

Modelo predictivo de elementos finitos de ensayo de determinación de la tenacidad a la fractura para CARALL con aluminio 1050 comparado con resultados experimentales

Paiva, Maximiliano C. (1); Rios, Juan C. (1); Asta, Eduardo (1)

(1) *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Haedo, Buenos Aires, Arg.*

paiva.maximiliano@gmail.com

Palabras claves: elementos finitos, probeta C(T), CARALL, elástico no lineal, elementos cohesivos

RESUMEN

Dentro del presente trabajo se generó un modelo predictivo mediante elementos finitos del comportamiento de tenacidad a la fractura de una geometría de probeta C(T) con un material compuesto híbrido de Aluminio 1050 reforzado con fibras de carbono (CARALL). El modelo fue desarrollado en un programa de elementos finitos (FEM) con un modelo elástico no lineal, para simular el modelo se consideraron las particularidades de estos materiales frente al avance de la fisura, utilizándose elementos cohesivos 2-D y elementos planos 2-D así se logra aproximar el modelo a las curvas experimentales carga- desplazamiento obtenidas de los resultados de ensayos experimentales J, logrando llegar a valores aceptables a través del ajuste de los parámetros de los elementos cohesivos.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (Fiberglass Metal Laminates) [1], 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 compuestos FML se utilizan en la industria aeronáutica por ser materiales livianos, con elevada resistencia a la propagación de fisuras, resistencia al daño acumulado y baja absorción de humedad. Los mismos demuestran, además, un gran potencial de aplicación en la industria naval, aeronáutica y de otros vehículos de transporte [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]. Cuando el extremo de una fisura se propaga en forma perpendicular a la fibra, tal propagación se realiza preferentemente a través de las láminas de aluminio, está acompañada por una delaminación controlada, entre las láminas metálicas y la matriz polimérica. Esto causa poco daño en las fibras y trae como consecuencia que las fibras permanezcan mayoritariamente intactas detrás del extremo de la fisura. Este mecanismo es clave para reducir el factor de intensidad de tensiones en el extremo de la fisura, disminuyendo su velocidad de propagación.

En este trabajo se presenta 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 el modelo con elementos cohesivos que permiten predecir el comportamiento del material durante la propagación de la fisura. Se utilizaron dos tipos diferentes de formulación de elementos cohesivos, para predecir 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, han sido comparados con los resultados de ensayos de mecánica de la fractura en términos de la integral J, de acuerdo con la norma ASTM E-1820, obtenidos con probetas C(T) de material compuesto CARALL, fabricadas a partir de aluminio 1050 y fibras de carbono NCT-301 unidireccionales impregnadas en resina epoxi.

2. MATERIAL Y METODO

2.1 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. 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 gráfico de la Fig. 1 se observa el modelo de la probeta utilizada.

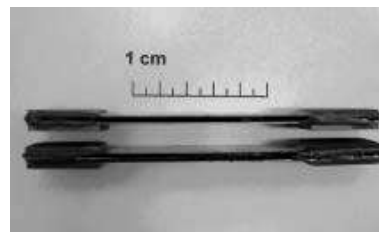


Figura 1 – Probeta utilizada en el ensayo

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. En la Fig. 2 la curva constitutiva tensión- deformación del laminado 4/3.

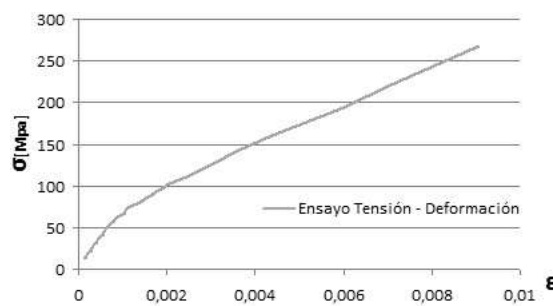


Figura 2-Curva constitutiva tensión deformación.

