysis”, Siemens, [En línea]. Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/modal-analysis/13172> [Revisado 14-may-2017]
- [33] “The fundamentals of modal testing”, Agilent Technologies, USA, 1997.

- [34] Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, ATSM E756-05, 2005.
- [35] Martillo de impacto 8203 - Brüel & Kjær, *Simplemente mide bien*, [En línea]. Disponible en: <http://midebien.mx/producto/martillo-de-impacto-8203-bruel-kjaer/>. [Accedido el 14-may-2017]
- [31] D. Ambrosini et al, “Damping response of composites beams with carbon nanotubes”, *Composites, Part B*, No. 60, pp. 106-110, 2014.
- [32] W. H. Liao and R. L. Dai, “Fabrication, Testing, and Modeling of Carbon Nanotube Composites for Vibration Damping”, *Journal of Vibration and Acoustic*, Vol. 131, pp. 1-9, oct. 2009.
- [38] N. Kordani et al, “Damping Augmentation of Nanocomposites Using Carbon Nanotube/Epoxy”, in *IMAC-XXVIII 2010*, pp. 1605-1615.
- [39] B. Rice et al, “Measurement of Young’s Modulus and damping of fiber at cryogenic temperatures”, *Cryogenics*, No 63, pp 43-48, 2014
- [40] “ABS”, Tecnología de los plásticos, [En línea]. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/06/abs.html>. [Accedido 14-may-2017]
- [41] 3DXTECH ABS Filament, 3DXTECH, USA: MI, Byron Center, Rev. 2.1, 2017
- [42] 3DXNANO™ ESD BS + Carbon Nanotube Filament, 3DXTECH, USA: MI, Byron Center, Rev 12.2014v1, 2017
- [43] 3DXMAX CFR Carbon Fiber Reinforced ABS Filament, 3DXTECH, USA: MI, Byron Center, Rev. 2.1, 2017
- [44] A. Treviso et al, “Damping in composites materials: Properties and models”, *Composites, Part B*, No. 78, pp. 144-152, 2015.
- [45] M. Akif. “Free vibrational analysis of ABS rectangular plates with completely free boundaries condition”, Master of Science Thesis, Wayne State University, Michigan: Detroit 2012.

- [46] “Internal Friction in solids. Viscoelastics. Anelastic solids”, Viscoelastic Materials, [En línea], Disponible en: <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VE.html>. [Accedido 15-Oct.-19]
- [47] J. Jia et al, “Damping and mechanical properties of poly (methyl methacrylate)/epoxy interpenetrating polymer network”, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, Vol 5, pp. 91-96, 2013.

