

Modelo predictivo en 2D para la simulación del comportamiento elastoplástico de fractura en compuestos laminados híbridos FML

Juan Rios¹, Maximiliano Paiva¹, Eduardo Asta¹, Juan Balderrama¹ y Adrián Cambiasso¹

¹Grupo de Investigación Mecánica de la Fractura, Dto. Ingeniería Mecánica Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Email: asta.eduardo@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se ha elaborado un modelo predictivo del comportamiento de tenacidad a la fractura utilizando una geometría de probeta C(T), de ensayos normalizados, en materiales compuestos híbridos laminados metal-fibra (FML) del tipo CARALL con arreglos de láminas de aluminio Al2024 y polímero (resina epoxi) reforzado con fibra de carbono (CFRP). Para ello, se recurrió a un programa de elementos finitos (FEM) con un modelo elástico no lineal, en el que se consideraron las particularidades de estos materiales frente al avance de la fisura, utilizándose elementos cohesivos 2D y elementos planos 2D con el fin de aproximar el modelo a las curvas experimentales carga- desplazamiento obtenidas de los resultados de ensayos experimentales J. De esta forma se ha logrado obtener, a través del ajuste de los parámetros de los elementos considerados, una aproximación aceptable y un tanto conservadoras frente a los resultados experimentales.

Palabras Clave: Modelo predictivo, Probeta C(T), Material compuesto, Elementos cohesivos.

Abstract

In this presentation, a predictive model of the fracture toughness behavior has been developed using a C(T) specimen geometry, from standardized tests, in hybrid laminated metal-fiber (FML) composite materials of the CARALL type with arrangements of sheets of Al2024 aluminum and carbon fiber reinforced polymer (epoxy resin) (CFRP). To do this, a finite element program (FEM) was used with a non-linear elastic model, in which the particularities of these materials were considered against the advancement of the crack, using 2D cohesive elements and 2D flat elements in order to approximate the model to the experimental load-displacement curves obtained from the results of experimental tests J. In this way it has been possible to obtain, through the adjustment of the parameters of the elements considered, an acceptable and somewhat conservative approximation compared to the results experimental.

Keywords: Predictive model, C(T) Specimen, Composite materials, Cohesive elements.

1. Introducción

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de metal colaminadas en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de polímero. Cuando se utiliza aluminio y fibra de carbono embebida en resina epoxi, el compuesto se denomina CARALL (Carbon Reinforced ALuminum Laminates). Los materiales compuestos 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 [7], 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][4].

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: zona de puente de fibras detrás de la fisura. Figura 1

Ambos proporcionan incremento de la tenacidad a la propagación de una fisura.

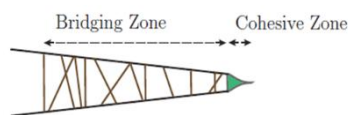


Figura 1: Boca de fisura y Bridging zone

2. MATERIAL Y METODO

2.1 Material

La probeta de mecánica de la fractura compacta C(T) [1] 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 6/5 (Al- 90-Al-0-Al- 90-Al-0-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 2024 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 2. En el gráfico de la Figura 3 se observa la curva constitutiva tensión-deformación del laminado 6/5.



Figura 2: Probeta de Tracción

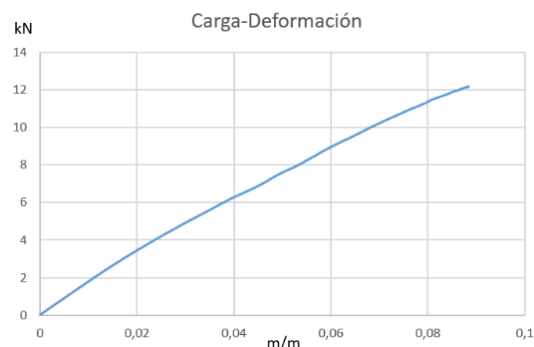


Figura 3: Curva constitutiva Carga- deformación

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) [1] 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 4.