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 [4]. El mismo cuenta con herramientas que permiten la creación de una geometría y su posterior mallado, de esa manera se represento la geometría de una probeta de mecánica de la fractura C(T), indicada como CTS "Compact Test Specimen" Fig.3.

El detalle de la malla y la conectividad, así como la forma de los elementos, se puede observar en la Fig. 4. Luego se le aplicaron las condiciones de borde, para simular la simetría de la probeta y la carga que fue aplicada con una condición de desplazamiento controlado en el nodo ubicado en el punto de aplicación de la carga a través de la mordaza para el caso del ensayo.

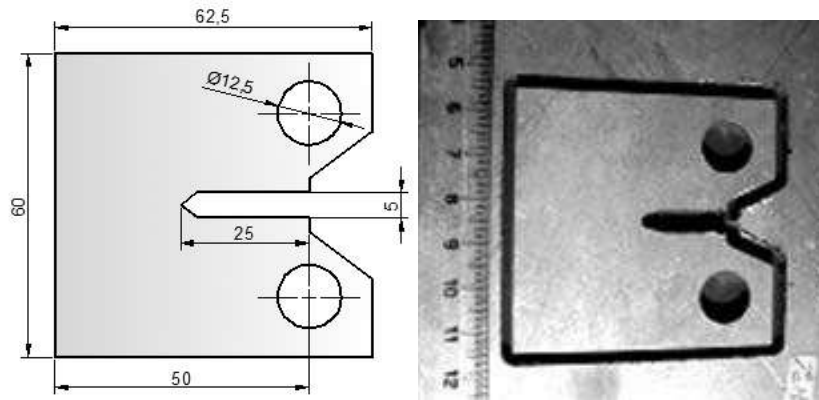


Figura 3- Geometría de la probeta C(T)

3. MODELO NUMERICO

3.1 Probeta CT “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) simulando un estado plano de tensión compatible con el espesor de la probeta ensayada. En la Fig. 3 se detalla las dimensiones de la probeta C(T) modelada, cuyas características geométricas coinciden con las de las probetas ensayadas.

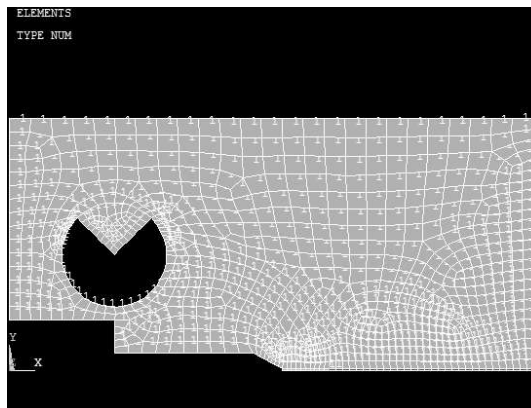


Figura 4-Discretización de la geometría de la probeta C(T)

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.

PLANE 182 es utilizado para el modelado de estructuras solidas 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). Ver Fig. 5.

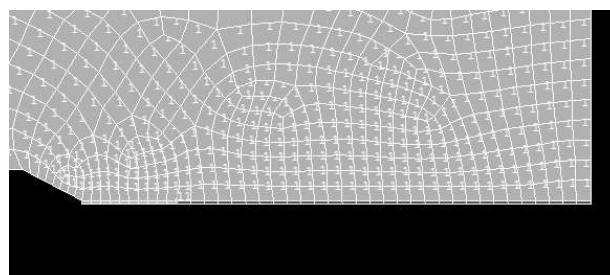


Figura 5-Discretización de elementos cohesivos

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 Fig. 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.

