

## ESTUDIO DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE ROTURA EN UNIONES ABULONADAS DE MATERIAL COMPUESTO

David Díaz Maimone<sup>a</sup>, Leonel O. Pico<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Área de Estructuras, Departamento de Ing. Civil y Agrimensura, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CIFICEN, Av. del Valle 5737, Argentina,  
[david.diaz@fio.unicen.edu.ar](mailto:david.diaz@fio.unicen.edu.ar), <http://www.fio.unicen.edu.ar>

<sup>b</sup>Área Mecánica, Departamento de Electromecánica, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CIFICEN, Av. del Valle 5737, Argentina, [lpico@fio.unicen.edu.ar](mailto:lpico@fio.unicen.edu.ar),  
<http://www.fio.unicen.edu.ar>

**Palabras clave:** Material compuesto, elementos finitos, uniones abulonadas, falla.

**Resumen.** Se ha realizado un estudio de comparación de los diferentes criterios de rotura para uniones formadas por material compuesto de carbono de tipo single-lap y double-lap, sometida a la tracción en software. Entre los criterios a comparar se encuentran el criterio de resistencia “First ply failure” (FPF) y el criterio de rigidez de la norma ASTM 5961. El primer criterio utiliza las condiciones propuestas por Hashing para la rotura de una sola lámina. Los resultados indican que para los datos del presente trabajo, para los modelos de tipo single-lap, el criterio de rigidez de la norma ASTM es más restrictiva que para modelos double-lap. Para los modelos de tipo double-lap, es más restrictivo el criterio de resistencia FPF. Para modelos de tipo single-lap, la resolución numérica, considerando FPF se acerca más a los resultados experimentales. Para modelos de tipo double-lap, la resolución numérica, considerando el criterio de norma ASTM, se acerca más a los resultados experimentales. En todos los casos, la resolución numérica es conservadora.

**Keywords:** Composite materials, finite elements, bolted joints, failure.

**Abstract.** A comparison study of the different failure criteria for joints formed by carbon composite material of the Single-lap and Double-lap type, subjected to traction in software, has been carried out. Among the criteria to be compared are the “First ply failure” (FPF) resistance criterion and the stiffness criterion of the ASTM 5961 standard. The first criterion uses the conditions proposed by Hashing for the failure of a single sheet. The results indicate that for the data of the present work, for Single-lap type models, the stiffness criterion of the ASTM standard is more restrictive than for Double-lap models. For Double-lap type models, the FPF resistance criterion is more restrictive. For Single-lap type models, the numerical resolution, considering FPF, is closer to the experimental results. For Double-lap type models, the numerical resolution, considering the ASTM standard criteria, is closer to the experimental results. In all cases, the numerical resolution is conservative.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos realizados con fibras de carbono (CFRP) resultan tener mejores comportamientos que los metálicos en varias aplicaciones ingenieriles. En particular, resulta de interés el estudio de uniones abulonadas de materiales compuestos. Éstas poseen ventajas frente a otros tipos de uniones como lo son las uniones soldadas. Las ventajas radican en que son fáciles de desmontar, su manipulación puede realizarse con cualquier clase de operario y sin requerir tratamientos previos, no son afectadas por las condiciones climáticas y su rotura no es catastrófica [1]. Durante más de 50 años, el comportamiento mecánico de las uniones abulonadas ha sido el foco de una extensa investigación, utilizando métodos experimentales, analíticos y numéricos (FEM). Estudios como los realizados por T.A. Collings [2] en 1977 han obtenido los primeros resultados de ensayos para determinados arreglos de laminados de  $[0, \pm 45]$ . Hoy en día se cuenta con diversa cantidad de investigaciones donde se desarrollan análisis numéricos que modelan en software de elementos finitos diferentes uniones abulonadas de materiales compuestos [3-6].

Entre los criterios más utilizados para considerar la rotura de la unión se encuentran el criterio de “First Ply Failure” (FPF) y el criterio de la norma ASTM [7]. El objetivo del presente trabajo es comparar los diferentes criterios de rotura en uniones abulonadas de material compuesto mediante la simulación numérica. Se tienen como referencia tres ensayos físicos de la literatura, de los cuales se consultan las curvas de fuerza-desplazamiento. Los materiales de las fibras de las láminas compuestas en los tres modelos son de carbono de similares propiedades mecánicas. El apilamiento es cuasi-isotrópico y es crucial para poder hacer comparables estos estudios.