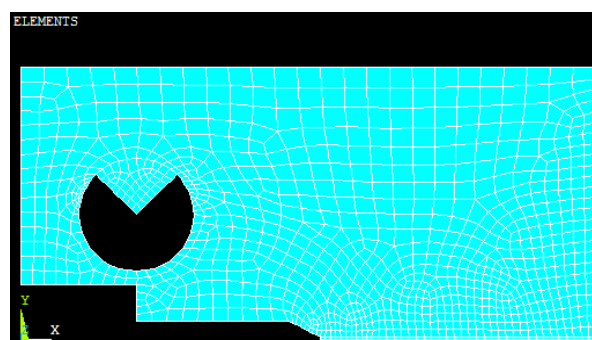


Figura 4: Geometría con elementos de la probeta C(T)

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) [1] simulando un estado plano de tensión compatible con el espesor de la probeta ensayada. En la Figura 5 se detalla las dimensiones de la probeta

C(T) [1] modelada, cuyas características geométricas coinciden con las de las probetas ensayadas.

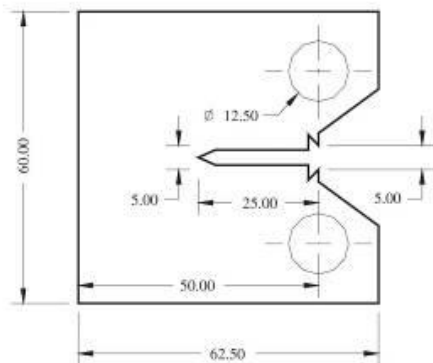


Figura 5: Probeta C(t)

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.

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 6:

- 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.

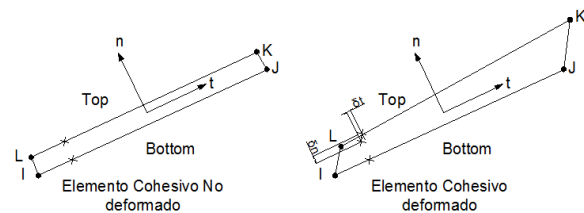
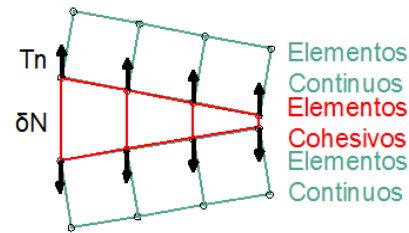


Figura 6: Representación de elementos cohesivos sometidos a esfuerzo normal

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_0 , y se define como la energía cohesiva.

El parámetro G_0 (Energía total disipada por la fractura), se representa a través de la integral definida en la ecuación (1)

$$G_0 = \int_0^{\delta_0} T(\delta) d\delta \quad (1)$$

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_0 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_0 , pero sigue siendo energía cohesiva G_0 ,

se corresponde aproximadamente a la *integral J* en el inicio de la fisura, y puede ser la primera estimación para G_0 .

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, $G_0^N = G_0^T$.

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 puede asumir que $(T(\delta))$ es una curva de tensión-desplazamiento con una forma bilineal, trapezoidal ó exponencial. Para nuestro caso la formulación que mejor se ajusto ha sido la exponencial.

Las ecuaciones (2) y (3) describen el comportamiento exponencial del elemento cohesivo, que se observa en la Figura 9

$$Tn = \sigma_{max} \cdot \left(\frac{\Delta n}{\delta n} \right) \cdot e^{1 - \Delta n / \delta n} \quad (2)$$

$$Gc = e \cdot \sigma_{max} \cdot \delta n \quad (3)$$

La curva Tensión desplazamiento de la Figura 7 representa la respuesta de un elemento cohesivo que sigue la ecuación constitutiva de forma exponencial.

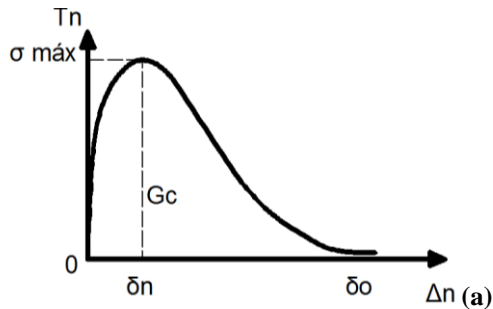


Figura 7: Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Exponencial

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 8.