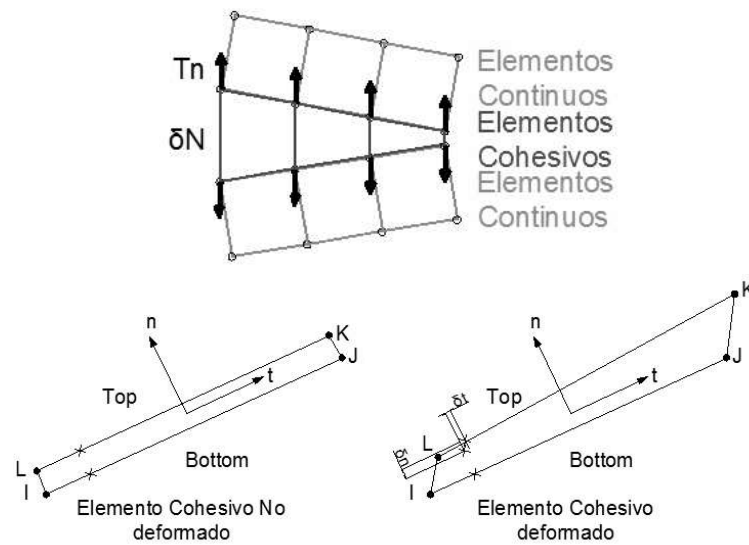


Figura 6 Representación de elementos cohesivos sometidos a esfuerzo normal

Se utiliza una ecuación constitutiva para relacionar, la tensión 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 area 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 ec. (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, $G_0^N = G_0^T$. [5]

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 ecs. (2) y (3) describen el comportamiento exponencial del elemento cohesivo, que se observa en la Fig. 5

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

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

La curva tensión-desplazamiento de la Fig. 7 representa la respuesta de un elemento cohesivo que sigue la ecuación constitutiva de forma exponencial.

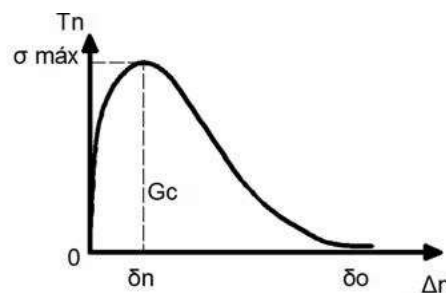


Figura 7-Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Exponencial

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

$$Tn = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta n} \cdot \Delta n & \Delta n \leq \delta n \\ \frac{\sigma_{\max}}{\delta n - \delta o} \cdot (\Delta n - \delta o) & \Delta n > \delta n \end{cases} \quad (4)$$

$$Gc = e \cdot \sigma_{\max} \cdot \frac{\delta o}{2} \quad (5)$$

La curva Tensión desplazamiento de la Fig. 8 representa la respuesta la ecuación constitutiva de forma bilineal propia del elemento cohesivo que responde a las ecuaciones. (4) y (5).

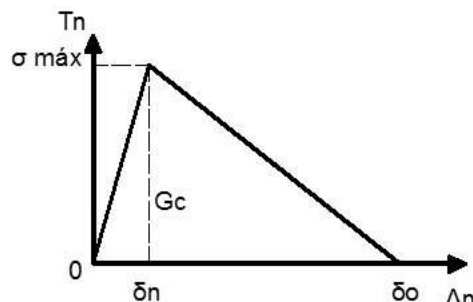


Figura 8- Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Bilineal

3.2 Condiciones de Borde

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 206 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 Fig. 9.

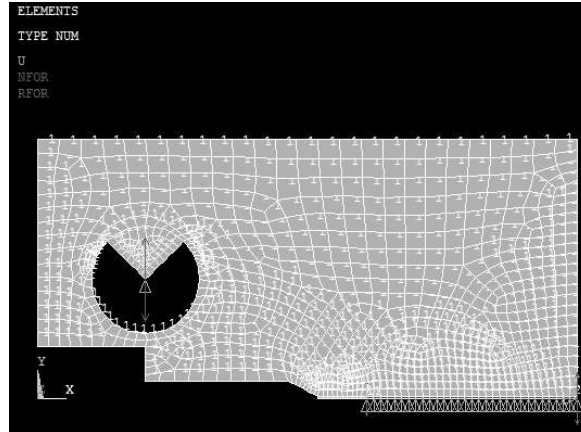


Figura 9-Elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Gráficos Carga vs. Desplazamiento

Para los dos tipos de materiales ensayados se presentan los gráficos de carga vs desplazamiento y sus aproximaciones realizadas con el modelo de elementos finitos con ambas formulaciones antes expuestas.

