

Determinación de la Resistencia Residual para Placas Fisuradas de Materiales Compuestos Fibra-Metal

Residual Strength Determination on Cracked Plates of Fiber-Metal Composites

Presentación: 06/09/2023

Maximiliano Paiva

GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
paiva.maximiliano@gmail.com

Juan C. Ríos

GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
jcrios@frh.utn.edu.ar

Eduardo Asta

GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
asta.eduardo@gmail.com

Juan J. Balderrama

GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
juanjosebalderrama22@gmail.com

Francisco Cambiasso

GIMF UTN Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
fcambiasso@frh.utn.edu.ar

Resumen

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de metal en forma alternada con capas de material compuesto. En este trabajo se determina la resistencia residual de material FML para dos geometrías de placa con fisura a partir de valores de tenacidad a la fractura J , tanto obtenidos por ensayo como por simulación aplicando 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 FML 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 clave: Materiales compuestos, Ensayos mecánicos, Tratamiento de datos, Fractura, Tracción.

Abstract

The hybrid composite materials, fiber-metal laminates, FML (Fiber Metal Laminates), consist of thin sheets of metal alternately with composite material. In this work the residual strength of FML material on two geometries of plate with crack is determined from fracture toughness J , such obtained by testing as simulation using a linear elastic finite element calculation (FEM) model to develop a prediction of the behavior of fracture toughness. For the simulation of the crack propagation in the FML specimen, a 2D model with cohesive elements was applied. Two different types of formulation of cohesive elements were used to simulate the failure mechanism presented by hybrid composite materials, in the presence of crack propagation.

The results obtained with the FEM models that predict the progression of the crack, in terms of the load-displacement graph, have been compared with the results of elasto-plastic fracture mechanics tests, applying the J integral criterion according to the ASTM E-1820 standard. In the tests as in the FEM model, CARALL composite C(T) specimens were used, made from 1050 aluminum and NCT-301 unidirectional carbon fibers impregnated with epoxy resin. A 4/3 arrangement is used (Al-0-Al-90-Al-0-Al), with 0 and 90 being the orientation of the carbon fiber with respect to the lamination direction of the aluminum alloy. On the other hand, based on the results of J , in terms of the instability toughness parameter (J_c), both from the FEM simulation predictive model and from the J test, the residual strength is calculated in a flat plate with surface crack geometry.

Keywords: Composite materials, Mechanical tests, Data processing, Fracture, Tensile.

Introducción

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates) del tipo CARALL (Carbon Reinforced ALuminum Laminates) (Vogelesang, 1983), consisten en láminas delgadas de aluminio colaminadas en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxi.

Los materiales FML se utilizan en la industria aeronáutica, 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. Estos materiales compuestos tienen como característica que en ellos la propagación de fisuras tiene lugar mediante el mecanismo de puenteo de fibra (fiber-bridging) (Gunnink, 2001), tal como se muestra en la figura 1.

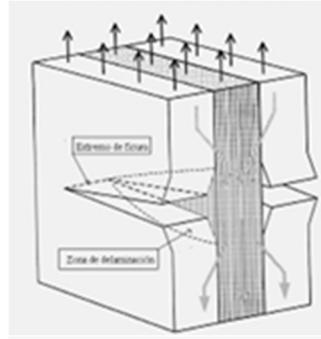


Figura 1: esquema ilustrativo del puenteo de fibra(fiber-bridging)

En el mecanismo de propagación (Palkowski y Lange, 2007) que sucede en la boca de fisura, figura 2, se diferencian dos zonas, tal como muestra la figura 3, que son las siguientes: zona cohesiva de proceso por delante de la fisura y zona de puenteo de fibras detrás de la fisura, ambas zonas proporcionan incremento de la tenacidad a la propagación de una fisura.

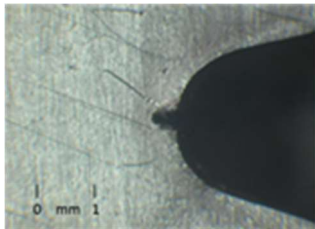


Figura 2: boca de fisura

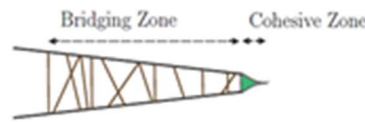


Figura 3: mecanismo de propagación de la fisura

Desarrollo

Material

La probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) 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-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 (Asta et al, 2020).

