

# **PRODUCCIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ ABS**

**CÉSAR AUGUSTO RENGIFO MONTENEGRO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI**

**2019**



# **PRODUCCIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ ABS**

**CÉSAR AUGUSTO RENGIFO MONTENEGRO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero  
mecánico

DIRECTOR:

**GONZALO FERNANDO CASANOVA GARCÍA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI**

**2019**

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por su apoyo constante.

## RESUMEN

En los últimos años se ha evidenciado un aumento en la cantidad de piezas fabricadas con materiales compuestos, debido a la demanda de materiales que tengan buenas propiedades mecánicas, y conserven un peso ligero. Una solución a estos requerimientos son los materiales fibro-reforzados, generalmente con una matriz polimérica reforzada con fibras sintéticas, como son el caso de la fibra de vidrio, fibra de carbono, entre otras.

Sin embargo, los diferentes procesos de manufactura de estos compuestos no han sido muy desarrollados en América Latina. Los materiales de mayor complejidad son fabricados en Europa y EEUU.

En este documento se describe la construcción y evaluación de un material compuesto de matriz polimérica acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con refuerzos de fibra de carbono, cuyas propiedades mecánicas se encontraron mediante la prueba de flexión en 3 puntos. Se describe la manufactura del material compuesto, la obtención de las probetas, y su posterior evaluación.

La caracterización del polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) se realizó acorde a las especificaciones de las normas ASTM. Se estudió dos proporciones diferentes, y se determinó la proporción más conveniente.

**Palabras claves:** Polímero reforzado con fibra de carbono CFRP, ABS, probetas de CFRP (probetas hechas en fibra de carbono), rigidez.

# CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	2
2.1. Generalidades del CFRP .....	2
2.2. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	3
2.3. Fibra de carbono.....	5
2.4. Impresión 3D .....	8
2.5. Moldeo por compresión.....	9
3. OBJETIVOS.....	9
3.1. Objetivo general.....	9
3.2. Objetivos específicos: .....	9
4. METODOLOGÍA .....	9
4.1. Descripción de ciclo térmico a utilizar y diseño experimental .....	10
4.1.1. Ciclo térmico definido .....	10
4.2. Preparación de insumos .....	13
4.2.1. Películas de ABS.....	13
4.2.2. Fibra de carbono .....	15
4.3. Fabricación probetas de CFRP .....	16
5. PRUEBAS MECÁNICAS.....	20
5.1. Prueba de flexión en 3 puntos.....	20
5.2. Cálculo del módulo de elasticidad .....	22
6. RESULTADOS .....	23
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	24
8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS .....	26
7.1 Etapa de desarrollo: Diseño estadístico completamente aleatorizado. ....	26
7.2. Resultados del análisis .....	30
7.2.1. Análisis descriptivo de datos.....	30
7.3. Análisis de varianza (ANOVA) .....	31
7.4. Intervalos de confianza.....	34
10. RECOMENDACIONES .....	35
11. BIBLIOGRAFÍA .....	35
11. ANEXOS.....	37

11.1. Plano del molde de compresión.....	37
--	----

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de compuestos reforzados con fibras. ....	3
Figura 2. Estructura del polímero ABS. ....	4
Figura 3. Estructura de la fibra de carbono. ....	5
Figura 4. Diferentes configuraciones de tela de fibra de carbono. ....	6
Figura 5. Fabricación mediante impresión 3D. ....	8
Figura 6. Modelo 3D para impresión. ....	8
Figura 7. Proceso de moldeo por compresión. ....	9
Figura 8. Efectos de la temperatura en la curva esfuerzo-deformación de polímeros termoplásticos. ....	10
Figura 9. Estructura general de ciclo térmico. ....	11
Figura 10. Ciclo térmico definido. ....	13
Figura 11. Modelo 3D películas ABS. ....	14
Figura 12. Tela de fibra de carbono. ....	15
Figura 13. Tiras de fibra de carbono. ....	15
Figura 14. Modelo 3D del molde de compresión. ....	17
Figura 15. Cera desmoldante utilizada en el molde. ....	17
Figura 16. Molde ensamblado con papel aluminio. ....	18
Figura 17. Arreglo de FC/ABS en molde. ....	18
Figura 18. Molde presionado. ....	19
Figura 19. Horno eléctrico Terrigeno. ....	19
Figura 20. Probetas de CFRP obtenidas. ....	20
Figura 21. Máquina LF Plus universal, utilizada para las pruebas de flexión en 3 puntos. ....	21
Figura 22. Configuración de soportes para la prueba de flexión en 3 puntos. ....	21
Figura 23. Montaje utilizado para las pruebas de flexión en 3 puntos. ....	22
Figura 24. Gráfica esfuerzo-deformación de una probeta. ....	24
Figura 25. Resultados de las pruebas de flexión para los 2 grupos. ....	24
Figura 26. Efectos de la temperatura en la morfología superficial de la fibra de carbono. (a) FC temp. ambiente; (b) FC temp. 450°C; (c) FC temp. 550°C; (d) FC temp. 650°C; (e) FC temp. 750°C; (f) FC Temp. 850°C. ....	25
Figura 27. Efectos de la temperatura en las propiedades finales de un compuesto CFRP. ....	25
Figura 28. Diagrama de caja de los resultados de rigidez. ....	30
Figura 29. Distribución de rigidez. ....	31
Figura 30. Gráfica de efectos principales. ....	32
Figura 31. Gráfico de cuantiles. ....	33

Figura 32. Evaluación de la distribución de residuales. ....	33
Figura 33. Ajuste de residuales. ....	34

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones del CFRP.....	2
Tabla 2. Propiedades del polímero ABS.....	4
Tabla 3. Propiedades para diferentes tipos de fibra de carbono.....	7
Tabla 4. Aplicaciones de la fibra de carbono y crecimiento en su demanda.....	7
Tabla 5. Efecto de la velocidad de deformación en el compuesto para una T= 230°C. ....	12
Tabla 6. Insumos utilizados en fabricación de láminas de ABS.....	13
Tabla 7. Parámetros de ciclo de impresión 3D.....	14
Tabla 8. Insumos utilizados en fabricación de probetas de CFRP.....	16
Tabla 9. Resultados de rigidez obtenidos.....	26
Tabla 10. Tabla del ANOVA.....	29



---

## TRABAJO DE GRADO

TESISTA: CÉSAR AUGUSTO RENGIFO MONTENEGRO

[cesar.rengifo@correounivalle.edu.co](mailto:cesar.rengifo@correounivalle.edu.co)

CÓDIGO: 1329153

---

# PRODUCCIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ ABS

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se vienen desarrollando múltiples materiales compuestos fibrorreforzados que cumplen con los mismos requerimientos que los tradicionales, y que a su vez poseen mejoras, como un bajo peso, alta resistencia a la corrosión y a agentes químicos, entre otras características.

Debido al desarrollo y los nuevos requerimientos en las industrias aeronáutica [1] y biomecánica [2], se ha incrementado el uso de materiales compuestos con matriz de polímeros termoplásticos los cuales poseen mejoras en algunas propiedades con respecto a las matrices de polímeros termoestables.

Una solución ante las altas exigencias de las diferentes industrias es la producción de un material compuesto de fibra de carbono con alguna matriz polimérica que tenga propiedades como resistencia química, estabilidad térmica, baja densidad, entre otras.

Un polímero que cumple con todos estos requerimientos, y que se ha aceptado en el mercado, es el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [3]. Según 'Plastics International' [3] el ABS cuenta con diferentes características que lo convierten en un material apropiado para maquinar, y con aplicaciones en diferentes campos. Al utilizarlo como matriz polimérica con fibra de carbono resulta un material compuesto con buenas propiedades. Sin embargo, su producción se dificulta, y hasta el momento solo se pueden comprar en contadas empresas europeas.

Además de lo anterior, el método de producción convencional, que consiste en el uso de fibras cortas y aleatorias, no saca el mejor provecho del compuesto, pues si bien se obtiene un material con propiedades importantes, el método de fabricación se podría mejorar.

Como solución al poco desarrollo de este material, el grupo de investigación de biomecánica se propuso producir un compuesto de fibra de carbono con matriz ABS, mediante el proceso de manufactura de moldeo por compresión, lo que, a diferencia del proceso convencional de



extrusión, permitirá utilizar tela de fibra de carbono de manera continua, cuyas fibras estarán orientadas a 0° y a 90°, con lo que se espera obtener propiedades mayores a las encontradas convencionalmente.

La primera etapa en el desarrollo del proyecto de grado consistió en la manufactura del CFRP. Se fabricaron probetas bajo 5 diferentes ciclos térmicos, después se procedió a analizar el acabado superficial y en base a esto se eligió el mejor ciclo térmico. Posteriormente, utilizando el mejor ciclo térmico, se fabricaron probetas con 2 diferentes proporciones matriz-refuerzo. Se realizó la caracterización de las probetas de CFRP mediante la prueba mecánica de flexión en tres puntos, teniendo en cuenta la norma ASTM D7264.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Generalidades del CFRP

Se denomina CFRP a todo polímero reforzado con fibras de carbono, como el compuesto ABS/FC. El CFRP se caracteriza por tener una baja densidad, y una buena combinación de propiedades mecánicas, como alta resistencia, alta rigidez, normalmente una buena resistencia al desgaste, mientras conserva un bajo peso. Debido a esta combinación de propiedades, el desarrollo y uso del CFRP ha ido creciendo en diferentes industrias, como la electrónica, construcción, aeronáutica entre otras. En la Tabla 1 [4] se presentan diferentes aplicaciones del CFRP.

*Tabla 1. Aplicaciones del CFRP*

Industria	Ejemplos
Aeronáutica	Alas, fuselajes, tren de aterrizaje, palas de helicóptero
Automóviles	Piezas de la carrocería, alojamientos de los faros, parrillas, parachoques, ballestas, bastidores de los asientos, árbol motor
Náutica	Cascos, cubiertas, mástiles
Química	Conducciones, recipientes, recipientes de presión
Mobiliario y equipamiento	Estanterías, armazones, sillas, mesas, escaleras
Eléctrica	Paneles, aislantes, caja de interruptores
Deportes	Cañas de pescar, palos de golf, piscinas esquís, canoas

Los materiales fibroreforzados constan de 2 fases, la primera llamada matriz, es una fase continua cuyo propósito es transferir las cargas aplicadas a otra fase. La matriz puede ser constituida por un metal, un cerámico, o un polímero. La segunda fase es llamada fase dispersa, y su objetivo es el de aumentar las propiedades de la matriz. La fase dispersa puede ser compuesta por fibras continuas (largas), o fibras discontinuas (cortas), a su vez, estas pueden estar orientadas de manera ordenada, o aleatoria. [5]

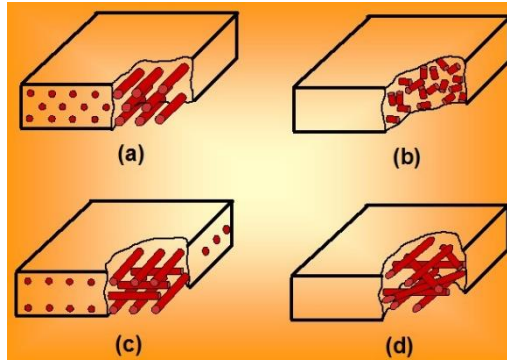


Figura 1. Morfología de compuestos reforzados con fibras.