4.1.1. Gráfico con Modelo Exponencial

En el gráfico de las Fig. 10 se observan las curvas de carga vs. desplazamiento para elementos cohesivos con una formulación exponencial, donde se variaron los parámetros T_n máx y el desplazamiento relativo (δ) definidos en las ecs. (2) y (3), para la formulación del elemento cohesivo exponencial.

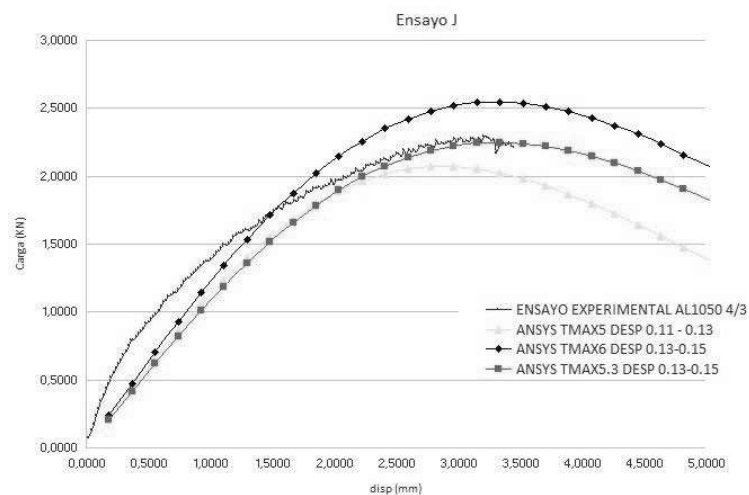


Figura 10- Curvas carga vs. desplazamiento variando los parámetros del elemento cohesivo

En la Fig. 11 se observa el comportamiento del elemento cohesivo exponencial en la proximidad del borde de la fisura, caracterizada por un primer tramo conservador con valores de carga por debajo de los experimentales, pero al incrementar el desplazamiento los valores de carga del modelo numérico aproximan a los obtenidos por ensayo hasta alcanzar σ_{max} , para luego mantener el campo de tensión con valores próximos a la tensión máxima. Se eligieron los valores de σ_{max} y de desplazamiento relativo para ajustar los resultados del modelo numérico, con el experimental.

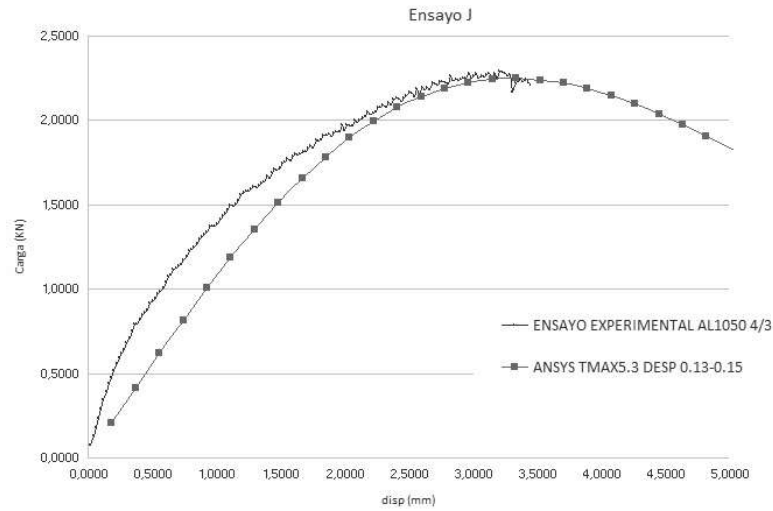


Figura 11- Curva con mayor aproximación al ensayo experimental

4.1.2. Gráfico con Modelo Bilineal

En la Fig. 12 se observa el comportamiento del elemento cohesivo bilineal en la proximidad del borde de la fisura, caracterizada por un primer tramo con incremento de carga hasta alcanzar valores próximos a la carga σ_{max} , a diferencia del modelo exponencial para este caso no se pudo obtener el decaimiento de los valores de carga frente al avance de la fisura.