Se ha utilizado un compuesto FML de 2,62 mm de espesor fabricado con láminas metálicas de aluminio 1050 con fibra de carbono NCT-301 unidireccional, impregnada en resina epoxi, con una densidad de fibra del 40 %. 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. El conformado del compuesto se realizó con saco de vacío y el curado en autoclave a una presión de 6 bar y a una temperatura de 136 °C (Asta et al, 2020).

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, 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

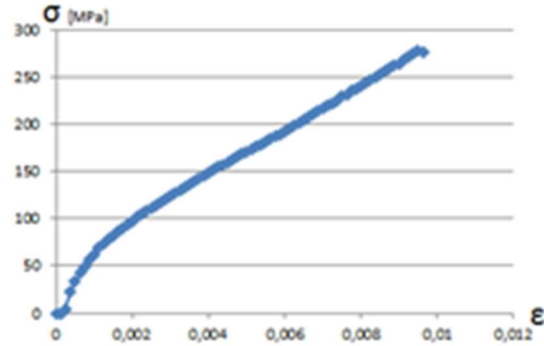


Figura 5: Curva constitutiva tensión deformación CARALL 4/3 Al 1050

Código de cálculo

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) figura 6, el detalle de la malla y la conectividad, así como la forma de los elementos, se puede observar en la figura 7.

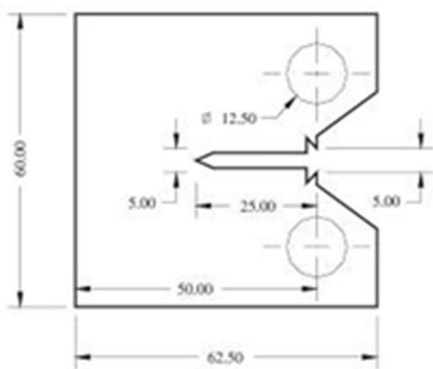


Figura 6- Probeta C(T), $W=50$ mm, $a_0 = 25$ mm

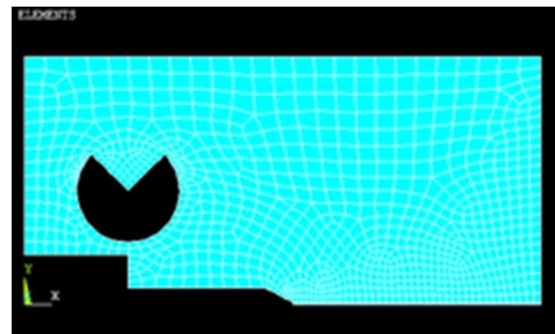


Figura 7-Discretización de la geometría de la probeta C(T)

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 (Lin y Cao, 1995) (Javidrad y Mashayekhy, 2014).

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).

Para simular la simetría de la probeta se aplicaron restricciones de desplazamiento $UY=0$, 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 (CMOD) por medio de un extensómetro del tipo “clip gauge”, figura 8.

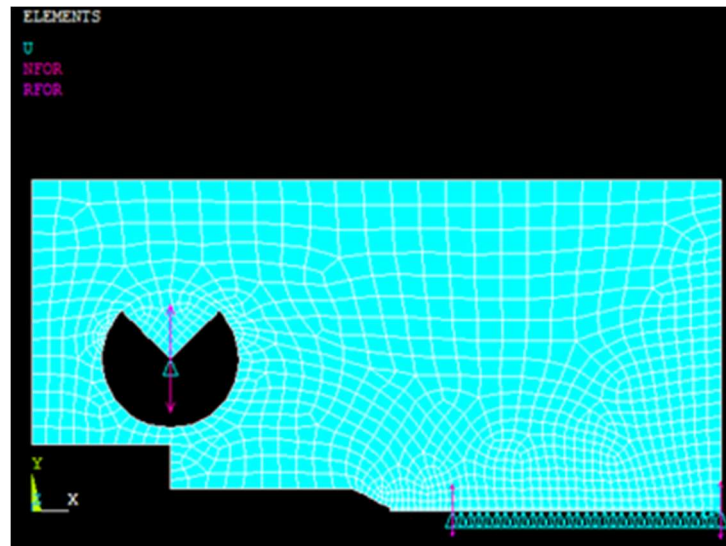


Figura 8: elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS.