## 2 CRITERIOS DE ROTURA PARA UNIONES ABULONADAS DE MATERIAL COMPUESTO

Uno de los criterios de rotura para el laminado es el “First Ply Failure” [9]. El mismo considera fallado un laminado cuando ocurra la primera rotura en cualquier lámina que lo compone. El criterio de rotura de lámina adoptado es el propuesto por Hashing [10]. Éste supone que una lámina puede fallar de cuatro maneras. Como la lámina posee dos fases bien definidas que son la matriz de resina y el refuerzo de fibras, cualquiera de las dos fases puede fallar y a su vez este suceso se puede deber a distintos tipos de esfuerzos, como ser tracción o compresión. En una lámina, la falla puede ocurrir en la fase de fibras, sometida a tracción (FT) o a la compresión (FC). Por su parte, la fase de la matriz puede fallar a tracción (MT) o compresión (MC), tal como lo indican la Figura 1 y las ecuaciones 1 a 4, [10].

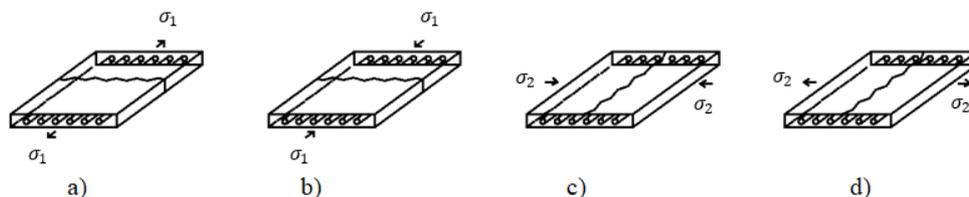


Figura 1: Criterio de Hashing: a) Fibras a tracción; b) Fibras a compresión; c) Matriz a compresión; d) Matriz a tracción.

Falla en la fibra por tracción ( $\sigma_{xx} > 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

Falla en la fibra por compresión ( $\sigma_{xx} < 0$ )

$$\left| \frac{\sigma_{xx}}{X_c} \right| \geq 1 \quad (2)$$

Falla en la matriz por tracción ( $\sigma_{yy} + \sigma_{zz} > 0$ )

$$\left( \frac{\sigma_{yy}}{Y_t} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

Falla en la matriz por compresión ( $\sigma_{yy} + \sigma_{zz} > 0$ )

$$\left( \frac{\sigma_{yy}}{Y_c} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xz}}{S_{yz}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

A través de la envolvente de estados tensionales del laminado es posible obtener los máximos valores de tensiones de todas las láminas, sin la necesidad de verificar lámina a lámina el criterio de rotura. De este modo, se determina con la envolvente la primera lámina que falle desde el primer instante de cada simulación numérica y en todas las situaciones de falla mencionadas (FT, FC, MT o MC).

Algunos autores siguen más allá de este punto donde la primera lámina alcanzó la falla. El procedimiento consiste en reducir progresivamente los módulos de elasticidad (parcial o totalmente) de la lámina que falla y luego se incrementa la carga, hasta lograr la rotura de todas las láminas del laminado. Este proceso es llamado “degradación”. Esta degradación puede observarse en una curva de carga-desplazamiento [11].

El segundo criterio que se utilizará en este estudio es el tomado por la norma ASTM 5961. Este criterio señala que la rotura de la unión ocurre cuando la deformación específica del agujero alcanza el 4%. Para la lectura de la deformación del agujero se utilizan extensómetros ubicados en ambos laminados, tal como lo indica la Figura 2.

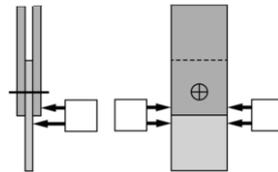


Figura 2: Posición de los extensómetros para leer deformaciones en vista frontal y lateral.

La norma ASTM 5961 establece recomendaciones geométricas para que la falla de la unión sea por aplastamiento. Como esto es una rotura no catastrófica, la falla se determina mediante un criterio de rigidez. Se prefiere un tipo de falla no catastrófica antes que la falla de tipo catastrófica. Para ello, la norma ASTM 5961 indica que la relación ancho/diámetro  $W/d$  debe ser mayor que 4.

Por otra parte, las fallas más comunes en uniones abulonadas son por aplastamiento, tracción y corte [12]. Estas fallas se determinan mediante las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente y servirán para comparar los resultados obtenidos numéricamente con los resultados experimentales de la literatura, considerando los criterios mencionados.

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{P}{d \cdot t} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{tracción}} = \frac{P \cdot K_t}{(W - d) \cdot t} \quad (6)$$

$$\tau_{corte} = \frac{P}{2 \cdot (e \cdot t)} \quad (7)$$

En todos los casos, P es la carga que hace fallar la unión y  $K_t$  el factor de concentración de tensiones para materiales compuestos, el cual se calcula con la ecuación 8 [12].

$$K_t = 0.22 \cdot \left( \frac{W^2 + d^2}{d \cdot W} \right) + 1 \quad (8)$$

Los resultados de  $K_t$  calculados son 2.55 (Modelo 1) y 2.14 (Modelos 2 y 3).

### 3 ESPECIFICACIONES GENERALES

En el presente trabajo se modelan tres uniones abulonadas de material compuesto. En todos los casos, W es el ancho del medio de unión y d es el diámetro del agujero. El primer caso (Modelo 1) es de tipo double-lap con relación  $W/d \approx 8$ , mientras que el segundo caso (Modelo 2) y el tercer caso (Modelo 3) son single-lap con relación  $W/d=6$ . Estas relaciones W/d respetan lo indicado por la norma ASTM 5961 para que la falla ocurra por aplastamiento.

Se ha contemplado el pretensado del bulón a través de un módulo de carga. El pretensado del bulón tiene la función de lograr una mejor transferencia de carga entre las distintas láminas. Se ha considerado un coeficiente de fricción de 0.11 entre las superficies que entran en contacto. Se aplica la condición de borde empotrado para un extremo de la unión y la carga a través de un desplazamiento constante de 1 mm/min para el otro extremo. La tipología de elemento finito utilizada es elemento 3D de ocho nodos [8]. Se han realizado modelos numéricos con aproximadamente 12000 nodos. Para el mallado se adoptó un refinamiento de la malla en cercanías del agujero.

### 4 MODELOS

#### 4.1 Modelo 1

El primer modelo numérico (ver Figura 3) reproduce el ensayo de Yi Xiao (2005) [13], donde se estudia una unión de tipo double-lap, de un solo bulón de 4.8 mm de diámetro, con un pretensado de 2.5 kN. Las dimensiones son 38.1 mm de ancho, 2.24 mm de espesor y 110 mm de largo. La distancia en sentido longitudinal que hay entre el centro del agujero al borde más angosto “e” es 15 mm. Las planchuelas externas son de acero, de 3 mm de espesor y de 48 mm de largo ( $E=210000$  MPa,  $\mu=0.3$ ). La planchuela de compuesto de carbono tiene una secuencia de apilamiento de  $[45/0/-45/90]_{2s}$  resultando un total de 16 láminas. Las propiedades elásticas y de rotura del material compuesto de carbono se listan en la Tabla 1. La velocidad de aplicación del ensayo es 1 mm/min.

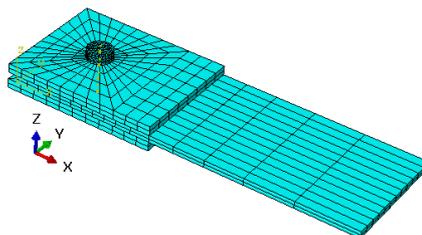


Figura 3: Modelo 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas del carbono.

Propiedad mecánica	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
$E_x$ (MPa)	152400	145000	140000
$E_y$ (MPa)	8060	10300	10000
$G_{xy}$ (MPa)	4690	5300	5200
$G_{xz}$ (MPa)	4600	5270	5200
$G_{yz}$ (MPa)	4000	3950	3900
$\nu_{xy}$	0.34	0.3	0.3
$\sigma_{1t}$	2293	2250	2200
$\sigma_{1c}$	948.2	1600	1600
$\sigma_{2t}$	66.2	64	60
$\sigma_{2c}$	210	290 </td <td>290</td>	290
$\sigma_{12}$	155.3	120	120

## 4.2 Modelo 2

El segundo modelo (ver Figura 4) reproduce el ensayo de A. Riccio (2004) [14] y es una unión de tipo single-lap, de un solo bulón de 4.8 mm de diámetro, con una precarga de 10.4 kN. Una planchuela es de compuesto de carbono cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1. La geometría consiste en 150 mm de largo, 28.8 mm de ancho y 4.16 mm de espesor. Posee un total de 32 láminas como resultado de una secuencia de apilamiento de  $[0/45/-45/90]_{4s}$ . La distancia “e” es 14.4 mm. La otra planchuela es de aluminio de 4 mm de espesor ( $E=69000$  MPa,  $\mu=0.28$ ). La velocidad del ensayo es de 1 mm/min.

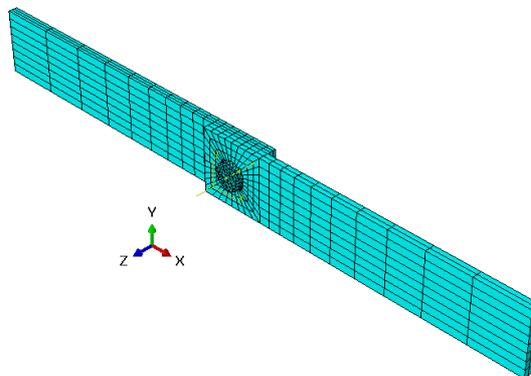


Figura 4: Modelo 2.

## 4.3 Modelo 3

El tercer modelo (ver Figura 5) reproduce el ensayo de Calin-Dumitru (2018) [15], y es una unión de tipo single-lap, de un solo bulón de 8 mm, con una precarga de 0.3 kN que se corresponde con un pequeño ajuste manual. La pieza tiene un ancho  $W=48$  mm, un largo de 155 mm y un espesor de 5.2 mm resultante de una secuencia de apilamiento  $[45/0/-45/90]_{5s}$  y cuenta con 40 láminas. La separación “e” es 24 mm.

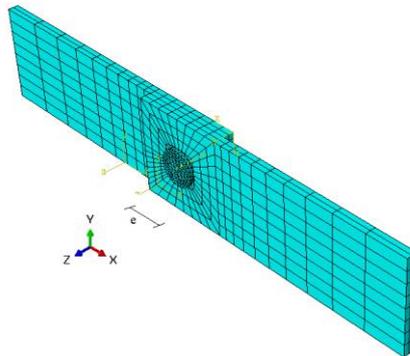


Figura 5: Modelo 3.

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los datos experimentales de las referencias consultadas y los resultados numéricos obtenidos en el presente trabajo se muestran en la Figura 6. Los resultados numéricos de cargas que producen la falla para el Modelo 1 son 7.2 kN y 11.6 kN, según los criterios de FPF y ASTM respectivamente. Análogamente, para el Modelo 2 las cargas que producen la falla son 11.4 kN y 3.3 kN, según los criterios de FPF y ASTM respectivamente. Para el Modelo 3, las cargas que producen la falla son 10.05 kN y 2.7 kN, según los criterios de FPF y ASTM respectivamente.

Las cargas de rotura que se obtienen utilizando el criterio FPF de las simulaciones numéricas indican que para el Modelo 1 la falla se debe a la compresión de la fibra en la segunda lámina del laminado de compuesto, mientras que para el Modelo 2 la falla se debe a la compresión de la matriz en la segunda lámina del compuesto y por último, en el Modelo 3, la falla ocurre por tracción de la matriz en la primera lámina del compuesto.

En la Figura 6 se indican los valores de carga de falla de cada criterio como valores de frontera. Por debajo de estos valores no se produce la falla.