En la Figura 1 se muestran diferentes configuraciones de fibras para reforzar una matriz. En la Figura 1a se muestran fibras continuas y orientadas a  $0^\circ$ , la Figura 1b muestra fibras discontinuas y aleatorias, la Figura 1c muestra una matriz reforzada con fibras continuas y orientadas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , y finalmente en la Figura 1d se encuentran fibras continuas y orientadas aleatoriamente.

## 2.2. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un polímero termoplástico muy utilizado en diferentes industrias, entre sus aplicaciones habituales se encuentra la fabricación de cascos de seguridad, carcasas de teléfonos y de electrodomésticos, equipaje, rejillas, tableros de mando, juguetes, entre otros elementos que requieran dureza y bajo peso [6].

El acrónimo del ABS se deriva de los tres monómeros que lo constituyen: acrilonitrilo, butadieno y estireno, la combinación de estos tres monómeros da como resultado sus características principales: el acrilonitrilo es el encargado de ofrecer dureza superficial y resistencia química, el butadieno contribuye con dureza total y fuerza de impacto, finalmente el estireno aporta facilidad del procesado y resistencia a la tensión [7].

En la Tabla 2 se encuentra un resumen de las propiedades del compuesto [8].

Tabla 2. Propiedades del polímero ABS.

Propiedades	Método ASTM	Unidad	Grados de ABS		
			Alto impacto	Impacto medio	Bajo Impacto
Resistencia al impacto, prueba Izod	D2546	J / m	375 – 640	215– 375	105– 215
Resistencia a la tracción	D638	Kg / mm <sup>2</sup>	3,3 - 4,2	4,2 - 4,9	4,2 - 5,3
Elongación	D638	%	15 – 70	10 – 50	5 – 30
Dureza	D785	HRC	88 – 90	95 -105	105-110
Peso específico	D792	gr.	1,02 - 1,04	1,04-1,05	1,05-1,07

La estructura del polímero ABS se caracteriza por tener una matriz rígida conformada por los monómeros acrilonitrilo y estireno (SAN) entrecruzada con una larga cadena de butadieno, las proporciones de estos monómeros pueden oscilar entre un 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% estireno [9].

En la Figura 2 se muestra la estructura del ABS [10].

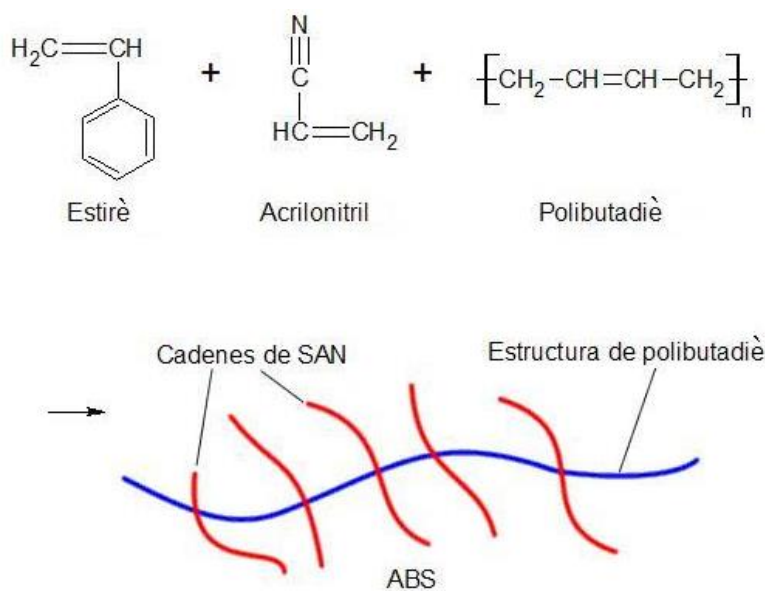


Figura 2. Estructura del polímero ABS.

### 2.3. Fibra de carbono

La fibra de carbono es un material sintético constituido por un conjunto de filamentos de 50-10 micras de diámetro, cuya composición principal es de átomos de carbono, que conforman por lo menos el 92% del peso total de la fibra [11].

La fibra de carbono tiene una estructura compuesta por capas que tienden a tener una distribución paralela al eje de la fibra, el resultado de esta orientación en las capas es un módulo de elasticidad mayor en dirección paralela al eje de la fibra, y un módulo de elasticidad menor en dirección perpendicular al eje de la fibra, de la misma forma, la conductividad eléctrica y térmica es mayor a lo largo del eje de la fibra, y es menor perpendicular a este eje [12].

En la Figura 3 se muestra la estructura de la fibra de carbono [12].

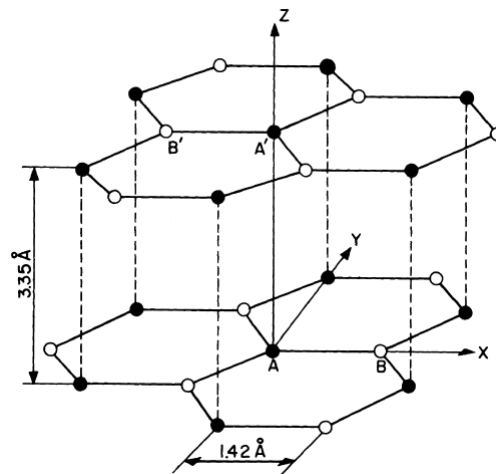


Figura 3. Estructura de la fibra de carbono.

Las fibras a su vez pueden entrelazarse dando como resultado diferentes configuraciones de tela, se puede tomar fibras orientadas hacia una dirección y entrelazarlas con fibras orientadas de manera perpendicular, obteniendo así una configuración biaxial con fibras orientadas a  $90^\circ$  entre sí. También se puede obtener una configuración biaxial con fibras orientadas a  $45^\circ$ . De igual forma, se puede entrelazar 3 o 4 diferentes fibras, obteniendo configuraciones triaxiales o cuatriaxiales respectivamente. En la Figura 4 [13] se muestran diferentes configuraciones de tela de fibra de carbono.

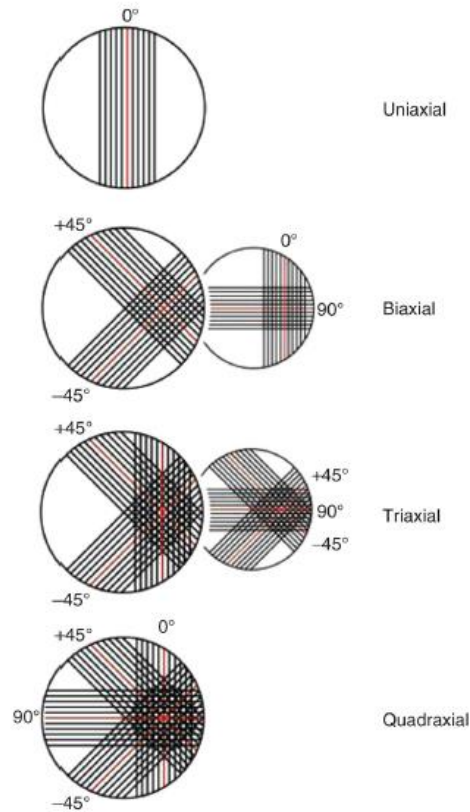


Figura 4. Diferentes configuraciones de tela de fibra de carbono.

Las propiedades de las fibras de carbono pueden variar según la cantidad de carbono presente, el diámetro de los filamentos, entre otras variables. En el mercado se encuentran diferentes clases de fibra según la aplicación requerida, para la selección de estos tejidos hay que tener en cuenta propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, además del tipo de esfuerzos a los que estará sometido, es decir, si el material estará sometido a cargas uniaxiales o en más de una dirección.

En la Tabla 3 se resumen las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas para fibras de carbono comerciales y fibras con aplicaciones y características más específicas.

Tabla 3. Propiedades para diferentes tipos de fibra de carbono.

TIPOS DE FIBRA					
Propiedad	Fibras SM <sup>a</sup>	Fibras IM <sup>a/b</sup>	Fibras HM <sup>b</sup>	Fibras *LM <sup>b</sup>	Fibras *UHM <sup>b</sup>
Contenido en carbono (%)	95	95	>99	>97	>99
Diámetro (µm).	6-8	5-6	5-8	11	10
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,9	1,9	2,2
Resistencia a la tracción (mpa)	3.800	3450 - 6200	3450 - 5520	1380 - 3100	2410
Alargamiento a la rotura	1,6	1,3 – 2,0	0,7 – 1,0	09	0,4 -0,27
Resistencia eléctrica (µ_cm)	1650	1450	900	1300	220 - 130
Conductividad térmica (w/m.k)	20	20	50-80	-	-

(a) Fibras para usos generales; (b) fibras para aplicaciones aeroespaciales.  
 Valores de propiedades para fibras obtenidas a partir de PAN como precursor. \*  
 Valores de propiedades para fibras "pitch".  
 Las fibras de carbono se suelen clasificar atendiendo a dos criterios: tipo de precursor y valor de su módulo de elasticidad. De acuerdo con el segundo criterio se distinguen cinco clases, o calidades, de fibras: SM ("Standard modulus"), UHM ("Ultra-high modulus"), HM ("High modulus"), HT ("High tenacity-high strength") o IM ("Intermediate modulus"), y LM ("Low modulus").

Es debido a las buenas propiedades que posee la fibra de carbono que ha sido utilizada de manera amplia en diferentes industrias, además ha tenido un crecimiento en su demanda. En la Tabla 4 [14] se muestra cómo ha crecido la demanda de la fibra en las industriales aeroespaciales, industriales y de deportes.

Tabla 4. Aplicaciones de la fibra de carbono y crecimiento en su demanda.

	1999 (tons)	2004 (tons)	2006 (tons)	2008 (tons)	2010 (tons)
Aerospace	4,000	5,600	6,500	7,500	9,800
Industrial	8,100	11,400	12,800	15,600	17,500
Sporting Goods	4,500	4,900	5,900	6,700	6,900
Total	16,600	21,900	25,200	29,800	34,200

## 2.4. Impresión 3D

La impresión 3D es un método de manufactura basado en la tecnología aditiva, la cual consiste en la aplicación de numerosas capas una sobre otra hasta completar la geometría requerida. En la Figura 5 [15] se muestra la fabricación de un objeto mediante impresión 3D.



Figura 5. Fabricación mediante impresión 3D.

