



DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA Y LA RESISTENCIA RESIDUAL EN MATERIALES COMPUESTOS FIBRA-METAL

Maximiliano Paiva¹, Juan Ríos¹, Eduardo Asta¹, Juan Balderrama¹ y Adrián Cambiasso¹

¹ GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional.
Calle Paris.N°580, Haedo, Argentina

correo-e: paiva.maximiliano@gmail.com; jcrios@frh.utn.edu.ar; asta.eduardo@gmail.com;
balderra@cnea.gov.ar; ingcamb@yahoo.com.ar.

RESUMEN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de aluminio en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxi. En este trabajo se utiliza un modelo elástico no lineal de cálculo por elementos finitos (FEM) que desarrolla una predicción del comportamiento de tenacidad a la fractura. Para la simulación de la propagación de la fisura en la probeta de FML se aplicó un modelo 2D con elementos cohesivos. Se utilizaron dos tipos diferentes de formulación de elementos cohesivos, para simular el mecanismo de falla que presentan los materiales compuestos híbridos, en presencia de la propagación de la fisura.

Los resultados obtenidos con los modelos FEM que predicen el avance de la fisura, en términos del gráfico carga-desplazamiento, han sido comparados con los resultados de ensayos de mecánica de la fractura elasto-plástica, aplicando el criterio de la integral J de acuerdo con la norma ASTM E-1820. En los ensayos como en el modelo FEM se utilizaron probetas C(T) de material compuesto CARALL, fabricadas a partir de aluminio 1050 y fibras de carbono NCT-301 unidireccionales impregnadas en resina epoxi. Se utiliza un arreglo 4/3 (Al-0-Al- 90-Al-0-Al), siendo 0 y 90 la orientación de la fibra de carbono respecto a la dirección de laminación de la aleación de aluminio. Por su parte, a partir de los resultados de J, en términos del parámetro de tenacidad a la inestabilidad (J_c), tanto del modelo predictivo de simulación FEM como del ensayo J, se calcula la resistencia residual en placa plana con geometría de fisura superficial y totalmente pasante.

Palabras Claves: *Materiales, Ensayos, Tratamiento de datos, Fractura, Tracción*

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de aluminio colaminadas en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxi. En caso de utilizar fibra de carbono, el compuesto se denomina CARALL (CARbon Reinforced ALuminum Laminates). Los materiales compuestos FML se utilizan en la industria aeronáutica [1], naval y en otros vehículos de transporte por ser materiales livianos, con elevada resistencia a la propagación de fisuras, resistencia al daño acumulado y baja absorción de humedad.

Por otra parte, los constructores de aviones evalúan que la sustitución del aluminio tradicional por FML podría ser ventajoso por sus excelentes propiedades mecánicas y que permiten además un 20 % de ahorro en peso comparado con aluminio tradicional utilizada en el campo aeroespacial. Hoy en día, los FML se utilizan en varias aplicaciones, tales como: estructuras de alas, fuselaje y protección balística [2].

Estos materiales compuestos tienen como característica que en ellos la propagación de fisuras tiene lugar mediante el mecanismo de puenteo de fibra (Fiber-Bridging) [3] como se indica en la Figura 1.

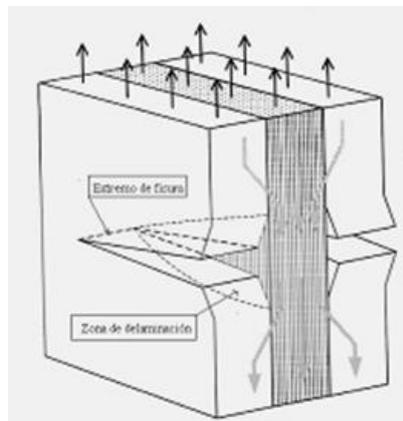


Figura 1: Probeta C(T) [4] (Fiber Bridging) [3]

En el mecanismo de propagación llamado puente de fibra se diferencian dos zonas que son las siguientes:

- ZONA COHESIVA: zona de proceso por delante de la fisura
- ZONA FIBER-BRIDGING [3]: zona de puente de fibras detrás de la fisura. Ver Figura 3 (ambos proporcionan incremento de la tenacidad a la propagación de una fisura. Figura 2