Las tensiones de aplastamiento, tracción y corte se determinan con las ecuaciones 5, 6 y 7 y se emplean los criterios de falla de las ecuaciones 1 a 4 para cada modelo numérico y para cada resultado experimental de la literatura de referencia. Estos resultados de tensiones se muestran en la Figura 7. A partir de ello, se pueden establecer los siguientes análisis:

- Para los Modelos 2 y 3 de tipo single-lap, el criterio de rigidez de la norma ASTM es más restrictivo, dado que la carga de falla predicha por esta norma es menor que la carga predicha por el criterio de resistencia FPF.
- Para el Modelo 1 de tipo double-lap es más restrictivo el criterio de resistencia FPF, dado que la carga de falla predicha por este criterio es menor que la predicha por el criterio de rigidez de la norma ASTM.
- Para los Modelos 2 y 3 de tipo single-lap, los resultados de cargas de falla predichos numéricamente con el criterio de resistencia FPF se acercan a los obtenidos experimentalmente, difiriendo entre 20 y 30 %.
- Para el Modelo 1 de tipo double-lap, los resultados de cargas de falla predichos numéricamente con el criterio de rigidez de la norma ASTM se acercan a los obtenidos experimentalmente, difiriendo en un 20%.
- En todos los casos, la resolución numérica es conservadora, dado que los valores de falla predichos son menores que los obtenidos experimentalmente.

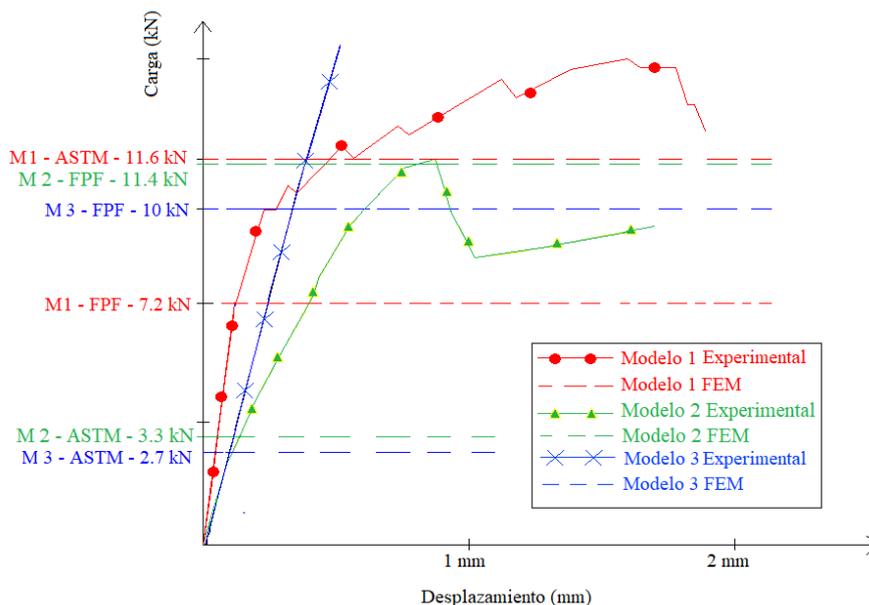


Figura 6: Curva carga-desplazamiento de los ensayos experimentales y fronteras de valores obtenidos numéricamente.

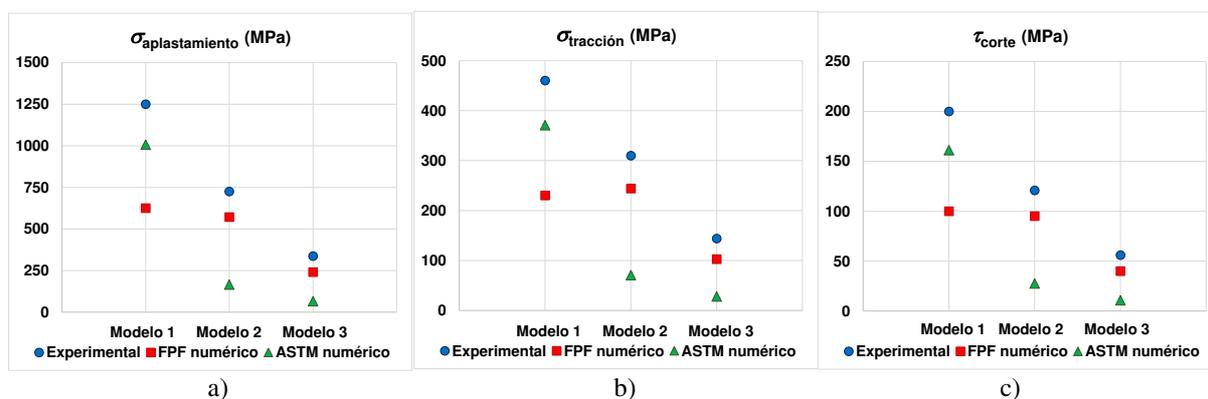


Figura 7: Roturas: a) Aplastamiento; b) Tracción; c) Corte.