Para lograr la disposición correcta y ordenada de las capas para la geometría requerida se inicia con un modelo 3D generado en un software de modelación. En este modelo se definen medidas y parámetros de las capas a superponer, como por ejemplo espesor y acabado superficial. En la Figura 6 [15] se muestra un modelo 3D para impresión.

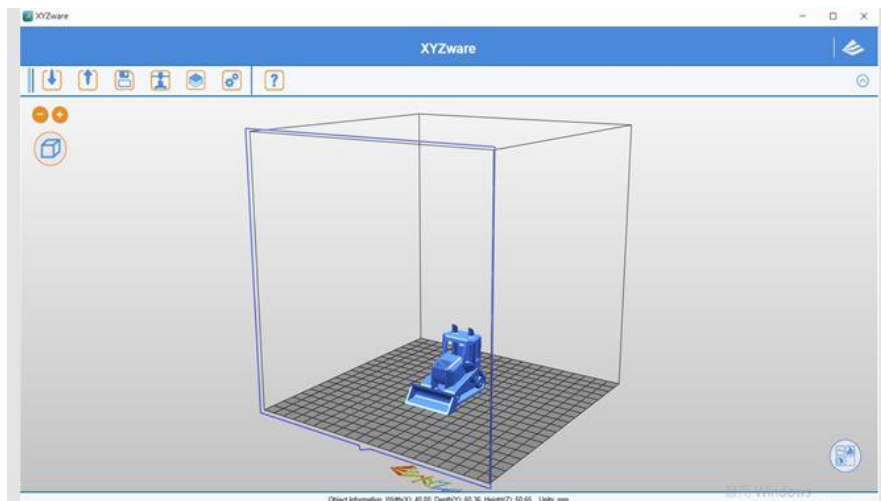


Figura 6. Modelo 3D para impresión.

La fabricación mediante impresión 3D en comparación con los métodos de fabricación tradicionales (mecanizado, troquelado, fundición, inyección, etc.) presenta diferentes ventajas, como una considerable disminución de desperdicio de material, pues se utiliza solamente el material necesario, lo que implica ahorros importantes, por otra parte también se tiene la posibilidad de fabricar piezas con geometrías complejas sin ningún aumento en el costo ni dificultad en el proceso. [16]

Debido a estas ventajas, la industria de la impresión 3D ha tenido un crecimiento importante en los últimos años. Según estudios [15] el mercado mundial de la tecnología aditiva movió cerca de 3.500 millones de dólares en el año 2013.

## 2.5. Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es uno de los métodos de manufactura de plásticos más comunes. Consiste en introducir el material de moldeo, generalmente calentado previamente, en un molde abierto. Posteriormente se cierra el molde y se aplica calor y presión. Una vez que ha pasado el tiempo de curado se abre el molde y se retira el material con la geometría deseada [15].

En la Figura 7 se muestra el proceso de moldeo por compresión.

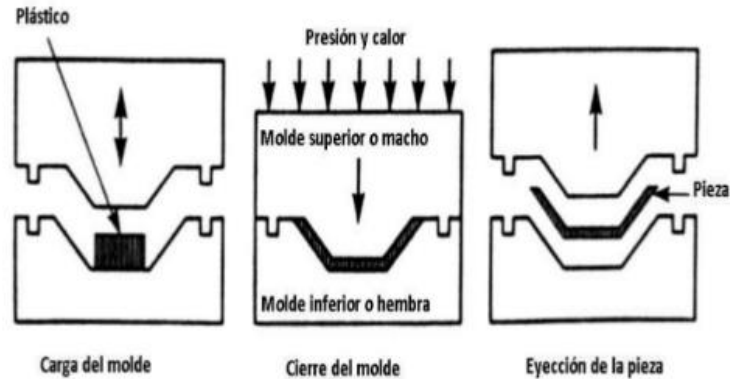


Figura 7. Proceso de moldeo por compresión.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1. Objetivo general:

Producir un material compuesto de fibra de carbono con matriz ABS mediante moldeo por compresión

### 3.2. Objetivos específicos:

- Obtener películas de polímero ABS mediante impresión 3D
- Diseñar el proceso de manufactura del material compuesto de fibra de carbono con matriz ABS
- Construir probetas del material compuesto de fibra de carbono con matriz ABS
- Evaluar y caracterizar el material obtenido mediante la prueba de Flexión en tres puntos

## 4. METODOLOGÍA



## 4.1. Descripción de ciclo térmico a utilizar y diseño experimental

### 4.1.1. Ciclo térmico definido

Una propiedad importante de los materiales termoplásticos es la capacidad que tienen para variar su comportamiento en función de la temperatura. Cuando un polímero está sometido a bajas temperaturas, presenta un comportamiento rígido. Por debajo de la **temperatura de transición vítrea** el polímero se vuelve duro y frágil, con propiedades similares a las de un vidrio. A medida que se aumenta la temperatura, se obtiene un comportamiento viscoso con mayor facilidad. Cuando la temperatura llega a un punto en el cual el material tiene un comportamiento amorfo se denomina **temperatura de fusión**. Por encima de esta temperatura el material tiende a comportarse de manera líquida, sin embargo, a muy altas temperaturas el polímero puede carbonizarse, la temperatura a la cual esto ocurre se le denomina **temperatura de degradación**. [17]

En la Figura 8 [18] se muestra el efecto de la temperatura en el comportamiento típico de un material termoplástico. A medida que aumenta la temperatura, el plástico se deforma a menores valores de esfuerzo, lo que se puede interpretar como una mayor flexibilidad.

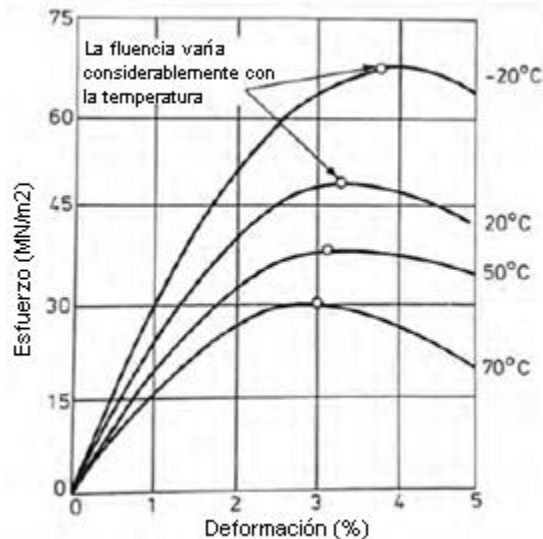


Figura 8. Efectos de la temperatura en la curva esfuerzo-deformación de polímeros termoplásticos.

El ciclo térmico aplicado en la construcción del compuesto es de suma importancia ya que su función principal es la de fundir la matriz polimérica, de manera que pueda distribuirse lo más uniformemente posible entre la fibra de carbono, logrando una mayor cohesión y, por tanto, mejores propiedades mecánicas. La temperatura debe ser lo suficientemente alta para fundir el polímero de la mejor manera, sin embargo, no debe ser tan alta como para degradar la fibra de carbono o el polímero.

En la Figura 9 se muestra la estructura general del ciclo térmico que se utilizó el cual consta de una temperatura T, un tiempo t1 y un tiempo t2. La temperatura T deseada se determinó como

230°C, por recomendación del fabricante de la impresora 3D utilizada, como temperatura de óptima de extrusión [19], [20]. Durante el tiempo  $t_1$  se aumenta la temperatura desde la temperatura ambiente hasta la temperatura  $T$ , durante el tiempo  $t_2$  se mantiene constante la temperatura hasta la finalización del ciclo.

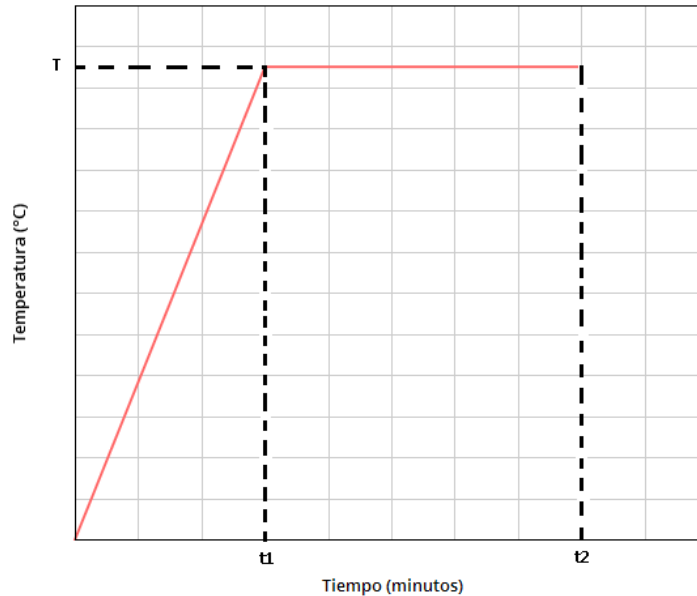







Figura 9. Estructura general de ciclo térmico.

La rampa determinada por el tiempo  $t_1$  y la temperatura  $T$ , fijará la velocidad de fusión que tendrá el polímero, es decir, mientras mayor sea la relación  $T/t_1$ , más tiempo tardará en fundir el polímero y menor será la velocidad de deformación, sin embargo, si la relación  $T/t_1$  es muy pequeña, el polímero puede carbonizarse.

Por otra parte, el tiempo  $t_2$ , determinará la distribución homogénea que tendrá la matriz sobre la fibra. Si el tiempo es muy corto, la matriz no penetrará la fibra de manera correcta, evitando que se logre una cohesión en el polímero. Sin embargo, si el tiempo es muy largo, el material puede degradarse.

Como parte de la determinación del ciclo térmico adecuado se realizaron pruebas de diferentes ciclos térmicos con el objetivo de ver los efectos en la fundición de la matriz de ABS sobre la fibra de carbono.

Se fabricaron diferentes probetas de CFRP, interponiendo láminas de ABS y tiras de fibra de carbono, posteriormente se ingresaron al horno someténdolas a diferentes tiempos y a una temperatura fija, se procedió a analizar los diferentes efectos obtenidos como se muestra en la Tabla 5.

Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
				
t1=2h; t2= 9h	t1=2h; t2= 7h	t1=2h; t2= 3h	t1= 3h; t2= 7h	t1= 3h; t2= 6h

*Tabla 5. Efecto de la velocidad de deformación en el compuesto para una  $T=230^{\circ}\text{C}$ .*

De los resultados obtenidos se puede evidenciar que para la probeta 1 y la probeta 2 la capa superficial de polímero ABS fue parcialmente carbonizada y porosa. Por otra parte, se observó que para la probeta 3 al disminuir el tiempo  $t_2$  la superficie tuvo una mejor apariencia. Finalmente, para las probetas 4 y 5, se aumentó el tiempo  $t_1$  logrando un mejor acabado superficial.

De las probetas 1 y 2 se concluyó que un tiempo  $t_1$  de 2 horas implicaba una velocidad de deformación muy alta, carbonizando así la matriz, por otro lado, un tiempo  $t_1$  de 3 horas, mostraba mejores resultados.

De la misma manera, se evidenció que un tiempo  $t_2$  muy largo no servía de nada si el tiempo  $t_1$  es muy corto, pues la matriz carbonizada no puede penetrar la fibra. Para un tiempo  $t_1$  más largo, se encontró que el mejor tiempo  $t_2$  fue de 6 horas, donde se logró una mayor cohesión y penetración de la matriz en la fibra de carbono.

Diferentes estudios [21]–[23] han demostrado una relación entre la temperatura aplicada durante el ciclo térmico y las propiedades finales del compuesto, pues una prolongada exposición del material a una elevada temperatura puede desencadenar una degradación de los elementos de cohesión del compuesto disminuyendo considerablemente las propiedades mecánicas finales.

Por lo anterior, se determinó que el ciclo térmico adecuado consta de un tiempo  $t_1$  de 3 horas, un tiempo  $t_2$  de 6 horas, y una temperatura  $T$  de  $230^{\circ}$ , como se muestra en la Figura 10.

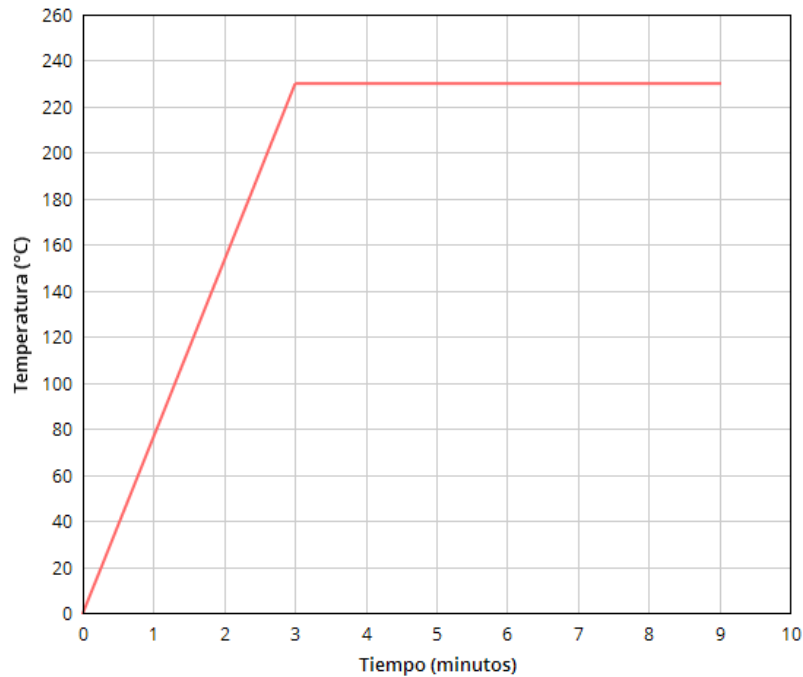


Figura 10. Ciclo térmico definido.

## 4.2. Preparación de insumos

### 4.2.1. Películas de ABS

La fabricación de las películas de ABS se realizó mediante impresión 3D, en la Tabla 6 se muestran los insumos utilizados.

Tabla 6. Insumos utilizados en fabricación de láminas de ABS.

INSUMOS UTILIZADOS	DESCRIPCIÓN
<b>EQUIPO</b>	Impresora 3D davinci 1.0 AiO
<b>MATERIAL</b>	Filamento de ABS de 1,75 mm de diámetro
<b>HERRAMIENTA</b>	Software XYZware

Para la impresión 3D es necesario primero realizar un modelo 3D, para lo cual se hizo uso del software XYZware, en la Figura 11 se muestra el modelado que se imprimió.

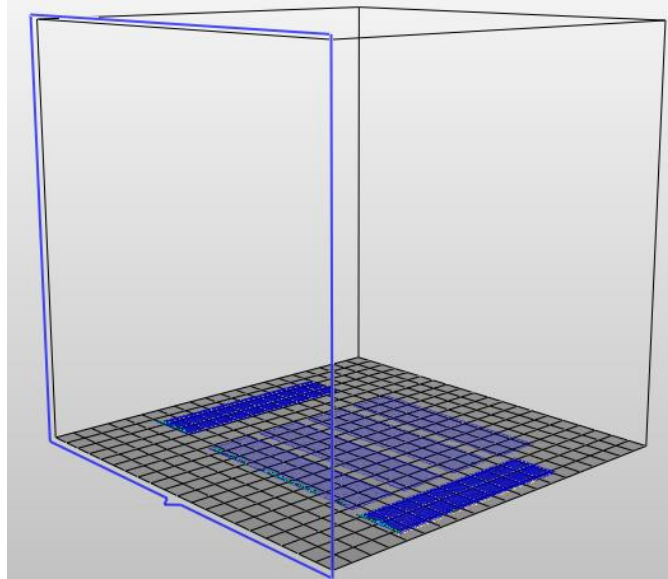


Figura 11. Modelo 3D películas ABS.

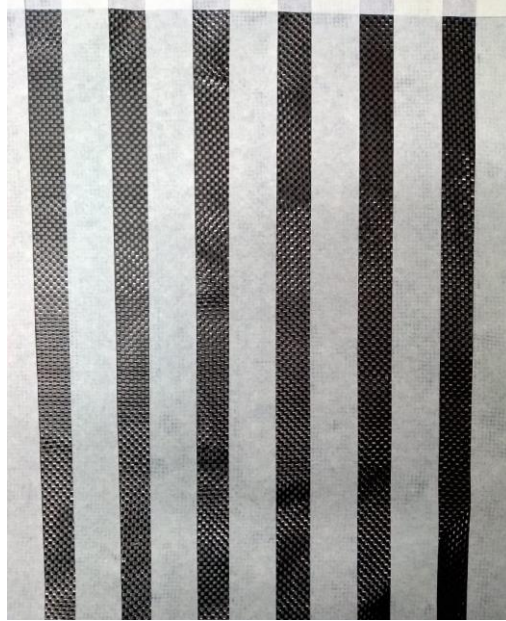
Para efectos de optimización de espacio y tiempo se determinó imprimir 6 películas de ABS en cada ciclo de impresión, en la Tabla 7 se muestran los parámetros utilizados para cada ciclo de impresión.

Tabla 7. Parámetros de ciclo de impresión 3D.

PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	
Temperatura del extrusor	230°C
Temperatura de la cama	60°C
Resolución	0,1 mm
Diámetro filamento	1,75 mm
Dimensiones película	100 mm largo x 25 mm ancho x 0,4 mm alto
Cantidad de películas	6
Material de película	ABS
Velocidad de impresión	50 mm/s

#### 4.2.2. Fibra de carbono

Para la obtención de las tiras de fibra de carbono se utilizó una tela de fibra con un tejido multiaxial con orientaciones a  $90^\circ$  y  $0^\circ$ , posteriormente se demarcó las dimensiones deseadas con cinta de enmascarar, dejando un largo de 300 mm y un ancho de 25 mm como se muestra en la Figura 12.



*Figura 12. Tela de fibra de carbono.*

Finalmente se procedió a recortar, obteniendo las tiras con las dimensiones deseadas, como se muestra en la Figura 13.



*Figura 13. Tiras de fibra de carbono.*

### 4.3. Fabricación probetas de CFRP

Con el objetivo de evidenciar la influencia de la proporción fibra de carbono/ABS en el comportamiento mecánico del material compuesto se definió fabricar 2 grupos de probetas. El primer grupo con una relación de 10 capas de fibra de carbono por 9 capas de ABS. El segundo grupo se fabricó con una relación de 9 capas de fibra de carbono por 10 capas de ABS.

Para la fabricación de las probetas se hizo uso de los insumos mostrados en la Tabla 8.

*Tabla 8. Insumos utilizados en fabricación de probetas de CFRP.*

<b>INSUMOS UTILIZADOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>EQUIPO</b>	Horno eléctrico "Terrigeno", Mod. FSP de 2.3 KW
<b>MATERIAL</b>	Tiras de fibra de carbono
	Películas de ABS
	Cera desmoldante: Mirror Glaze 88
<b>HERRAMIENTA</b>	Software XYZware
	Prensas de mano
	Prensas de banco
	Molde de probetas
	Papel aluminio
	Paño seco

El molde que se utilizó fue un molde rígido y cerrado de 5 piezas de acero AISI 1045. El ensamble de 3 piezas constituye la pieza *hembra*, el ensamble de las 2 piezas restantes constituye la pieza *macho*, en la Figura 14 se muestra un modelo 3D del molde (Anexo 1).

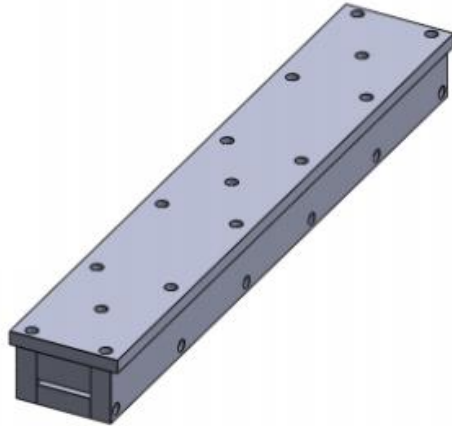


Figura 14. Modelo 3D del molde de compresión.

Primero se procedió preparando el molde, para evitar que en el proceso de calentamiento del compuesto los elementos se adhirieran a las paredes internas del molde se aplicó cera desmoldante.



Figura 15. Cera desmoldante utilizada en el molde.



Una vez que las paredes del molde tenían aplicada la cera desmoldante se rodearon con papel aluminio para evitar el contacto del compuesto con el metal del molde, posteriormente se aplicó cera desmoldante sobre el papel aluminio, y se ensambló el molde, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Molde ensamblado con papel aluminio.

El proceso de fabricación inició interponiendo tiras de Fibra de carbono (Figura 13) con películas de ABS obteniendo un compuesto tipo sándwich, se continuó con el procedimiento hasta obtener 10 tiras de fibra de carbono y 9 filas de películas de ABS, como se muestra en la Figura 17.

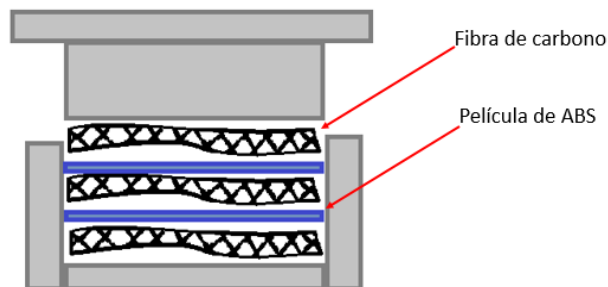


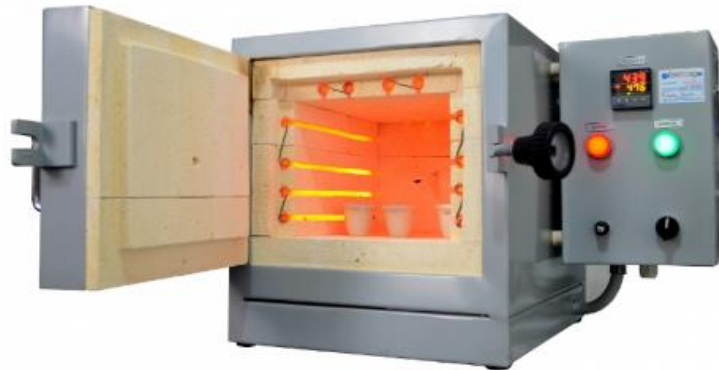
Figura 17. Arreglo de FC/ABS en molde.

Una vez que se completó el arreglo se cierra el molde, oprimiendo las fibras contra las películas de ABS y presionando con pequeñas prensas en C, como se muestra en la Figura 18.



*Figura 18. Molde presionado.*

Posteriormente, con el molde armado, cerrado y presionado se procede a introducirlo al horno eléctrico. Para la aplicación del ciclo térmico se utilizó un horno eléctrico “Terrigeno”. El horno consta de un controlador de tiempo, un controlador de temperatura, una puerta, un material refractario para la puerta, un material refractario para el interior del horno y resistencias eléctricas.



*Figura 19. Horno eléctrico Terrigeno.*

Después de haber ingresado el molde al horno y haber aplicado el ciclo térmico correspondiente, se deja enfriar el molde de manera constante dentro del horno, evitando deformaciones por impactos térmicos. Una vez hayan pasado por lo menos 4 horas de enfriamiento del molde, se retira del horno y se procede a extraer el compuesto, obteniendo un compuesto con dimensiones de 300 mm de largo, 26 mm de ancho y 6 mm de alto.

Finalmente, con el objetivo de evaluar el material compuesto, se debe cortar la probeta obtenida en el horno de longitud 300 mm, en 3 probetas de 100 mm de longitud, como se muestra en la Figura 20.



*Figura 20. Probetas de CFRP obtenidas.*

En total se fabricaron 30 probetas de CFRP, las cuales se dividen en 2 grupos. El primer grupo de 15 probetas tiene una relación de 10 capas de fibra de carbono por 9 capas de ABS, el segundo grupo con las 15 probetas restantes tiene una relación de 9 capas de fibra de carbono por 10 capas de ABS.

Las dimensiones promedio de las probetas fueron de: 100 mm de largo, 25 mm de ancho y 6 mm de alto.

## **5. PRUEBAS MECÁNICAS**

### **5.1. Prueba de flexión en 3 puntos**

Para caracterizar las probetas de CFRP se procedió a evaluarlas según los requerimientos de la norma ASTM D7264 (Anexo 2), que es la indicada para caracterizar materiales compuestos con matrices poliméricas. Esta norma consta de 2 procedimientos, el procedimiento A consiste en una prueba de flexión en 3 puntos, mientras el procedimiento B consiste en una prueba de flexión en 4 puntos, para este trabajo de grado se realizó el procedimiento A.

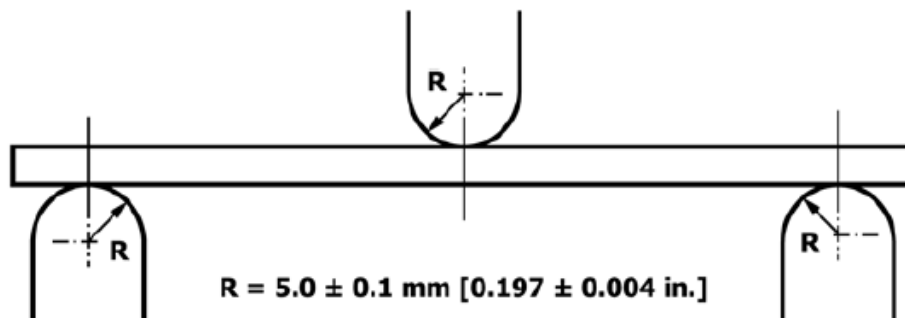
Otros parámetros importantes para la prueba que se definieron según la norma ASTM D7264 fueron la velocidad de aplicación de la carga, la ubicación de los puntos de apoyo de la probeta, la geometría de los puntos de apoyo, etc.

La máquina que se utilizó para realizar la prueba de flexión en 3 puntos fue una máquina universal LF Plus universal de Lloyd Instruments, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Máquina LF Plus universal, utilizada para las pruebas de flexión en 3 puntos.

Según la norma, se ubicó la viga de CFRP, con dimensiones de 100 mm x 25 mm x 6 mm sobre 2 soportes fijos con un radio cercano a los 5 mm, como se muestra en la Figura 22.



Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose

Figura 22. Configuración de soportes para la prueba de flexión en 3 puntos.

El montaje utilizado para realizar la prueba se muestra en la Figura 23, y consta de los siguientes elementos:

1. Celda de carga de 50 kg, para medir la fuerza aplicada.
2. LVDT, para registrar la deflexión de la prueba.
3. Viga de CFRP, para medir su rigidez.
4. Soporte fijo con filo redondeado, para soportar la viga.

## 5. Extremo del tornillo y punto de aplicación de la carga.

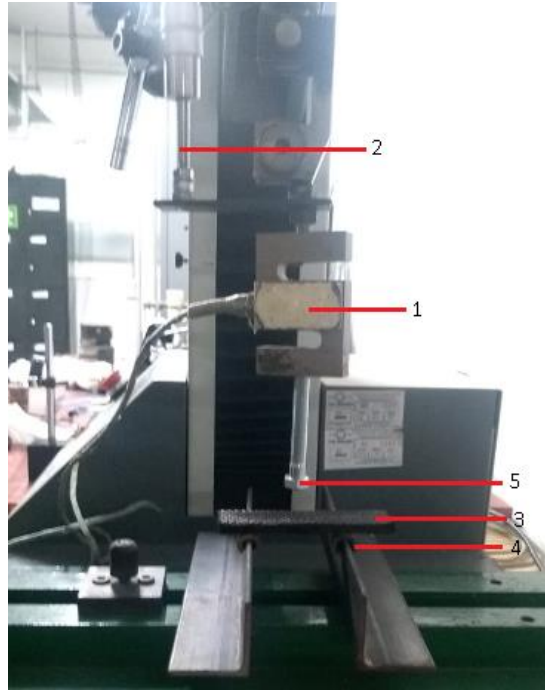


Figura 23. Montaje utilizado para las pruebas de flexión en 3 puntos.

Posteriormente se aplica una carga puntual  $P$  en la mitad de la probeta, la velocidad de la prueba se condiciona por la velocidad de la cruceta, que por norma ASTM D7264 fue definida como 1.0 mm/min o 0.05 in/min.

La fuerza aplicada a la probeta, y la deflexión sufrida en esta debido a la carga son datos que deben ser medidos y registrados hasta el momento en que se presente una falla en una de las superficies de la viga, o hasta llegar a un valor de deflexión determinado.

Para medir la deformación se utilizó un LVDT LD620-7.5, con un rango de  $\pm 7.5$  mm, mientras el registro y adquisición de datos se realizó con una tasa de muestreo de 10 milisegundos.

### 5.2. Cálculo del módulo de elasticidad

Para una viga sometida a una carga puntual en el centro, y soportada en dos apoyos simples en sus extremos, el esfuerzo máximo se encuentra en la mitad de su longitud. Para este punto, el esfuerzo máximo puede ser calculado mediante la Ecuación 1, según la norma ASTM D7264.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Ecuación 1. Cálculo del esfuerzo máximo.

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo en el punto medio de la probeta (esfuerzo máximo) [MPa]

P: Carga aplicada [N]

L: Distancia entre apoyos [mm]

b: Ancho de la viga [mm]

h: Espesor de la viga [mm]

Por otro lado, también es necesario calcular la máxima deformación ocurrida en la viga. Para el caso de la prueba de flexión en 3 puntos, la máxima deformación y el máximo esfuerzo ocurren en el mismo punto, en la mitad de la longitud de la viga. La máxima deformación se puede calcular mediante la Ecuación 2.

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2}$$

*Ecuación 2. Cálculo de la máxima deformación .*

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación máxima en la superficie exterior de la probeta [mm/mm]

$\delta$ : Deflexión en el punto medio de la viga [mm]

h: Espesor de la viga [mm]

L: Distancia entre apoyos [mm]

Por otra parte, para determinar el módulo de elasticidad se calculó como la pendiente de la zona lineal de la curva esfuerzo-deformación. Por recomendación de la norma, la pendiente de la zona línea se tomó en un rango de 0.002 mm/mm comprendido entre 0.001 y 0.003 mm/mm.

## 6. RESULTADOS

La prueba de flexión en 3 puntos se realizó para un total de 30 probetas, diferenciadas en 2 grupos de 15. Posteriormente se procedió a medir el módulo de elasticidad para cada una de ellas, según el procedimiento recomendado por la norma se halló la pendiente de la zona lineal de la gráfica esfuerzo vs deformación, como se muestra en la Figura 24.

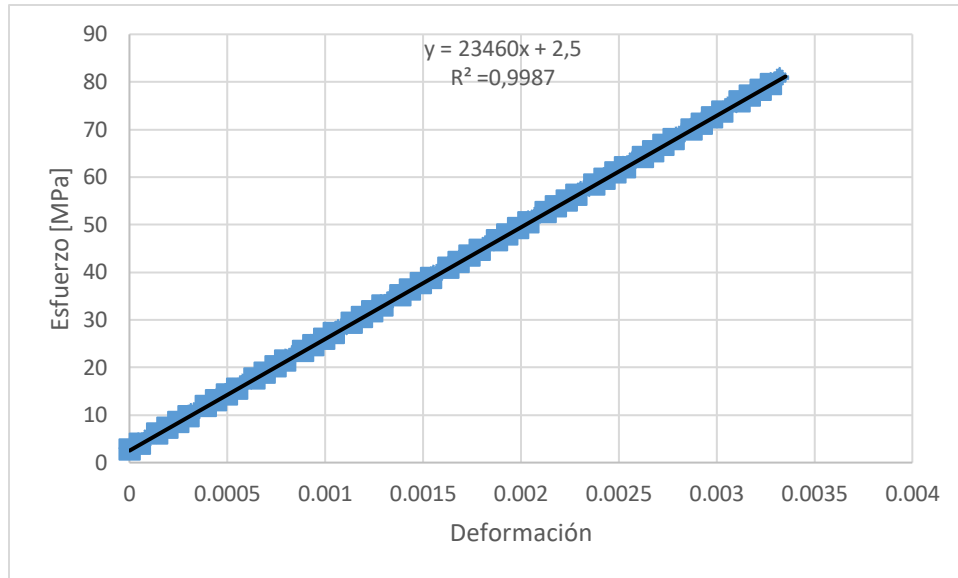


Figura 24. Gráfica esfuerzo-deformación de una probeta.

Una vez hallados los módulos de elasticidad de las 30 probetas, se agruparon los datos y se graficaron. En la Figura 25 se muestra los resultados de la prueba de flexión para los dos grupos, el grupo compuesto por 10 capas de FC y 9 de ABS presentó un módulo de elasticidad promedio 66% inferior respecto al módulo de elasticidad promedio del grupo compuesto por 9 capas de FC y 10 de ABS.

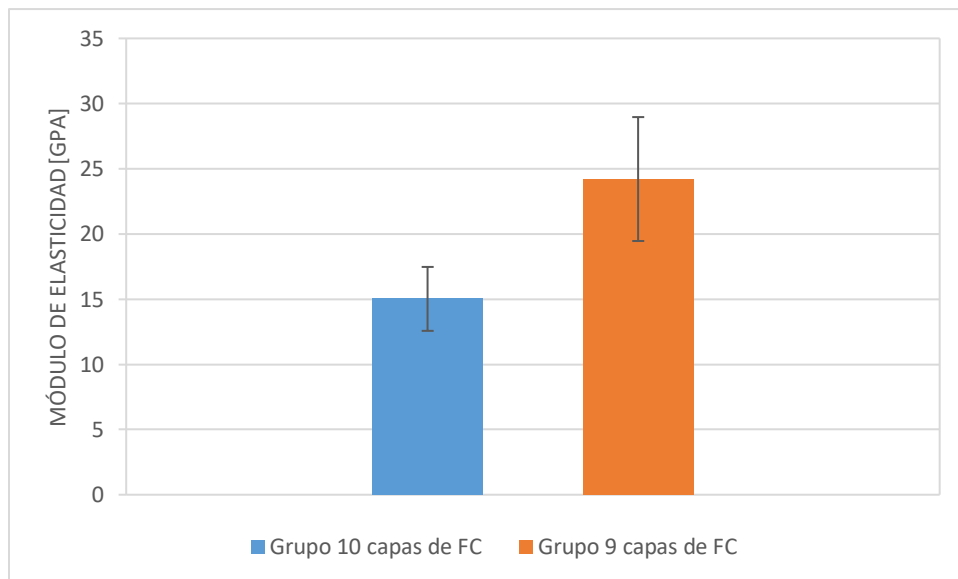


Figura 25. Resultados de las pruebas de flexión para los 2 grupos.

## 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 26 muestran que, contrario a lo que se esperaba, el material compuesto de mayor cantidad de fibra de carbono presentó menores valores de rigidez.

El resultado anterior se puede deber a que las probetas compuestas por mayor cantidad de fibra de carbono tenían tiras de fibra en contacto directo con el molde. El calor recibido por el molde durante la aplicación del ciclo térmico pudo afectar las propiedades de la fibra de carbono, como se demuestra en algunos estudios.

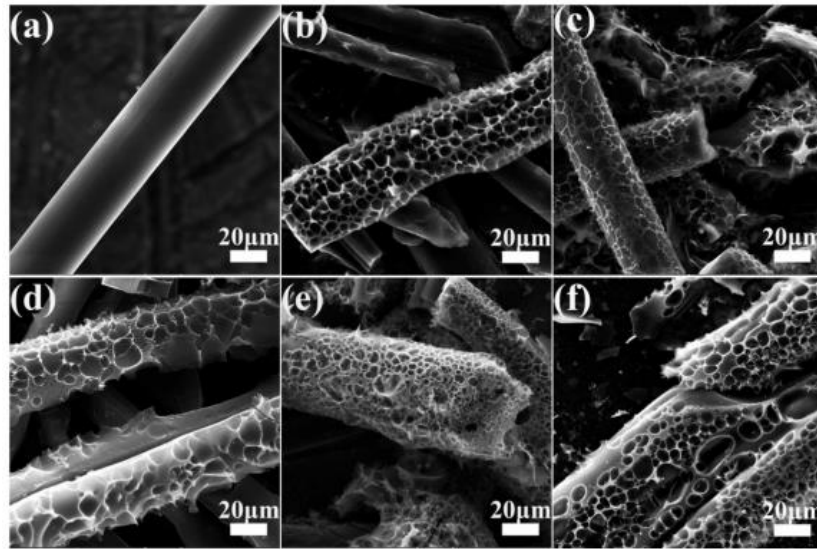


Figura 26. Efectos de la temperatura en la morfología superficial de la fibra de carbono. (a) FC temp. ambiente; (b) FC temp. 450°C; (c) FC temp. 550°C; (d) FC temp. 650°C; (e) FC temp. 750°C; (f) FC Temp. 850°C.

En la Figura 26 [24] se evidencia el efecto de la temperatura en la morfología superficial de la fibra de carbono, se puede observar cómo con la elevación de la temperatura se logra un efecto poroso en los diferentes filamentos de carbono.

Por otra parte, estudios también han constatado una relación entre el aumento de la temperatura a la cual ha sido sometida fibra de carbono y las propiedades finales de esta.

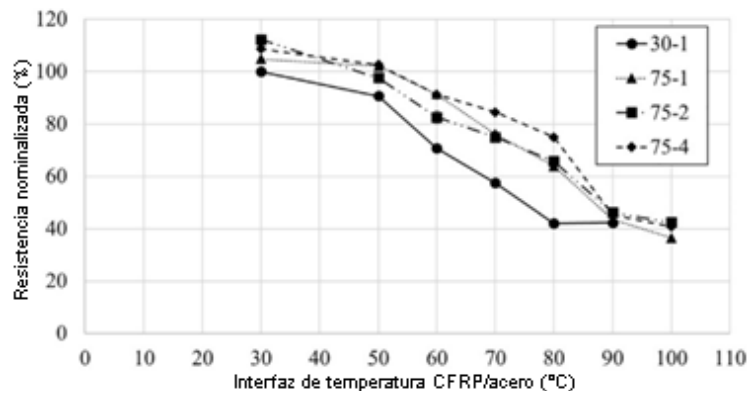


Figura 27. Efectos de la temperatura en las propiedades finales de un compuesto CFRP.



En la figura 27 [25] se muestra una tendencia a la disminución de las propiedades finales del compuesto de fibra de carbono debido a la temperatura a la cual se ha sometido.

De lo anterior se concluye que el efecto morfológico que sufre la fibra de carbono bajo diferentes temperaturas afecta de manera directa las propiedades finales del compuesto. Por lo cual, la manera en la cual recibe calor el compuesto puede tener influencia en las propiedades finales de éste.

## 8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

En el siguiente estudio se requirió obtener datos que permitan comparar entre los dos grupos evaluados.

### 8.1 Etapa de desarrollo: Diseño estadístico completamente aleatorizado.

Buscando determinar la sinergia entre la fibra de carbono y el ABS para mejorar su rigidez y la disminución de su densidad se ha procedido a evaluar su comportamiento frente a los siguientes dos tratamientos, un grupo se ha fabricado con capas intercaladas de 10 capas de fibra de carbono y 9 capas de ABS, para el otro grupo se han usado 9 capas de fibra de carbono y 10 capas de ABS.

Esto determina que se tiene un factor que es la variación del número de capas de ABS con dos niveles, la unidad experimental objeto de estudio es un compuesto de capas de fibras de carbono – ABS, como variable de respuesta se tiene la rigidez y su unidad de medida está en GPa, el experimento se replica 15 veces para cada tratamiento.

En la Tabla 9 se han registrado los datos obtenidos de la rigidez para cada grupo de estudio.

Tabla 9. Resultados de rigidez obtenidos.

Número de prueba	Rigidez (GPa)	
	Grupo 10 capas FC 9 capas ABS	Grupo 9 capas FC 10 capas ABS
1	15,5507	24,9990
2	14,3808	29,7800
3	16,5070	23,4630
4	13,3802	25,5730

5	19,3920	32,4400
6	17,7589	34,8420
7	16,6870	32,4210
8	11,9899	22,6250
9	13,6410	26,5680
10	18,7440	20,8070
11	11,2390	14,0640
12	13,8884	18,7520
13	15,5912	18,3460
14	12,2313	24,8480
15	14,3185	23,6410

Existe el interés en comparar los tratamientos en cuanto a sus medias poblacionales, sin olvidar la incertidumbre presente en el experimento. Así, se plantea las hipótesis comparando cada uno de los tratamientos a realizar.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = 0$$

$$H_A: \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i$$

Si los tratamientos son iguales en cuanto a sus medias desconocidas  $\mu_1, \mu_2$ , o si al menos uno de los tratamientos es diferente entre ellos. Dado las pocas muestras tomadas, sólo se podrá detectar grandes diferencias entre los tratamientos. Con varianzas desconocidas pero que se consideran iguales  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ . El modelo lineal que describirá el experimento será:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Supuestos del modelo:

$$\epsilon_{ij} \sim \text{Normal}(0, \sigma^2 I)$$

$$E[\epsilon_{ij}] = 0 \quad \forall i, j$$

$$\text{Var}[\epsilon_{ij}] = \sigma^2 I \quad \forall i, j$$

$$\text{Cov}[\epsilon_{ij}, \epsilon_{i'j'}] = 0 \quad \forall i \neq j$$

Donde,

$y_{ij}$ : Variable de respuesta de la  $j$ -ésima observación que se hizo en el tratamiento  $i$ .

$n_i$ : Tamaño de las repeticiones observadas en el tratamiento  $i$ .

$\mu$ : Parámetro de escala común a todos los tratamientos.

$\epsilon_{ij}$ : Error atribuible a la medición  $y_{ij}$ .

$\tau_i$ : El efecto del  $i$ -ésimo tratamiento sobre la variable de respuesta.

## ANOVA

$y_{i.}$ : Suma de las observaciones del tratamiento  $i$ .

$\bar{y}_{i.}$ : Media de las observaciones del tratamiento  $i$ .

$y_{..}$ : Suma total de las  $N$  ( $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ ) mediciones.

$\bar{y}_{..}$ : Media global de las observaciones.

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \quad \bar{y}_{i.} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \quad y_{..} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \quad \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N}; \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Al realizar la descomposición de la variabilidad total, se obtuvo que la fuente de variabilidad está dada por la variación o diferencia entre tratamientos y la variación de los tratamientos.

Tabla 10. Tabla del ANOVA.

Fuentes de Variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	$F_0$	Valor-p
Tratamientos	$SC_{Trat} = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{y_i^2}{n_i} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$k - 1$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{k - 1}$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E}$	$P[F > F_0]$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat}$	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$N - 1$			

Verificación de los supuestos del modelo:

- Prueba Shapiro  
Se propone la hipótesis de que las muestras medidas se distribuyen normalmente. Si el valor-p no es menor que el valor de significancia atribuido, no se rechaza la hipótesis. Por lo tanto, la muestra analizada se confirma que presenta una distribución normal. Si el valor-p es menor que el nivel de significancia entonces la hipótesis de que los datos se distribuyen normal es rechazada.
- Análisis de Residuales  
La evaluación de los residuales permite detectar posibles anomalías dentro del modelo.

Distancia de Cook

Como se observa en el análisis descriptivo se encontraron valores que son considerados como valores atípicos, esto permitirá determinar aquellas observaciones que presentan mayor influencia en la estimación de los coeficientes del modelo. La distancia cuadrática media se define como:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - \hat{Y}_{j(i)})^2}{p CM_E}$$

Se evaluó el cambio para todas las observaciones con o sin la presencia de la observación  $i$ -ésima, esto permitió conocer el impacto de la observación  $i$  en los valores ajustados. Donde,  $p$  es el número de coeficientes del modelo.

## 8.2. Resultados del análisis

### 8.2.1. Análisis descriptivo de datos

Se realizó un análisis descriptivo de la información para cada uno de los grupos, cada grupo cuenta con 15 unidades experimentales. En el grupo compuesto por 10 capas de FC se encontró que el valor mínimo de la rigidez reportado ha sido 11.24 GPa, el valor medio para este grupo ha sido de 15.02 GPa y el valor máximo alcanzado es de 19.39 GPa, cuenta con una desviación estándar de 2.45 GPa y un coeficiente de variación de 16.32%. En el grupo compuesto por 9 capas de FC se registra el valor más pequeño reportado para la rigidez de 14.06 GPa, su valor medio de la rigidez ha sido de 24.88 GPa y alcanza valores superiores de 34.84 GPa su coeficiente de variación es de 23.11%.

En la Figura 28 se observa la distribución de los datos recolectados, se puede observar que se presentan diferencias apreciables entre los grupos, el grupo de 10 capas de FC presentó menor variabilidad, un valor medio de la rigidez menor al del grupo de 9 capas de FC y cierta asimetría hacia la derecha, en el grupo compuesto por 9 capas de FC encontramos una mayor dispersión en los datos, el valor medio de la rigidez que presenta es mayor.

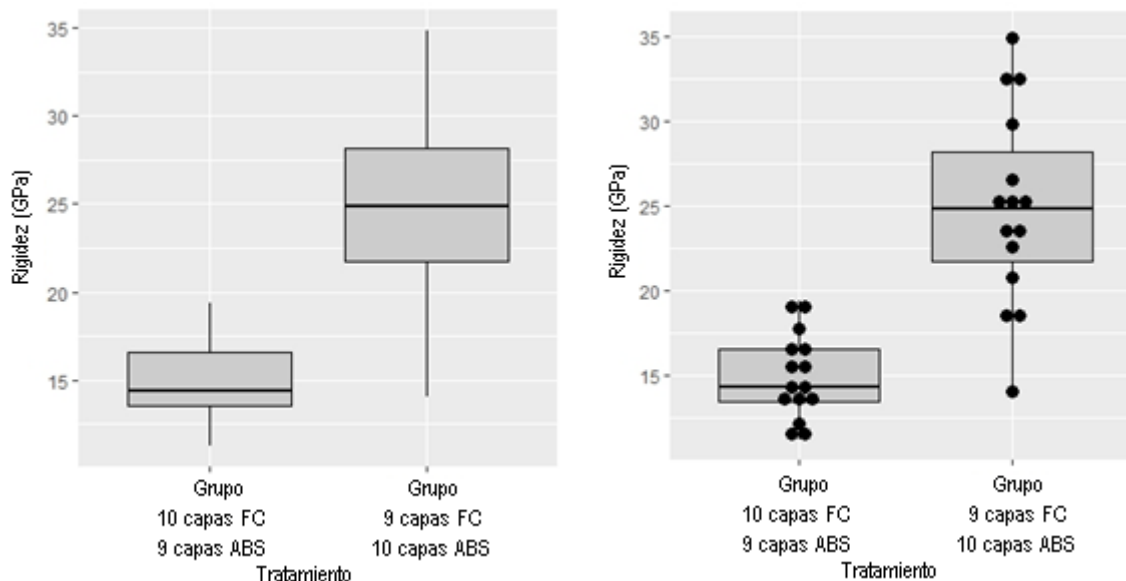


Figura 28. Diagrama de caja de los resultados de rigidez.

Por otro lado, en la Figura 29 se muestra la distribución de la rigidez en cada uno de los grupos, se puede observar que para el grupo de 10 capas de FC la distribución de los individuos presenta

un comportamiento leptocurtico y con un cierto nivel de asimetría hacia la derecha, la variabilidad que presenta el grupo es menor comparada con el grupo de 9 capas de FC, hay una mayor homogeneidad entre las muestras evaluadas del grupo de 10 capas de FC, el grupo 9 de capas de FC presenta un nivel de asimetría hacia la izquierda, se observan valores extremos que distorsionan la distribución para las muestras del grupo II.

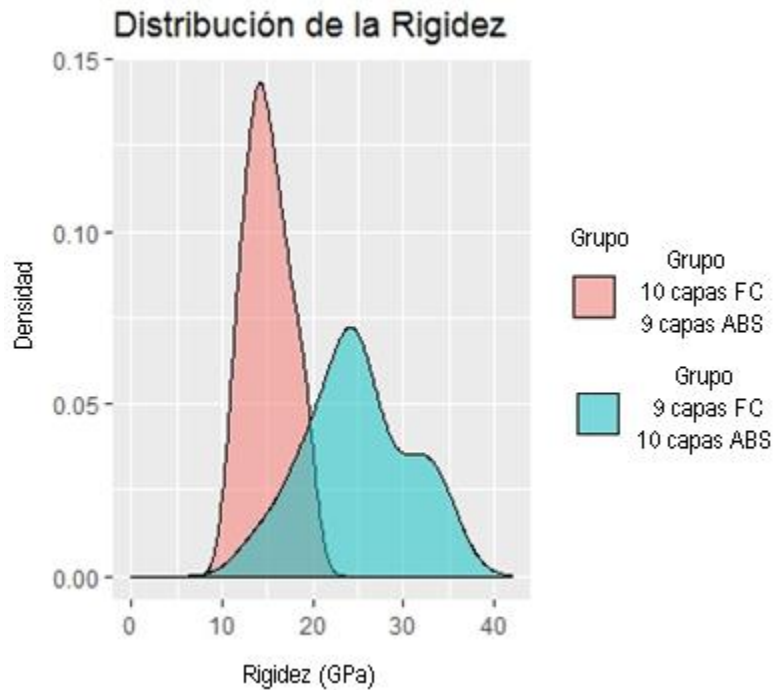


Figura 29. Distribución de rigidez.

### 8.3. Análisis de varianza (ANOVA)

En el análisis de varianza del modelo implementado del diseño de experimentos aleatorizado, se determina que el valor  $F_0$  es de 37.3, con una confianza del 95% se rechaza la hipótesis nula que las medias de los grupos de estudio presenten una media igual, por lo tanto existe evidencia suficiente para considerar que las medias de los grupos son diferentes, adicionalmente se aplica el test de Tukey se comprueba que la diferencia entre grupos es significativa. Por ello se puede afirmar que las muestras que presentan 10 capas de ABS y 9 capas de fibra de carbono van a presentar un mejor desempeño a la rigidez.

	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	$P(F > F_0)$
Grupos	1	728.8	728.8	37.3	1.37e-06
Residuales	28	547.2	19.5		

En la Figura 30 se muestra la gráfica de efectos principales, donde se evidencia que las muestras asociadas al Grupo de 9 capas de FC tienden a presentar valores superiores a los que presentan las muestras del Grupo de 10 capas de FC.

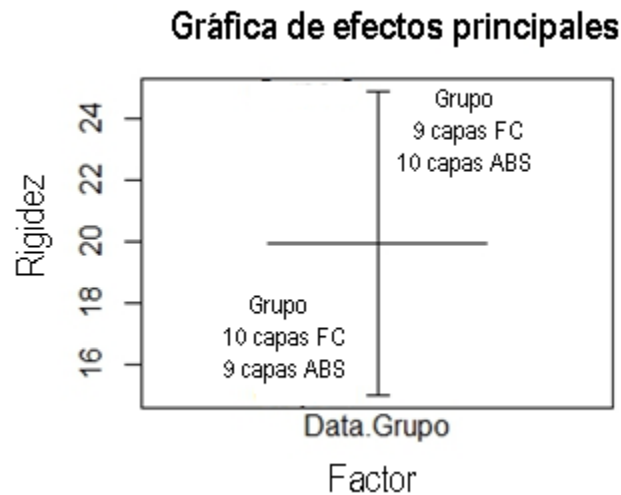


Figura 30. Gráfica de efectos principales.

Para validar el supuesto de normalidad en el modelo se realizó un QQ-Plot para verificar la normalidad de los datos como se muestra en la Figura 31. En el análisis de los datos se observó una agrupación con un comportamiento lineal, sin embargo, hay valores asociados al grupo de 9 capas de FC que llevan a pensar que la distribución de los datos no es normal, también pudo haber problemas en el control de las variables externas que hayan generado una modificación en el tratamiento. El valor del estadístico W cuenta con un valor alto de 0.98 y cuenta con un valor-p de 0.71, se valida el supuesto de normalidad de los datos.

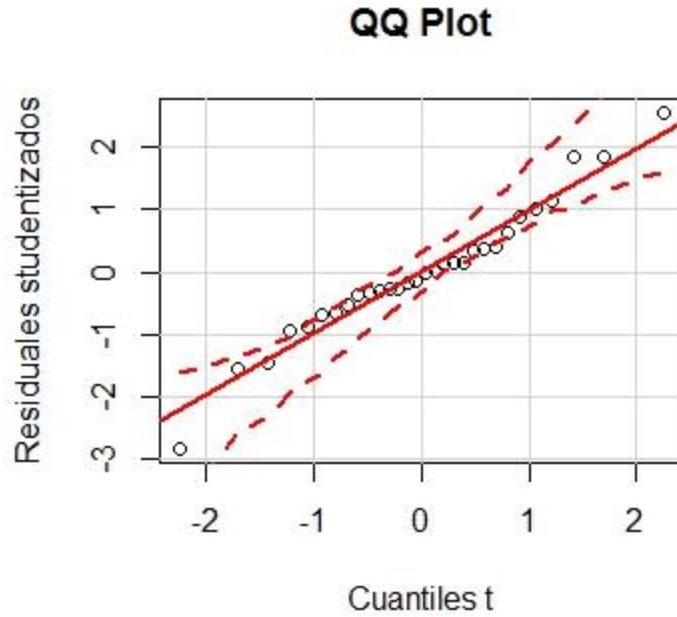


Figura 31. Gráfico de cuantiles.

Los valores observados asociados al grupo de 9 capas de FC, se evaluaron observando su influencia dentro del modelo y se encontró que las muestras 12 y 22 todas asociadas a este grupo presentan un grado de influencia mayor dentro del modelo. Esto puede generar ciertas anomalías al validar los supuestos de normalidad y homocedasticidad. La distribución de los residuales estudentizados se muestra en la Figura 32, y presenta una leve asimetría hacia la izquierda, sin embargo, la baja cantidad de muestras no permite asegurar que se presenten anomalías dentro del modelo.

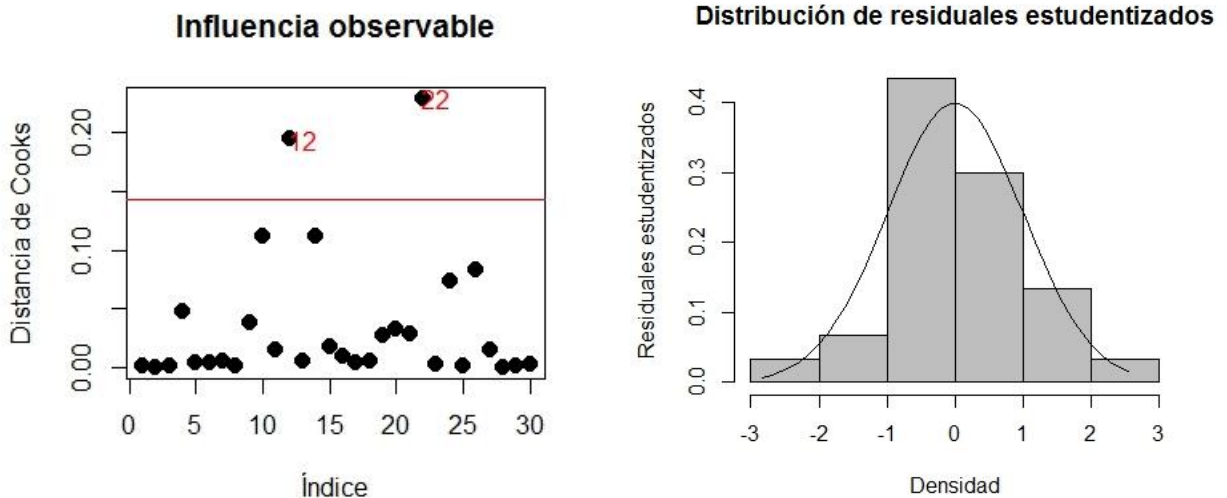


Figura 32. Evaluación de la distribución de residuales.



En la evaluación de los residuales se observa un valor atípico asociado al valor 2, al aplicar la prueba de Bonferroni con un valor de 0.25927. Aplicando la prueba de Barlett para evaluar la homogeneidad de varianzas con un  $k$  cuadrado de 8.83 y un valor-p de 0.0029, **permiten afirmar con un 95% de confianza que los datos de cada grupo no se distribuyen con la misma varianza.**

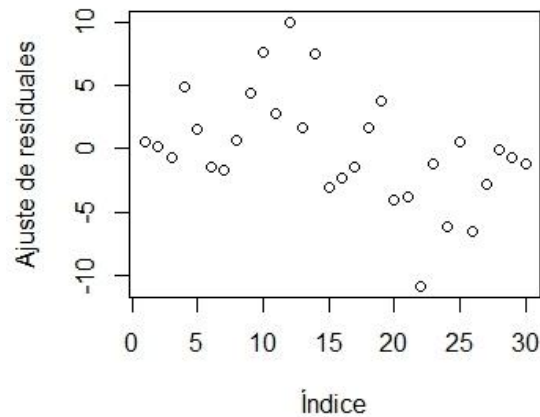


Figura 33. Ajuste de residuales.

Al encontrar diferencias entre las varianzas se aplica un test de comparación de media para grupos de datos con varianzas diferentes, el valor del estadístico  $t$  es -6.1071, el valor-p obtenido es de  $7.286e-06$ , esto suministra información suficiente para rechazar la hipótesis nula, se considera así con un 95% de confianza que existe una diferencia entre las medias. Se realizó la prueba de normalidad para cada uno de los grupos y se encuentra que cada uno con valores de  $W$  de 0.96798 y 0.97351, respectivamente; el valor-p de 0.8272 y 0.9062, respectivamente, permite validar los supuestos de normalidad para cada grupo.

#### 8.4. Intervalos de confianza

Se determinan los intervalos con un nivel de confianza del 95% alrededor de la media de los grupos. Se tiene que el intervalo de confianza del valor medio del grupo de 10 capas de FC para los niveles de rigidez se encuentran entre 13.66 GPa y 16.38 GPa, mientras que para las muestras del grupo 9 capas de FC son de 21.69 GPa y 28.06 GPa, **esto permite concluir como factor de mérito en la rigidez del material, la adición de plástico aumenta la rigidez, los materiales con mayor rigidez se presentan en las capas compuestas de 10 capas de ABS y 9 capas de fibra de carbono.**

### 9. CONCLUSIONES

- El aumento del ABS y la disminución de la fibra de carbono permitió obtener una rigidez más alta. Este resultado se puede deber a que las probetas con mayor cantidad de fibra tenían tiras de fibra de carbono en las caras exteriores, en contacto directo con el molde, por lo cual los filamentos de carbono se pueden haber visto afectados morfológicamente.
- Las probetas con menor cantidad de FC tenían películas de ABS en contacto directo con el molde, por lo cual la fibra estaba protegida del contacto directo con el molde caliente,

por lo cual la fibra puede presentar mejores propiedades que la fibra expuesta a altas temperaturas.

- Un tiempo  $t_1$  muy corto y/o un tiempo  $t_2$  muy prolongado puede quemar el compuesto
- El ciclo térmico óptimo fue de  $t_1= 3h$ ;  $t_2= 6h$  y  $T=230^{\circ}C$ .
- El aislamiento realizado con papel aluminio en el molde permitió que no se presentara defectos superficiales en las probetas.
- El grupo de 10 capas de FC presentó una mejor distribución de la rigidez.
- La impresión 3D permitió obtener numerosas láminas de ABS con un buen acabado superficial.

## 10. RECOMENDACIONES

- Mejorar las condiciones experimentales para evitar dispersión entre los datos, como controlar mejor la presión aplicada
- Aplicar películas de desengrasante en cada superficie del molde que esté en contacto con el compuesto
- Dejar que el molde se enfríe totalmente antes de retirarlo del horno, para evitar contracciones térmicas

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Mrazova, "Advanced composite materials of the future in aerospace industry," *INCAS Bull.*, vol. 5, no. 3, pp. 139–150, 2013.
- [2] Z. S. Bagheri, I. El Sawi, E. H. Schemitsch, R. Zdero, and H. Bougherara, "Biomechanical properties of an advanced new carbon/flax/epoxy composite material for bone plate applications," 2013.
- [3] Plastics International, "ABS | Plastics International." [Online]. Available: <http://www.plasticsintl.com/abs.htm>. [Accessed: 10-Jan-2018].
- [4] D. Hull, *Materiales compuestos*. Reverté, 1987.
- [5] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*. 1999.
- [6] RESINEX, "ABS | Tipos de polímeros," 2013. [Online]. Available: <http://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/abs.html>. [Accessed: 14-Oct-2018].
- [7] Tecnología de los Plásticos, "ABS," 2011. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>. [Accessed: 14-Oct-2018].
- [8] J. V. O. Molina, "CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS DE ABS Y PLA SEMI - RÍGIDO IMPRESOR EN 3D CON CINCO MALLADOS INTERNOS DIFERENTES," Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [9] QuimiNet.com, "Acronitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones," 2006. [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/acronitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>. [Accessed: 14-Oct-2018].

- [10] Universitat de Barcelona, “Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) | CMEmaterials,” 2004. [Online]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs>. [Accessed: 14-Oct-2018].
- [11] P. J. Ccollque V, “REFORZAMIENTO DEL CONCRETO CON FIBRA DE CARBONO,” Juliaca, 2012.
- [12] D. D. L. Chung, “Structure of Carbon Fibers,” *Carbon Fiber Compos.*, pp. 55–64, 1994.
- [13] D. D. L. Chung, *Carbon Composites*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1994.
- [14] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers,” *Materials (Basel)*, vol. 2, no. 4, pp. 2369–2403, 2009.
- [15] Mizar Additive, “¿Qué es la fabricación aditiva?,” 2016. [Online]. Available: <http://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/>. [Accessed: 06-Nov-2018].
- [16] TENDENCIAS21, “La Fabricación Aditiva conduce a una nueva revolución industrial,” 2011. [Online]. Available: [https://www.tendencias21.net/La-Fabricacion-Aditiva-conduce-a-una-nueva-revolucion-industrial\\_a8558.html](https://www.tendencias21.net/La-Fabricacion-Aditiva-conduce-a-una-nueva-revolucion-industrial_a8558.html). [Accessed: 06-Nov-2018].
- [17] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, and M. Trada, “A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 856–873, Jun. 2011.
- [18] R. J. Crawford, *Plastics Engineering*, 3rd ed. 1998.
- [19] TR3SDLAND, “Calibrar temperatura de extrusión en plástico ABS.” [Online]. Available: <https://www.tr3sdland.com/2013/04/calibrar-temperatura-extrusion-plastico-abs/>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [20] XYZprinting, “ABS Filament | 3D Printing Materials |.” [Online]. Available: <https://www.xyzprinting.com/en-GB/material/abs>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [21] G. Qin, J. Na, W. Mu, W. Tan, J. Yang, and J. Ren, “Effect of continuous high temperature exposure on the adhesive strength of epoxy adhesive, CFRP and adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 154, pp. 43–55, 2018.
- [22] D. J. Kwon, J. H. Kim, S. M. Park, I. J. Kwon, K. L. DeVries, and J. M. Park, “Damage sensing, mechanical and interfacial properties of resins suitable for new CFRP rope for elevator applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 157, pp. 259–265, 2019.
- [23] X. Yue, X. Yang, J. Tian, Z. He, and Y. Fan, “Thermal, mechanical and chemical material removal mechanism of carbon fiber reinforced polymers in electrical discharge machining,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 133, pp. 4–17, 2018.
- [24] Yeqiong Zhanga *et al.*, “Effects of activation temperatures on the surface structures and supercapacitive performances of porous carbon fibers,” *ELSEVIER*, p. 8, 2018.
- [25] E.R.K. Chandrathilaka, J.C.P.H. Gamage, and S. Fawzia, “Mechanical characterization of CFRP/steel bond cured and tested at elevated temperature,” *ELSEVIER*, p. 7, 2019.

## 11. ANEXOS

### 11.1. Plano del molde de compresión