Determinación de la tenacidad a la fractura

Se ha aplicado la metodología de ensayo elasto-plástico para la determinación de la tenacidad a la fractura en términos de la integral J , de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM 1820 siguiendo la línea de trabajos anteriores (Asta et al, 2020)

Las probetas compactas C(T), utilizadas para el ensayo de J , han sido fabricadas mediante mecanizado por control numérico y de acuerdo con lo especificado por la norma ASTM, tal como es indicado en la figura 6.

A efectos de lograr una concentración de tensiones similar a la correspondiente a una prefisura por fatiga, tal como es requerido por la norma ASTM 1820 para la determinación de J en materiales metálicos, la entalla de la probeta ha sido terminada con un radio de 0,15 mm en su extremo utilizando un filo de corte. La ubicación del plano de la entalla de la probeta C(T) es normal a la orientación 90° de las fibras de carbono del material.

Para la realización de los ensayos de tenacidad a la fractura se ha utilizado una máquina de ensayos servo-hidráulica MTS 311 frame, Flex test 60. La integral J se ha calculado de acuerdo con ASTM 1820 como la suma de las componentes elástica y plástica de acuerdo con la ecuación (1):

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

La componente elástica, J_{el} , es calculada con la ecuación (2), considerando condiciones de tensión plana con $a = a_0$:

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

El valor de E en la ecuación (2) es el módulo elástico de un material ortótropo en la dirección de interés. En este caso, donde la entalla se encuentra ubicada sobre el plano principal, la solución se reduce a el caso isotrópico (Castrodezza et al,2002). En consecuencia, el valor de K ha sido calculado utilizando la resolución establecida en la norma ASTM 1820, así como la componente plástica de J (J_{pl}) ha sido calculada de acuerdo con dicha norma siguiendo la ecuación (3):

$$J_{pl} = \eta \frac{A_{pl}}{b_0 B}$$

$$\eta = 2 + (0,522 b_0 / W) \quad (3)$$

Siendo: $b_0 = W - a_0$ (figura 6), A_{pl} = área bajo la curva del registro carga (P)- desplazamiento de la línea de aplicación de la carga (δ), en el punto final de inestabilidad de la carga o al primer “pop- in”. El criterio para determinar la integral J ha sido la utilización del valor de inestabilidad o crítico (J_c), obtenido de acuerdo con la técnica de la norma ASTM E1820 y la ecuación (1). Los valores de J_c son convertidos en términos del parámetro K_c , normalmente utilizado para el cálculo de la resistencia residual en diferentes geometrías (Castrodezza et al,2004) (Asta et al, 2020). El cálculo de K_c se realiza a través de la ecuación (4):

$$J_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (4)$$

Determinación de la resistencia residual para aplicaciones en placas planas fisuradas

En el trabajo se efectúa una determinación de la resistencia residual, a partir de los resultados de tenacidad a la fractura obtenidos por simulación numérica con una probeta C(T) y comparados con los experimentales. Se han considerado dos modelos de placa con fisura representativas de paneles estructurales reales, aceptables para verificar diseño por daño tolerable con materiales FML (Castrodezza et al, 2004). Los paneles considerados son la probeta en placa de ancho finito con fisura central pasante, M(T) de la norma ASTM E 561 y una geometría de placa plana con fisura parcialmente pasante correspondiente a la norma BSI 7910. En la figura 9 se muestra un esquema de la probeta M(T)

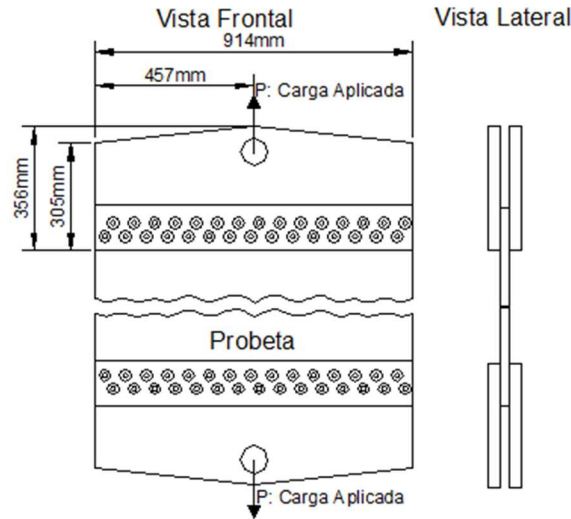


Figura 10: probeta M(T) con fisura central pasante

La resistencia residual en la probeta M(T) es calculada con la ecuación (5):

$$\sigma_{res} = Kc \sqrt{a_{eff}} \sec\left(\frac{\pi a_{eff}}{W}\right) \quad (5)$$

Siendo: Kc = tenacidad a la fractura; a_{eff} = largo efectivo de fisura; W = ancho de probeta. El largo efectivo, de acuerdo con ASTM 561, se calcula sumando al largo inicial medido (a_0) la corrección por radio plástico (r_y). En este trabajo a_{eff} corresponde a los valores postulados de a_0 para el cálculo de la resistencia residual.

Para el caso de fisura superficial o parcialmente pasante en placa plana, figura 11, se utilizó para el cálculo de la resistencia residual la guía de métodos para aceptabilidad de la norma BS 7910, considerando el mismo espesor de la probeta C(T) y adoptando un ancho de placa $W = 50$ mm. El cálculo de σ_{res} se efectúa con la ecuación (6):

$$Y\sigma = M f_w M_m \sigma_{max} \quad (6)$$

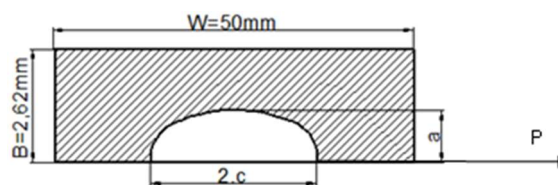


Figura 13: Esquema de placa con fisura parcialmente pasante

Resultados

En el gráfico de la figura 14 se observan las curvas de carga-desplazamiento para elementos cohesivos obtenida por simulación FEM utilizando el modelo exponencial y la curva obtenida experimentalmente.

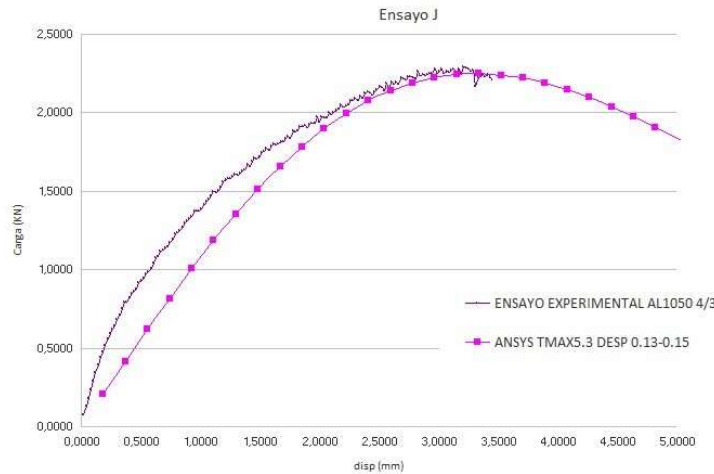


Figura 14: curvas carga-desplazamiento, simulación y experimental

El resultado de la simulación FEM de la figura 14 muestra 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, para luego mantener el campo de tensión con valores próximos a la tensión máxima.

En la tabla 1 se observan los valores de tenacidad a la fractura J_c y K_c obtenidos a partir de los resultados, tanto de simulación como experimental, aplicando la metodología de la norma ASTM E 1820 que establece las ecuaciones (1) a (3) para el cálculo de J_c y ecuación (4) para la obtención de K_c . La conversión de J_c a K_c es necesaria para poder aplicar los métodos de análisis de integridad estructural, que utilizan expresiones analíticas para calcular el factor de intensificación de tensiones aplicado (K_I) en diferentes geometrías con fisura, basadas en el análisis lineal-elástico, como en el caso de la norma BS7910. En consecuencia, la obtención tanto de un tamaño crítico admisible de fisura como de la resistencia residual requieren de la relacionar en un diagrama de análisis de falla (FAD) los valores de K_I y de la tenacidad a la fractura del material en términos de K_c o K_{Ic} .