La rotura para todos los modelos analizados se alcanza en la cercanía del agujero. Esto se debe al aplastamiento que ejerce el vástago del bulón sobre el espesor de la planchuela. Esto se puede observar mediante los resultados de FPF mostrados en la Figura 8, donde el valor +1.00 indica falla y valores menores que +1.00 indican condición de no falla. Adicionalmente, a modo de ejemplo, la distribución de tensiones longitudinales para el Modelo 1 se muestra en la Figura 9, donde se observa que la máxima tensión de tracción de 234 MPa se corresponde con el valor de tensión 230.09 MPa obtenido con la carga de falla de 7.2 kN actuando sobre un área neta de 79.92 mm<sup>2</sup> y con un factor de concentración de tensiones  $K_t=2.55$ .

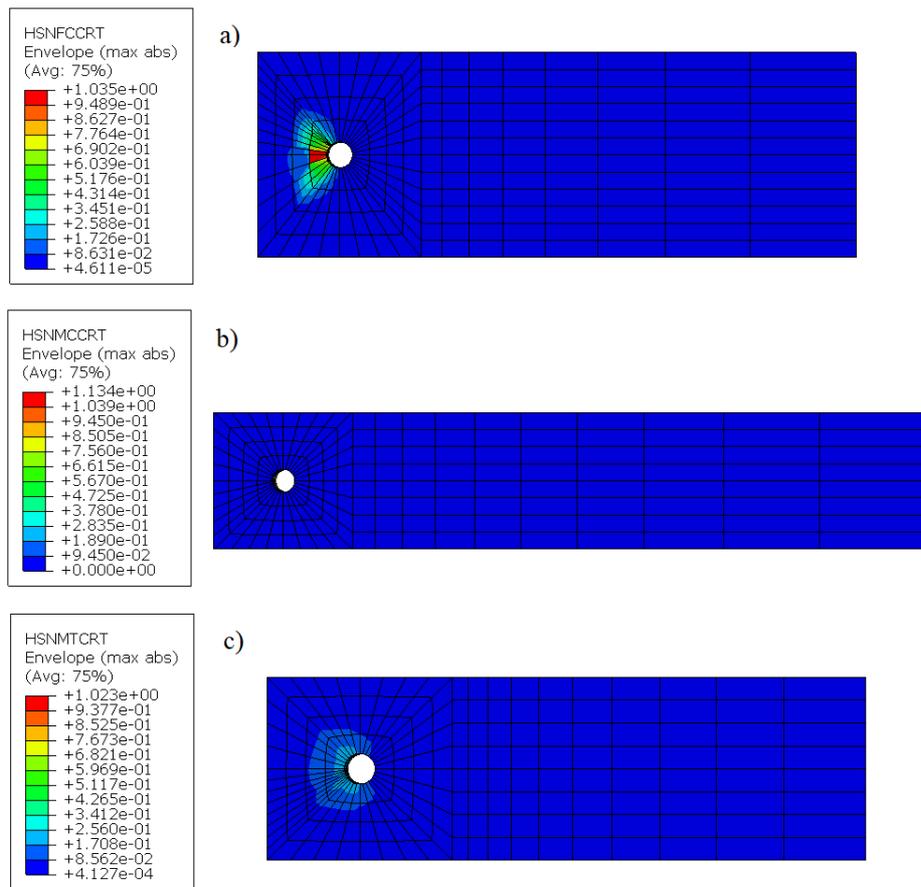


Figura 8: Roturas FPF: a) Modelo 1; b) Modelo 2; c) Modelo 3.

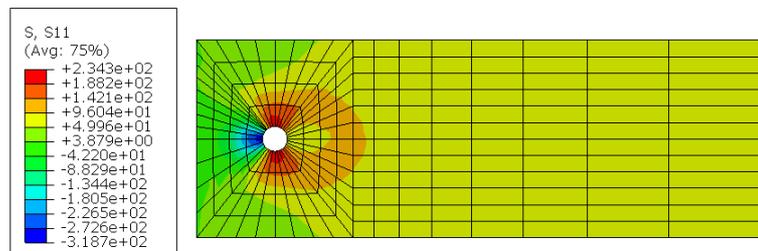


Figura 9: Distribución de tensiones longitudinales para Modelo 1.

## 6 CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de comparación de criterios de rotura para una unión de tipo abulonada. Los criterios que son comparados con resultados experimentales obtenidos de la literatura son el criterio de FPF y ASTM 5961. Las uniones son de tipo single y double-lap.

Del análisis de resultados del presente trabajo se puede concluir que para los modelos de tipo single-lap, el criterio de rigidez de la norma ASTM 5961 es más restrictivo que su aplicación para los modelos double-lap. Para los modelos de tipo double-lap, es más restrictivo el criterio de resistencia FPF. Para modelos de tipo single-lap, la resolución numérica considerando FPF se acerca más a los resultados experimentales. Para modelos de tipo double-lap, la resolución numérica, considerando el criterio de norma ASTM, se acerca más a los resultados experimentales.

En todos los casos, los resultados obtenidos numéricamente son conservadores, porque predicen valores de cargas de falla menores que los obtenidos experimentalmente.

## REFERENCIAS

- [1]Valvona, M., Development of connections for fiber reinforced bridge elements and an analysis of sustainability. *Tesis de Doctorado, Chalmers University of Technology, 2015. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/222054/222054.pdf>*
- [2]Collings, T., The strength of bolted joints in multi-directional CFRP laminates. *Composites, 8(1), 1977.*
- [3]Meon M. S., Rao M. N., Schroder K-U., Numerical Prediction of Bearing Strength on composite Bolted Joint Using Three dimensional Puck Failure Criteria - *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:10, No:10, 2016*
- [4]Jae-II C., Seyyed Mohammad H., Heoung-Jae C., Jong-Chan P., Hong Suk C., Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force. *Composite Structures Vol:189 pag 247–255, 2018.*
- [5]Jianxia W., Tianliang Q., Narasimha R. M., Yujun L., Heidari-Rarani M., Kai-Uwe S., Three-dimensional progressive damage and failure analysis of double-lap composite bolted joints under quasi-static tensile loading. *Composite Structures 285, 2022.*
- [6]Xiaona, P., Xiang, L., Guochun L., Jian, Z., Prediction of net-tension failure of multi-bolt composite joints: A fast approach for laminates with arbitrary layup. *European Journal of Mechanics - A/Solids, 87. ,2021.*
- [7]ASTM D5961. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates. *ASTM Internacional, 2017.*
- [8]Mirza W.A., A Continuum Based Solid Shell Element Based on EAS and AN. *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Sweden, pag.9, 2015.*
- [9]Choudhury A., Mondal S.C. y Sarkar S., Failure analysis of laminated composite plate under hygro- thermo mechanical load and optimization. *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, vol.24, No.3, pp.509-526, 2019.*
- [10]Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics;47:329–34, 1980.*
- [11] Schranzinger A., Modeling of Long-Fiber-Reinforced Composites in ABAQUS. *Master thesis. Graz University of Technology, 2014.*
- [12] Mosallam A.S., Design guide for FRP composite connections. ASCE Manuals and Reports on Engineering practice No.102,Cap.3, 2011.
- [13]Yi Xiao, Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints. *Composites Science and Technology, Volume 65, Issues 7–8, Pages 1022-1031, 2005.*
- [14]Riccio A., Effects of Geometrical and Material Features on Damage Onset and Propagation in Single-lap Bolted Composite Joints under Tensile Load. *SAGE Journal, Vol 39, Issue 23, 2005.*
- [15]Calin-Dumitru C., Numerical analysis for the influence of the geometrical and mechanical parameters on the stiffness and strength of the composite bolted joints. *INCAS BULLETIN 10 (4):21-33, 2018.*