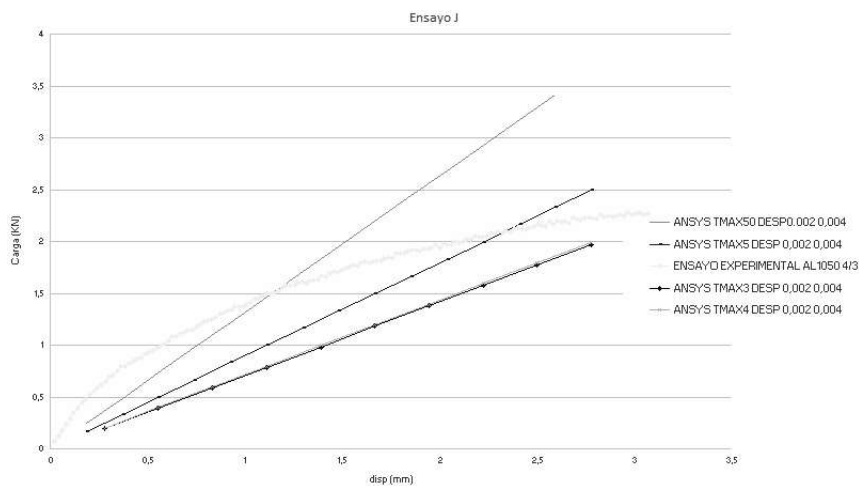


Figura 12- Resultado del modelo bilineal

4.2.1 Ajuste de Curvas

Para el ajuste de ambos modelos numéricos se tomó como base el ensayo experimental y se variaron los parámetros del elemento cohesivo (σ_{max} ; $\delta\sigma$; δn), y se dejaron fijos los valores del elemento sólido que fue cargado con valores obtenidos de ensayos de tracción. De esta manera, y teniendo en cuenta la lectura de resultados de las diferentes corridas del programa, se fueron aproximando las curvas. Los valores utilizados para los elementos cohesivos son los que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3 – Parámetros de elementos cohesivos

Tipo de Elemento	Parámetros		
	σ_{max} [MPa]	$\delta\sigma$ [mm]	δn [mm]
Bilineal	4	0,005	0,002
Exponencial	5,3	0,15	0,13

5. CONCLUSIONES

Se realizó la simulación por el método de los elementos finitos FEM, del ensayo de tenacidad a la fractura J sobre una probeta C(T) del material compuesto laminado del tipo CARALL con aluminio 1050, utilizando dos tipos de formulaciones de elementos cohesivos y se validaron con los resultados obtenidos experimentalmente. De la simulación realizada con ambos modelos en

ANSYS APDL, se puede inferir que las curvas carga-desplazamiento obtenidas con la formulación exponencial ajustan el comportamiento del material en la primera parte de éstas por debajo de los valores experimentales, con un comportamiento proporcional, pero en la proximidad del valor de carga máxima se verifica un cambio que mejora notoriamente el ajuste con la curva del experimental, en contraste con la formulación bilineal, logrando una mejor predicción del decaimiento de la carga. Se observa que el modelo bilineal no permite aproximar la curva obtenida por simulación con la del ensayo a partir de valores de carga máxima siguiendo el decaimiento de la carga frente al avance de la fisura.

6. 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, (pp 492-496) (1983).
- [2] H Palkowski, G Lange, Creation of tailored high-strength hybrid sandwich structures, