

## Estudio de resistencia a la compresión de materiales compuestos laminados reforzados y barrenados

**DR. RAMIREZ ELIAS VICTOR ALFONSO 1  
RIVERA CASTAÑEDA ISAAC ARMANDO 2  
DUARTE FORERO JAIRA NATALY 3  
PETRO AGUIRRE EDWIN DANIEL 4**

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA, UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
1) va.ramirez@ugto.mx, 2) isaac.rivera@ugto.mx , 3) jairaduarte@usantotomas.edu.co ,  
4) edwinpetro@usantotomas.edu.co

### 1.- Introducción

Tsao y Keilin Kuo encontraron que la fuerza de empuje de la broca hemisférica en el taladro y las relaciones en delaminación de aproximadamente 0,8 tiene un efecto significativo en la prevención del daño por delaminación [1].

Eshetu D. Eneyew y M. Ramulu encontraron que, el desprendimiento de la fibra se produjo en dos sectores específicos en relación con el ángulo entre la dirección de corte y la orientación de la fibra. La fuerza de empuje estuvo muy influenciada por la velocidad de avance que por la velocidad de corte [2].

La velocidad de avance y el ángulo del punto de perforación gobiernan el comportamiento de la fuerza de empuje y la extensión del área delaminada en la perforación de laminados GFRP unidireccionales y el efecto de la velocidad de corte es despreciable [3].

La resistencia de las estructuras de los materiales compuestos disminuye significativamente después del impacto porque las fibras cargadas están fracturadas y estas ya no están soportando adecuadamente las fuerzas inducidas en la

matriz.

Debido a que los tejidos en 3D son muy difíciles de maquinar estos son pocos usados industrialmente ya que su manufactura suele ser más compleja, los tejidos en 3D de materiales compuestos presentan mayores prestaciones en el grosor de estos pero debido a lo antes mencionado se ha optado por utilizar velos como refuerzo interlaminar [4].

Es importante considerar el ensayo denominado compresión después del impacto bajo el Estándar Británico (BS ISO 18352: 2009) que es muy similar a los estándares de Boeing y Airbus.

Los velos son muy fáciles de aplicar, pero se requiere una compactación de preformas calientes específica y crítica [4].

Los materiales compuestos producidos con velo de poliéster mostraron mejoras significativas en la tenacidad interlaminar Modo-I. En contraste, los laminados intercalados con velo de carbono tenían la tenacidad interlaminar de Modo I más pobre [5].

Los materiales compuestos producidos con velo de poliéster mostraron mejoras significati-

vas en la tenacidad interlaminar Modo-II. En contraste, los laminados intercalados de velo de carbono tenían la tenacidad interlaminar de Modo II más pobre [6].

Se encontró que el tipo de polímero y el peso del área del velo eran los factores más importantes que contribuían al rendimiento del laminado. Un velo con una buena optimización de estas características proporcionó mejoras en la resistencia a la fractura de 156% y 69% para el Modo I y el Modo II, respectivamente [7].

Es importante saber interpretar los datos obtenidos en los ensayos de a compresión en materiales compuestos sujetos a barrenos ya que los especímenes serán hechos de fibra de carbón hechos por el método de impresión 3D este método tendrá variantes a las ya antes mencionadas referencias, pero sin olvidar que dichas referencias nos abren camino para la siguiente suposición:

Se cree que los velos como refuerzo interlaminar podrían ayudar a la tenacidad de materiales compuestos por fibra de carbón sujetos a barrenos y que estos adquieren mayor tenacidad.

## 2.- Materiales

Para los especímenes se utilizó como material PLA Y PLA-CF manufacturados por medio del método de impresión 3D en la máquina ANY-CUBIC I3 MEGA.

En la Figura 1 muestra una representación de la fabricación en la impresora 3D de los especímenes a ensayar, los cuales en la siguiente Tabla 1 muestra el tipo de material.

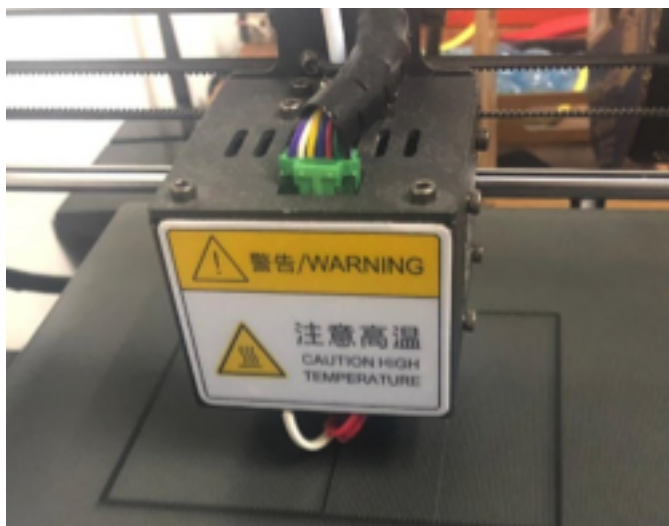


Figura 1. Impresión 3D CFRP.

Tabla 1-. Propiedades del CFRP Y PLA [8].

| Property                      | Printing Direction | CFRP/PLA      | ASTM  |
|-------------------------------|--------------------|---------------|-------|
| Young's Modulus               | 0°                 | 3.61 /3.5 GPa | D638  |
|                               | 90°                | 1.82 GPa      |       |
| Shear Modulus Poisson's ratio | ± 45°              | 0.92/2.4 GPa  | D3518 |
|                               | v12                | 0.408         |       |
|                               | v21                | 0.163         |       |

Todas las probetas contienen las medias de 5,5×8,9×3,5 cm

Volumen total sin barreno 8566,25 [mm] ^3

Volumen total con barreno 8428,81 [mm] ^3

## 3.- Manufactura

.Parámetros de Impresión

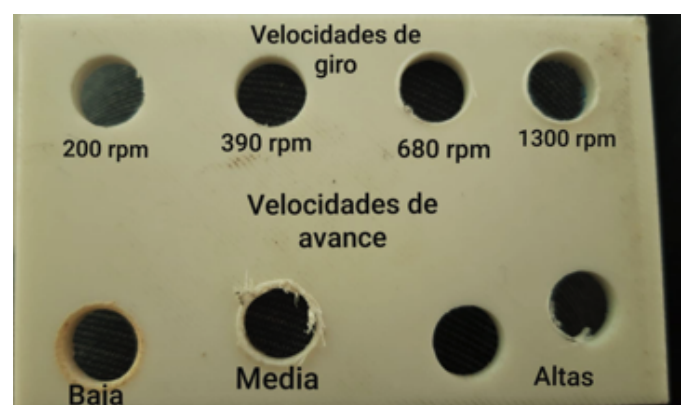
En la siguiente Tabla 2 describe los parámetros usados en el Software ®Cura 3.6.0.

.Barrenos

Para la manufactura de los especímenes que en total suman 24 algunos de estos tenían que realizarse un barreno maquinado el cual fue con una broca de 10 mm justo en el centro de la probeta, fue realizado en un taladro de banco y se encontró que la velocidad de avance es influenciada para causar daños alrededor del barreno. En la siguiente Figura 2 muestra diferentes tipos de velocidad de avance, así como de giro siendo esta última un factor menospreciado ya que no causa daños en el material.

Tabla 2-. Propiedades de impresión

| Propiedad                            | PLA / PLA-CF       |
|--------------------------------------|--------------------|
| Temperatura de impresión (extrusión) | 203 °C / 210 °C    |
| Temperatura de cama                  | 65 °C              |
| Tiempo de impresión (por probeta)    | 1h 13 min / 56 min |



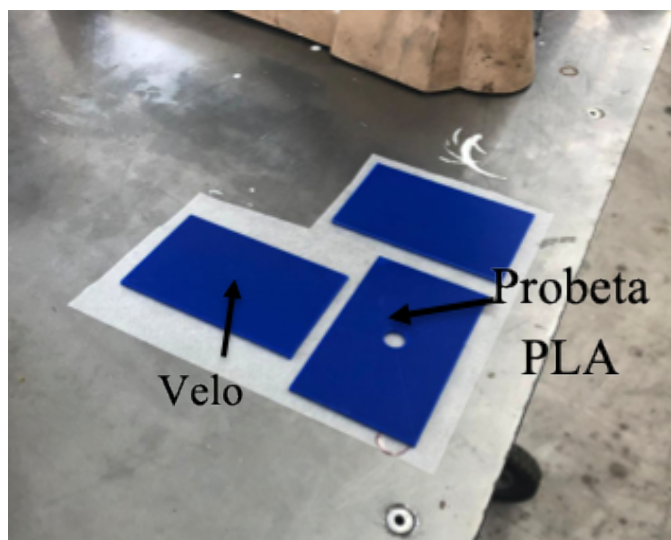
**Figura 2.** Velocidades de giro y avance.

La velocidad de giro usada en todas las probetas fue de 680 rpm y con una velocidad de avance 2.1 mm/s.

- Refuerzo interlaminar

Al agregar el refuerzo interlaminar se fabricaron dos piezas de la misma medida que los demás especímenes con la única consideración que tendrían la mitad del espesor este para después agregar el velo adherido con resina y dejándose reposar 14 días para su curado a temperatura ambiente, ya que se encontró que el elevar la temperatura en un horno causa pandeo en las probetas.

En la siguiente Figura 3 muestra las probetas con la adhesión del velo por medio de resina.

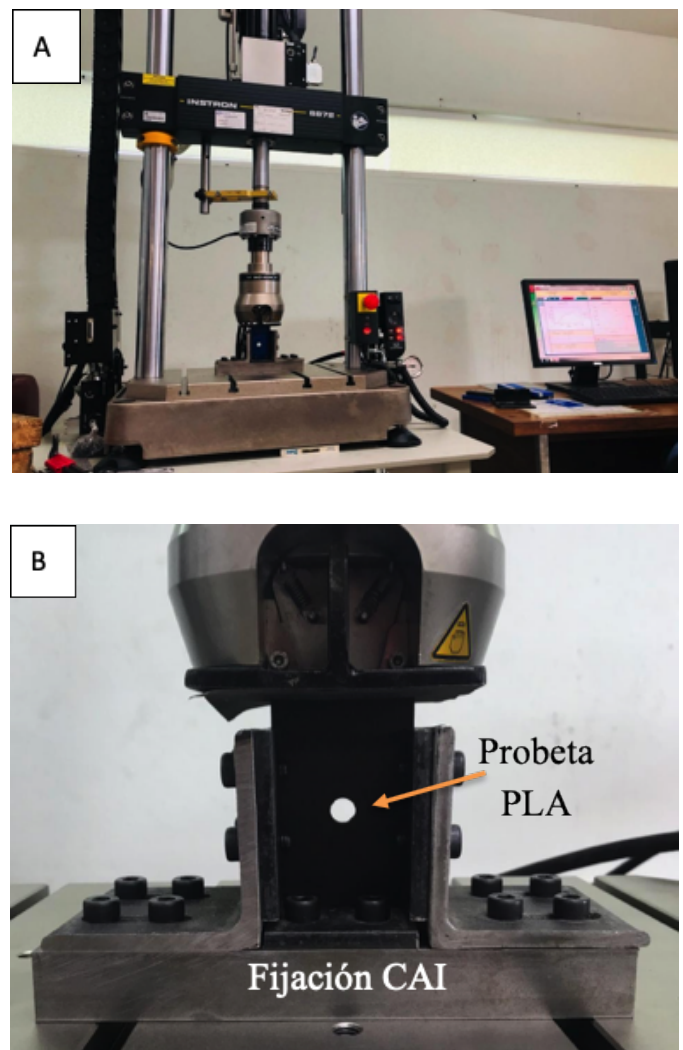


**Figura 3.** Aplicación del refuerzo interlaminar.

#### 4.- Metodología De Ensayos

Se basó en la norma creada por Boeing para el ensayo llamado Compresión después del impacto (CAI) BSS 7260 y también se tuvo el conocimiento de las siguientes normas americanas para medir la resistencia al daño de un material compuesto ASTM D7136 / D7136M – 15.

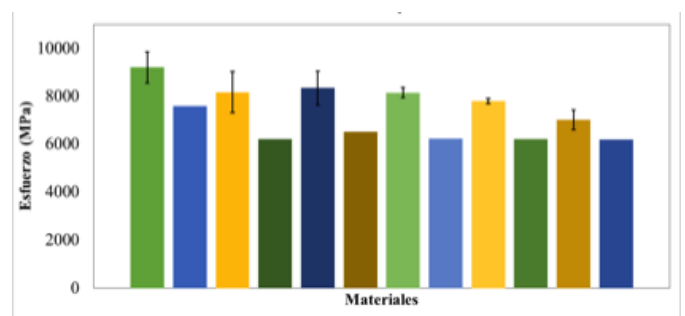
La Figura 4 muestra cómo fueron fijadas a la máquina @INSTRON 8872.



**Figura 4.** A) @INSTRON 8872 Fatiga de servo-hidráulica B) Fijación CAI.

#### 5.- DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En la siguiente Figura 5 muestra el comportamiento de cada una de las pruebas realizadas.



**Figura 5.** Esfuerzo máximo de diferentes tipos de materiales.

El código de colores para cada material es el siguiente:

- PLA
- PLA REFORZADA CON VELO
- PLA BARRENO MAQUINADO
- PLA REFORZADA CON VELO BARRENO MAQUINADO
- PLA BARRENO DISEÑADO
- PLA REFORZADA CON VELO BARRENO DISEÑADO
- PLA CON FIBRA DE CARBONO
- PLA CON FIBRA DE CARBONO REFORZADA CON VELO
- PLA CON FIBRA DE CARBONO BARRENO MAQUINADO
- PLA REFORZADA CON VELO BARRENO MAQUINADO

En la Figura 5 se observa que el refuerzo interlaminar no presenta mejoras en el esfuerzo máximo soportado, si no que por el contrario presenta deficiencias. Por otro lado, el velo ayudo a disminuir la falla por pandeo.

En el caso de las probetas con barreno maquinado y diseñado no es posible obtener diferencias significativas ya que presentan un comportamiento similar y a su vez una mayor dispersión de datos.

Se puede observar que el PLA reforzado con fibra de carbón tiene un comportamiento más uniforme con una menor dispersión de datos, de igual forma el refuerzo interlaminar disminuye su resistencia, pero ayuda a distribuir los esfuerzos de una manera más homogénea.

En las probetas que tienen barreno y están reforzadas con fibra de carbón si es posible observar una diferencia en la resistencia a la compresión dependiendo de la manufactura del barreno, siendo más conveniente realizar el barreno con una broca de 10 mm para este caso.

## 6.- Conclusiones

La probeta con mayor resistencia a la compresión es que está fabricada con PLA sin ningún tipo de concentrador de esfuerzos o refuerzo interlaminar mayor a las probetas reforzadas con fibra de carbón.

La adición de barrenos en las probetas disminuye la resistencia a la compresión de las mismas

sin importar el material y el método de fabricación del barreno.

El refuerzo interlaminar disminuyó la resistencia a la compresión en comparación con las probetas que no contenían refuerzo y a su vez sus que sin importar el material y sus condiciones la utilización de velos afecta en la misma medida el esfuerzo máximo a la compresión.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al asesor Dr. Víctor Alfonso Ramírez Elías por el acompañamiento y capacitación brindada a lo largo de la investigación. De igual manera a la Universidad de Guanajuato por su programa llamado veranos en la ciencia UG.

## Referencias

- [1] Tsao C, Kuo K. Theoretical Analysis of Thrust-Induced Delamination in Hemispherical Drilling Composite Materials. ASME. Engineering Systems Design and Analysis, Volume 1: Applied Mechanics; Automotive Systems; Biomedical Biotechnology Engineering; Computational Mechanics; Design; Digital Manufacturing; Education; Marine and Aerospace Applications ();V001T01A012. doi:10.1115/ESDA2014-20633.
- [2] Eneyew ED, Ramulu MM. Hole Surface Quality and Damage When Drilling Unidirectional CFRP Composites. ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 3: Design, Materials and Manufacturing, Parts A, B, and C ();2043-2051. doi:10.1115/IMECE2012-88426.
- [3] Karimi N, Heidary H, Najafabadi M, Kianfar P, Minak G, Zucchelli A. Online Monitoring of Drilling-Induced Delamination of Composite Materials by Acoustic Emission. ASME. Engineering Systems Design and Analysis, Volume 3: Advanced Composite Materials and Processing; Robotics; Information Management and PLM; Design Engineering ();57-61. doi:10.1115/ESDA2012-82549.
- [4] Lingang Zhu, Investigations on damage resistance of carbon fiber composite panels toughened using veils, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 26, Issue 3, 2013, Pages 807-813, ISSN 1000-9361,

[doi.org/10.1016/j.cja.2013.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.05.006).

[5] M. Kuwata, P.J. Hogg, Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 1. Mode-I testing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 42, Issue 10, 2011, Pages 1551-1559, ISSN 1359-835X  
[doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.016](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.016).

[6] M. Kuwata, P.J. Hogg, Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 2. Mode-II testing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 42, Issue 10, 2011, Pages 1560-1570, ISSN 1359-835X.  
[doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.017](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.017).

[7] W. Beckermann, Gareth & Pickering, K. (2015). Mode I and Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Composite Laminates Interleaved with Electrospun Nanofibre Veils. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 72.  
[doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.028](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.028).