Tenacidad a la fractura	J_c [KJ /m ²]	K_c [MPa /√m]
Experimental	114	85,9
Simulación	100,9	80,8
Error %	11,5	5,9

Tabla 1: resultados de tenacidad a la fractura

Las figuras 15 y 16, muestran los valores de resistencia residual calculados con la ecuación (5), correspondiente a la geometría de probeta M(T) de la norma ASTM 561 indicada en la figura 10, considerando el espesor de la probeta de ensayo de fractura C(T) de 2,62 mm, variando el ancho de placa y el largo de fisura.

La figura 17, muestra los valores de resistencia residual correspondientes a la geometría de placa plana con fisura parcialmente pasante de la figura 13 calculados con la metodología de la norma BS 7910. En este caso también el espesor considerado es el de la probeta de ensayo C(T), un ancho de placa fijo $W = 50\text{mm}$ y se tomó como variable el largo de fisura (a).

Para ambas geometrías se utilizaron los valores de tenacidad a la fractura J_C determinados con probeta C(T) y convertidos a K_{Ic} , tanto los obtenidos experimentalmente como por simulación FEM.

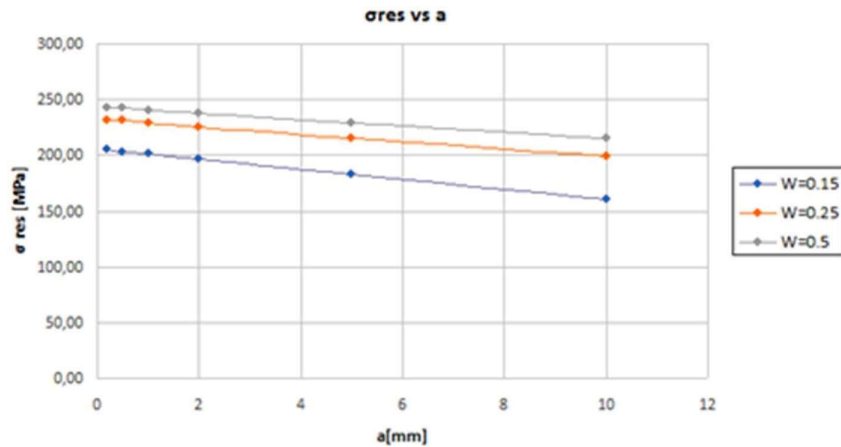


Figura 15: resistencia residual para la geometría M(T) con valores de tenacidad a la fractura experimentales

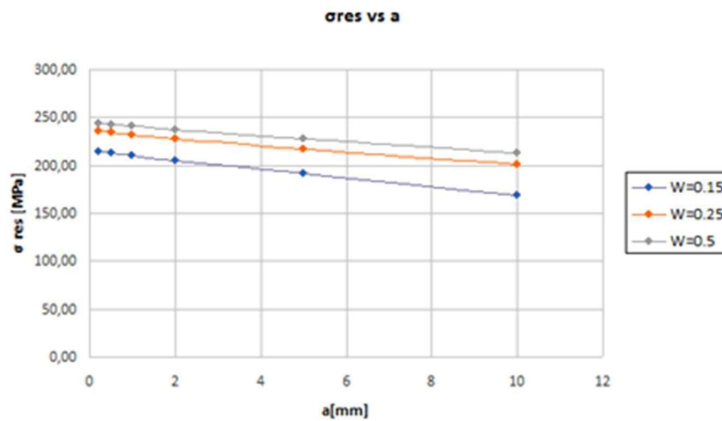


Figura 16: resistencia residual para la geometría M(T) con valores de tenacidad a la fractura por simulación