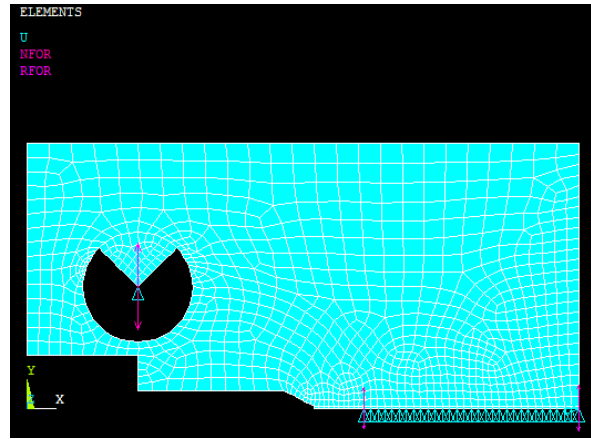


Figura 8: Elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS

3.4 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 [5]

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 (4):

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (4)$$

La componente elástica, J_{el} , es calculada con la ecuación (5), considerando condiciones de tensión plana con $a = a_0$:

$$J_{el} = \frac{K^2}{E} \quad (5)$$

El valor de E en la ecuación (5) 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 [6]. 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 (6):

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

$$\eta = 2 + (0,522 b_0 / W) \quad (6)$$

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 [7]. El cálculo de K_c se realiza a través de la ecuación (7):

$$J_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (7)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Gráficos P vs. 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 9 se observan las curvas de carga vs. Desplazamiento para elementos cohesivos con una formulación exponencial comparada con el ensayo experimental.

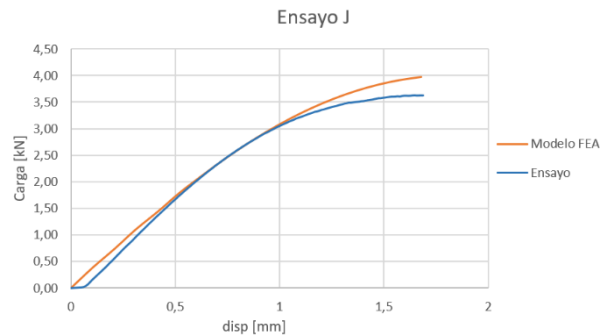


Figura 9: Resultado de modelo exponencial con mayor aproximación al ensayo experimental

El resultado de la simulación FEM de la Figura 12 muestra el comportamiento del elemento cohesivo exponencial en la proximidad del borde de la fisura, caracterizada por un primer tramo con comportamiento cuasi-lineal en la evolución Carga-desplazamiento hasta alcanzar un punto de inflexión, para luego mantener una correlación con los valores de ensayo. En el tramo cercano a la carga crítica se muestra un leve distanciamiento con la curva experimental, pero este comportamiento no repercutió significativamente en los valores obtenidos de J_c y K_c .

Tabla 1. Resultados de tenacidad a la fractura

Tenacidad a la fractura	J_c [KJ /m ²]	K_c [MPa /m ^{0,5}]
Experimental	65,3	51,7
Simulación	69,4	53,2
Error %	4,1	1,5

En la Tabla 1 se observan los valores de tenacidad a la fractura J_c y K_c obtenidos a partir de los gráficos, tanto de simulación como experimental, aplicando la metodología de la norma ASTM E 1820 que establece las ecuaciones (4) a (7) para el cálculo de J_c y ecuación (5) para la obtención de K_c . Y la última línea de la Tabla 1 nos indica el error % para ambos valores.

5. Conclusiones

Mediante la utilización del software ANSYS versión Académica y la interfaz de ANSYS Classic (APDL) se simuló las condiciones del ensayo J, para poder verificar con los valores obtenidos experimentalmente.

De lo obtenido se destaca que utilizando el modelado de los elementos cohesivos exponencial se puede inferir que la curva obtenida guarda una cierta linealidad entre P – VII, lo que aleja estos resultados de los obtenidos de ensayo, pero ante el avance de las cargas y de los desplazamientos la curva obtenida de la simulación se comienzan aproximar a los valores experimentales, luego se separa y se obtienen valores de carga superiores frente al mismo valor de desplazamiento y finalmente decae de forma suave hasta un punto donde el programa no adquiere más datos. Si nos basamos en el desarrollo de la curva proveniente de la simulación notamos que hay una diferencia importante en los valores de carga máxima, pero esto no repercute significativamente en los valores de J_c y K_c .

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

6. Referencias

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

[2] 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.ufrj.br/index.php/rm/article/view/3834>

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

[4] 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.

[5] 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>.

[6] 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.

[7] Castrodeza, E.M., Bastian, F.L., Perez Ipiña, J.E. (2004). Residual strength of unidirectional fibre-metal laminates based on J_c 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.