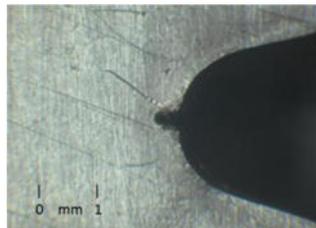


Figura 2: Boca de fisura

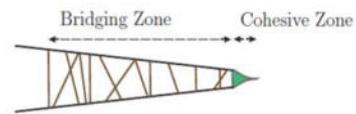


Figura 3: Boca de fisura y Bridging zone

2. MATERIAL Y METODO

2.1 Material

La probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) [4] ensayada corresponde a un laminado para uso experimental el cual se elaboró en placas cuadradas de 120 mm de lado según las secuencias de apilamiento o arreglo representada por medio de la indicación m/n ($m = n + 1$), siendo m la cantidad de capas de aluminio y n la cantidad de capas de fibras impregnadas en resina. En este trabajo se utiliza un arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al), siendo 0 y 90 la orientación de la fibra de carbono respecto a la dirección de laminación de la aleación de aluminio.

Se ha utilizado un compuesto FML fabricado con láminas metálicas de aluminio 1050 con fibra de carbono NCT-301 unidireccional, impregnada en resina epoxi. Se utilizó la resina presente en la fibra de carbono en la colaminación entre las capas de fibra unidireccional y aleación de aluminio para fabricar el material compuesto.

En el laboratorio se determinó además la curva tensión- deformación obtenida del ensayo de tracción de probetas correspondientes a un laminado con idénticas características al que se utilizó en la fabricación de la probeta de mecánica de la fractura como la indicada en la Figura 4. En el gráfico de la Figura 5 se observa la curva constitutiva tensión-deformación del laminado 4/3.



Figura 4: Probetas de Tracción

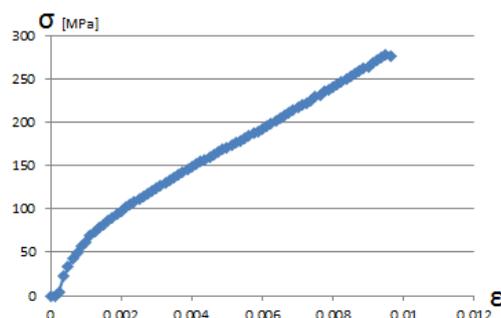


Figura 5: Curva constitutiva tensión deformación



2.2 Código Numérico

Para el trabajo se utilizó la versión de distribución académica del código ANSYS, denominada ANSYS-Academic. ANSYS aplica el método de los elementos finitos para resolver problemas en diversas áreas de la ingeniería, entre ellos el área estructural. El programa permite resolver el sistema de ecuaciones que surgen de aplicar el método de los elementos finitos al problema que se está analizando. El programa cuenta con herramientas que permiten la creación de una geometría y su posterior mallado, en este caso se representa la geometría de una probeta de mecánica de la fractura C(T) [4] indicada como CTS “Compact Test Specimen”. El detalle de la malla y la conectividad, así como la forma de los elementos, se puede observar en la Figura 6.

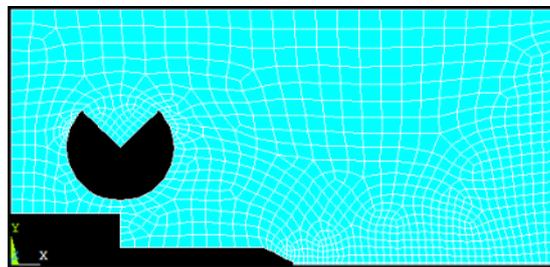


Figura 6: Discretización de la geometría de la probeta C(T)

3. MODELO NUMERICO

3.1 Probeta CTS “Compact Test Specimen”

Para estimar el valor de carga vs desplazamiento, se realizó un análisis no lineal en un modelo numérico 2D de una probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) [4] simulando un estado plano de tensión compatible con el espesor de la probeta ensayada. En la Figura 7 se detalla las dimensiones de la probeta C(T) [4] modelada, cuyas características geométricas coinciden con las de las probetas ensayadas.

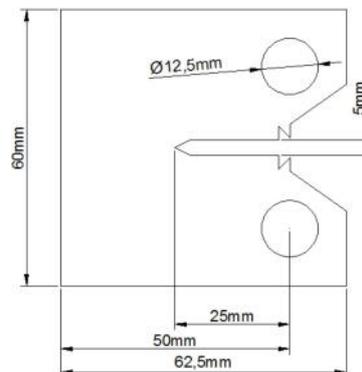


Figura 7: Probeta C(T)

La geometría se diseñó por simetría, desarrollando solo una mitad de la probeta. Dentro de la geometría se utilizaron dos tipos de elementos PLANE 182 e INTER 202 [5].

PLANE 182 es utilizado para el modelado de estructuras sólidas en 2D, este se puede utilizar como elemento plano para: estado plano de tensión, estado plano de deformación o estado plano de deformación generalizado. Este es definido por 3 o 4 nodos, teniendo 2 grados de libertad en cada nodo (traslación en X y traslación en Y).

INTER 202 es un elemento cohesivo que simula la superficie de interfaz y el proceso de delaminación posterior, donde la separación se representa por un desplazamiento creciente entre nodos. Se utiliza como elemento plano para: estado plano de tensión o estado plano de deformación. Este es definido por 4 nodos, teniendo 2 grados de libertad en cada nodo (traslación en X y traslación en Y).

3.2 Formulación de elementos Cohesivos

Para simular el grado de deformación y el daño acumulado en el extremo de la fisura se utilizó en el modelo numérico una zona de elementos cohesivos próximos a la zona donde se produciría el avance de la fisura. El modelo constitutivo de los elementos cohesivos tiene dos parámetros que caracterizan el proceso de descohesión, tal como se muestra en la Figura 8:

- La tensión máxima (tensión de superficie del elemento continuo), σ_{max} , también denotada como fuerza cohesiva.
- La separación donde el elemento cohesivo falla, δ_0

Cuando la componente normal δ_0^N alcanza su valor crítico, los elementos continuos inicialmente conectados por los elementos cohesivos, se desconectan lo que significa que el material en este punto ha fallado.

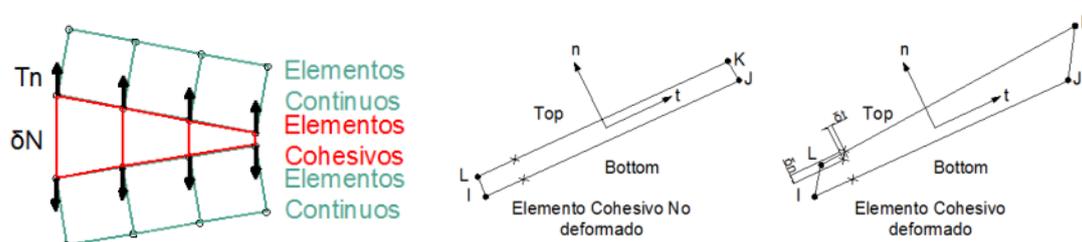


Figura 8: Representación de elementos cohesivos sometidos a esfuerzo normal

Se utiliza una ecuación constitutiva para relacionar, la tensión T con el desplazamiento relativo (δ) en la interfaz.



La forma de la ley cohesiva está dada por la función $T(\delta)$. La tensión máxima establece la resistencia local del material y desempeña un papel crítico en el desarrollo de la deformación plástica del material que se encuentra en el entorno del vértice de la fisura.

El área bajo la curva ($T(\delta)$), representa la energía absorbida por el elemento cohesivo, G_o , y se define como la energía cohesiva.

El parámetro G_o (Energía total disipada por la fractura), se representa a través de la integral definida en la ecuación (1)

$$G_o = \int_0^{\delta_0} T(\delta) d(\delta) \quad (1)$$

Si se conoce o presume la forma de la curva ($T(\delta)$), dos parámetros son suficientes para caracterizar la ecuación y permitir el ajuste con valores experimentales.

La energía de fractura G_c Cuando el material tiene una respuesta lineal elástica se iguala con el trabajo local de separación (el cual queda determinado por la rigidez del material). El valor de G_o puede obtenerse de ensayo, ya que coincide bien con la *integral J* en el inicio de la fisura, J_i .

Cuando el material deforma plásticamente, G_c se eleva por sobre G_o , pero sigue siendo energía cohesiva G_o , se corresponde aproximadamente a la *integral J* en el inicio de la fisura, y puede ser la primera estimación para G_o . El parámetro cohesivo puede ser diferente en la dirección normal y la tangencial, pero se define que la energía de separación es igual en ambos modos de falla, $G_o^N = G_o^T$ [6].

La necesidad de una ecuación constitutiva apropiada en la formulación del elemento cohesivo es fundamental para una simulación precisa del proceso de fractura. El modelo que representa el comportamiento cohesivo del material y sus parámetros de entrada a menudo se eligen de la forma más simple posible por razones numéricas, en lugar de tener significado físico.

Básicamente, se asume que ($T(\delta)$) es una curva de tensión-desplazamiento con una forma bilineal. Más recientemente se han propuesto diferentes formas del modelo cohesivo, a saber, la forma trapezoidal y las formas exponenciales. Las ecuaciones (2) y (3) describen el comportamiento exponencial del elemento cohesivo, que se observa en la Figura 9

$$T_n = \sigma_n \cdot \left(\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right) \cdot e^{(1-\Delta_n/\delta_n)} \quad (2)$$

$$G_c = e \cdot \sigma_{max} \cdot \delta_n \quad (3)$$

La curva Tensión desplazamiento de la Figura 9 representa la respuesta de un elemento cohesivo que sigue la ecuación constitutiva de forma exponencial.

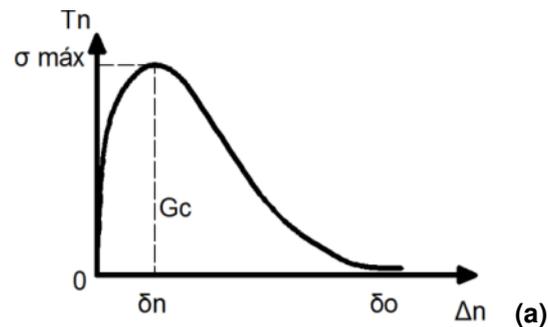


Figura 9: Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Exponencial

Las ecuaciones (4) y (5) describen el comportamiento bilineal del elemento cohesivo, que se observa en la Figura 10.

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_n} \cdot \Delta_n & \Delta_n \leq \delta_n \\ \frac{\sigma_{max}}{\delta_n - \delta_o} \cdot (\Delta_n - \delta_o) & \Delta_n \geq \delta_n \end{cases} \quad (4)$$

$$G_c = e \cdot \sigma_{max} \cdot \frac{\delta_o}{2} \quad (5)$$

La curva tensión desplazamiento de la Figura 10 representa la respuesta la ecuación constitutiva de forma bilineal propia del elemento cohesivo que responde a las ecuaciones (4) y (5).

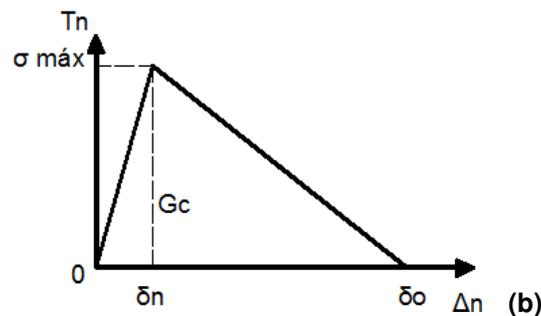


Figura 10: Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Bilineal

3.3 Condiciones de Borde

Para simular la simetría de la probeta se aplicaron restricciones de desplazamiento $U_Y=0$, para los nodos inferiores de los elementos cohesivos. Por otro lado, se simuló en el punto de aplicación de la carga un camino incremental de desplazamientos equivalente al impuesto por el cabezal móvil del dispositivo de ensayo, para ello se le dio un valor de desplazamiento al Nodo 94. A partir de dicha condición de contorno, se estimó mediante el modelo numérico el valor del esfuerzo equivalente que produce cada incremento de desplazamiento en el punto de aplicación

carga. Para cada punto de paso incremental del análisis no lineal se determinó el valor del desplazamiento en el nodo que simula el punto donde se monta el elemento de medición de la apertura de la boca de la fisura (COD) por medio de un extensómetro del tipo “clip gauge”, ver Figura 11.

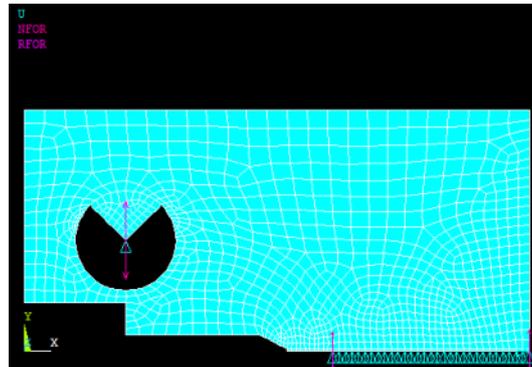


Figura 11: Elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Gráficos P vs. Desplazamiento V_{II}

En el siguiente gráfico se representan los valores de Carga vs desplazamiento del modelo exponencial que fue el que mejor se ajustó a los resultados experimentales.

4.1.1. Gráfico con Modelo Exponencial

En el gráfico de la Figura 12 se observan las curvas de carga vs. Desplazamiento para elementos cohesivos con una formulación exponencial.

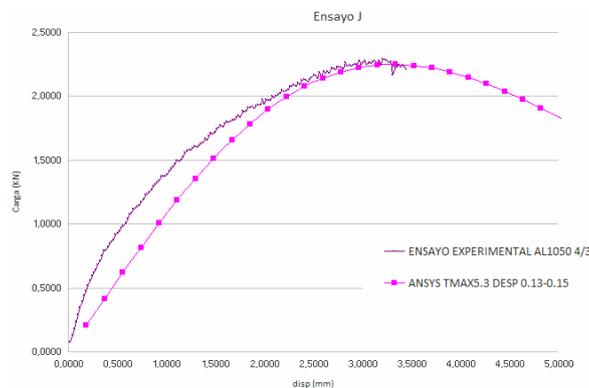


Figura 12: Resultado de modelo exponencial con mayor aproximación al ensayo experimental



En la Figura 12 se observa el comportamiento del elemento cohesivo exponencial en la proximidad del borde de la fisura, caracterizada por un primer tramo con incremento de carga hasta alcanzar $\sigma_{m\acute{a}x}$, para luego mantener el campo de tensión con valores próximos a la tensión máxima. Se eligieron los valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $G_{m\acute{a}x}$ que permitieron ajustar el resultado del modelo numérico con los valores experimentales.

4.2 Resultados

4.2.1 Resultados de J_c según Norma ASTM E1820

Utilizando las expresiones de la norma ASTM E-1820, para la probeta compacta C(T) [4], junto con los valores numéricos obtenidos del modelo de elementos finitos desarrollado en ANSYS permitieron obtener la estimación del parámetro J . El valor de la integral J se calcula de acuerdo con ASTM E-1820 como la suma de las componentes elástica y plástica. Ecuación (6).

$$J_c = J_{el} + J_{pl} \quad (6)$$

Donde J_{el} y J_{pl} se obtienen según las ecuaciones (7) y (8) respectivamente:

$$J_{el} = \frac{K_I^2}{E} \quad (7)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{b_0 B} \quad (8)$$

Siendo: $b_0 = W - a_0$, $B =$ Espesor de probeta, $A_{pl} =$ Área Plástica, $\eta = 2 + 0,522 b_0/W$.

El criterio para determinar la integral J ha sido la utilización del valor de inestabilidad o crítico en términos de J_c . Ecuación (9) según la técnica de la norma ASTM E1820.

$$J_c = \frac{K_C^2}{E} \quad (9)$$

En la Tabla 1 se observan los valores obtenidos de J_c y su conversión a K_c .

Tabla 1. Parámetros Fractomecánicos

	K_c [MPa \sqrt{m}]	J_c [kJ/m ²]
Ensayo	85,9	114
Simulación	80,8	100,9
Error %	5,9	11,5

4.2.2 Determinación de tensión residual en panel con fisura central pasante

Se define la resistencia residual de un material laminado como la resistencia remanente frente a la presencia de daño acumulado en el material, por ejemplo, la presencia de una fisura. Este valor varía en función de la geometría, la tenacidad a la fractura y el tamaño de fisura. Para este análisis se mantiene constante el espesor del panel estructural y la propiedad fractomecánica. En la figura 13 se observa el panel de ensayo en un componente estructural similar al indicado en la norma ASTM E561 [7]. A partir de esta geometría se determina la resistencia residual (σ_{res}) variando el ancho de placa y el largo de fisura, manteniendo constante el espesor del panel el cual coincide con el espesor y secuencia del laminado correspondiente a la probeta C(T) [4]. El valor de la resistencia residual para la geometría bajo análisis se expresa utilizando la ecuación (10). [8 y 9]

$$\sigma_{res} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi \cdot a_{eff} \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot a_{eff}}{W}\right)}} \quad (10)$$

Siendo: σ_{res} : Resistencia residual, K_c : Tenacidad a la fractura, a_{eff} : Ancho efectivo, W : Ancho de la Placa.

El valor de K_c (ver Tabla 1) utilizado en la ecuación anterior es el que se determina por ensayo de J_c con probeta compacta C(T) [4], tanto de manera experimental como a través de la simulación del ensayo por elementos finitos. (Ver tabla 1)

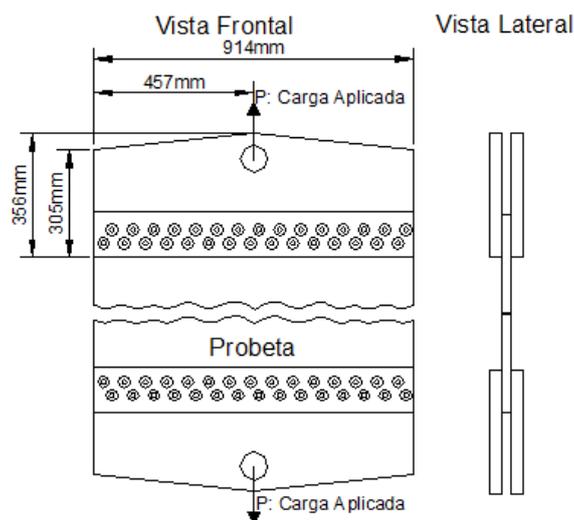


Figura 13: Fisura central pasante

En las Figuras 14 y 15 se representa la tensión residual σ_{res} a partir de la generación de una serie de curvas paramétricas en función del largo de fisura. En la Figura 14 los cálculos fueron

realizados con los valores de K_c obtenidos de ensayo experimentales en probetas C(T) [4], mientras que en la Figura 15 los cálculos fueron realizados con los valores obtenidos del modelo numérico.

De la comparación de los resultados obtenidos para el valor de la tensión residual con el valor de tensión admisible del laminado Figura 5. Se observa que el valor de σ_{adm} es mayor que el σ_{res} por lo que se concluye que el modo de falla del panel corresponde a un mecanismo de deformación plástica, antes de alcanzar el valor necesario para propagar una fisura por daño acumulado.

Valores de σ_{res} para arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al) Espesor: 2,6mm