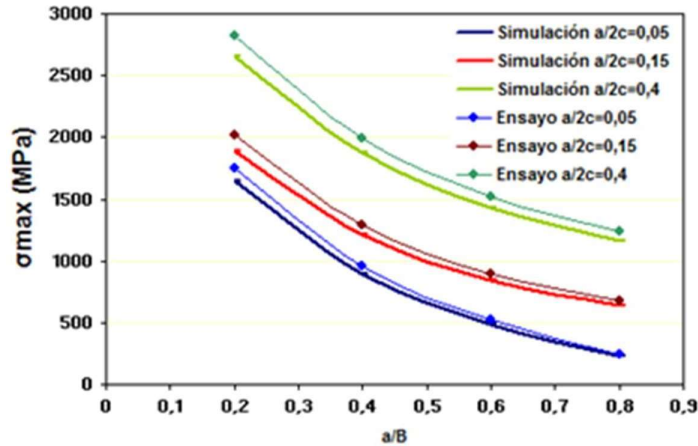


Figura 17: resistencia residual para la geometría de placa plana con fisura central parcialmente pasante

Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos en el trabajo permite verificar que los valores de tenacidad a la fractura

calculados a partir de los valores obtenidos con el modelo de simulación por elementos finitos presentan una aceptable aproximación con los determinados experimentalmente por medio del ensayo *J*. No obstante, se requiere un mayor trabajo de validación por medio de la evaluación de resultados experimentales de material FML, con diferentes geometrías, frente a los obtenidos con el modelo de simulación FEM.

La determinación de la tenacidad a la fractura, utilizando la norma ASTM 1820, se ha efectuado considerando una geometría de probeta C(T) cuyo espesor no cumple con el criterio de estado plano de deformación, debido al espesor del material compuesto FML. Consecuentemente, los resultados de J_c son representativos del comportamiento de tenacidad a la fractura en estado plano de tensión para el espesor y material FML CARALL considerado en este trabajo.

Para los resultados obtenidos, se puede observar, tanto para la geometría M(T) como para la placa plana con fisura parcialmente pasante, que los valores obtenidos de resistencia residual, σ_{res} , son elevados. Esto indica el un nivel de integridad estructural muy importante para el material FML y con un margen de reserva para un diseño por daño tolerable, desde el punto de vista ingenieril, aceptable. No obstante, el análisis comparativo entre la obtención de la tenacidad a la fractura en forma experimental y por simulación FEM, utiliza la metodología y las técnicas de aplicación corriente en materiales metálicos, por lo que se debe seguir evaluando este tipo de alternativa para la validación como metodología de integridad estructural en compuestos FML.

Referencias

Asta, E., Cambiasso, F., Balderrama, J., Ríos, J. (2020). Determinación y análisis de la tenacidad a la fractura en materiales compuestos laminados fibra-metal. Determination and analysis of fracture toughness on fiber-metal laminates composite materials. Revista Matéria, 25(3).

<https://revistas.ufjr.br/index.php/rm/article/view/3834>

ASTM 1820. (2020). Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM.

ASTM E561. (2019). Standard test method for KR curve determination, ASTM.

BS 7910. (2005). Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, British Standard Institution.

Castrodeza, E.M., Bastian, F.L., Perez Ipiña, J.E. (2004). Residual strength of unidirectional fibre- metal laminates based on Jc toughness of C(T) and SE(B) specimens: comparison with M(T) test results. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 27(10) 923-999.

Castrodeza, E.M., Perez Ipiña, J.E., Bastian, F.L. (2002). Experimental techniques for fracture instability toughness determination of unidirectional fibre metal laminates. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 25(11) 999-1008.

Gunnink, A. y Fibre, J.W. (2001). *Metal Laminates*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Javidrad, F. y Mashayekhy, M. (2014). A Cohesive Zone Model for Crack Growth Simulation in AISI 304 Steel. *Journal of Solid Mechanics*, 6 (4), 378-388.

Lin, C.T, y Kao, P.W. (1995). Effect of fiber bridging on the fatigue crack propagation in carbon fiber-reinforced aluminum laminates. *Materials Science & Engineering A*, 190, 65-72.

Paiva, M., Ríos, J., Asta, E. (2021). Modelo predictivo en 2D para la simulación del comportamiento elastoplástico de fractura en compuestos laminados tipo CARALL. *Actas VII CAIM – II CAIFE*, 671-682. DOI: <https://doi.org/10.33414/ajea.7.867.2021>.

Palkowski, M.H. y Lange, G. (2007). Creation of tailored high-strength hybrid sandwich structures. *Advanced Materials Research*, 22, 27-36.

Vogelansang, L.B. (1983). Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structure. *Delft University of Technology, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 22, 492-496.