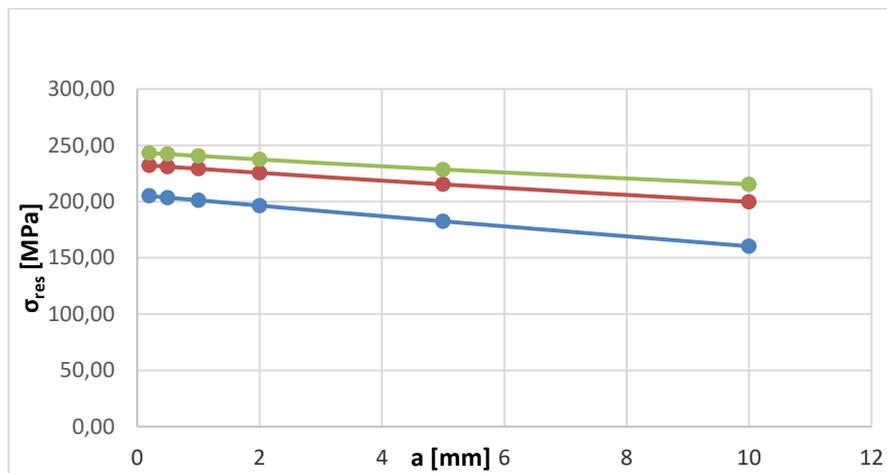


Figura 14: Gráfico obtenido con valores de Ensayo

Valores de σ_{res} para arreglo 4/3 (Al- 90-Al-90-Al-90-Al) Espesor: 2,6mm

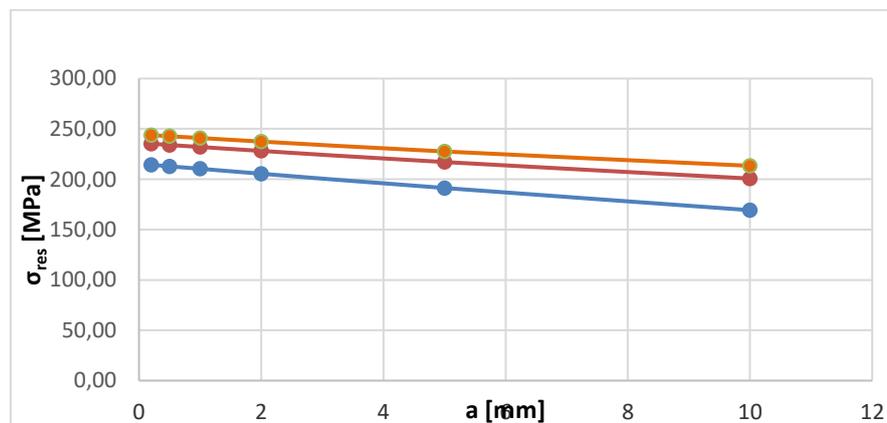


Figura 15: Gráfico obtenido con valores de Modelado.



5. CONCLUSIONES

En el ámbito del transporte, la construcción de paneles utilizando este tipo de material compuesto híbrido FML tipo CARALL permite obtener mejores propiedades mecánicas de los componentes y una reducción en peso para el mismo espesor, por tal motivo es preciso poder determinar la capacidad de estos materiales a resistir la propagación de fisuras, la tenacidad a la fractura, debido a los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos en servicio. En el presente trabajo se estimaron los valores de tensión residual σ_{res} en paneles con una fisura central, construidos a partir de laminados híbridos tipo CARALL (Laminas de fibra de carbono reforzadas con Aluminio) partiendo del parámetro fractomecánico del material compuesto, K_c , considerando diferentes anchos de placa W . Se realizó una comparativa de los valores de tensión residual con diferentes valores de K_c obtenidos de ensayo según norma ASTM E1820 y del predicho de la simulación numérica del ensayo utilizando el programa de elementos finitos Ansys Mechanical.

REFERENCIAS

- [1] L. B. Vogelesang. *Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structure*. Delft University of Technology, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 22, p. 492-496, 1983.
- [2] Riccardo Rodi. *The Residual Strength Failure Sequence in Fibre Metal Laminates*. Institutional Repository (doctoral thesis), ISBN 9789077172803, 2012.
- [3] ASTM E1820, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM, 2011.
- [4] C. T. Lin, P. W. Kao. *Effect of fiber bridging on the fatigue crack propagation in carbon fiber-reinforced aluminum laminates*. Materials Science & Engineering A, 190: p. 65-72, 1995.
- [5] F. Javidrad, M. Mashayekhy. *A Cohesive Zone Model for Crack Growth Simulation in AISI 304 Steel*. Journal of Solid Mechanics, 6 (4): p. 378-388, 2014.
- [6] Waqas Asghar, Muhammad Ali Nasir, Faisal Qayyum, Masood Shah. *Investigation of fatigue crack growth rate in CARALL, ARALL and GLARE*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 40(7), July 2017.
- [7] ASTM E561, Standard Practice for R-Curve Determination, ASTM, 1998.
- [8] Rodi R, Alderliesten, R.C., Lazzeri, L. *Analytical Modeling of Fiber Metal Laminate Stiffened by Bonded Straps: The effect of external stiffening elements on the fatigue crack growth in Fibre Metal Laminate*. VDM Verlag Dr. Müller, ISBN 978-3-639-21534-2, December 2009.
- [9] E.M. Castrodeza, F.L.Bastian, J.E.Perez Ipiña. *Critical fracture toughness, J_C and $\delta 5C$, of unidirectional fibre-metal laminates*. Thin-Walled Structures Volume 41, Issue 12, Pages 1089-1101, December 2003.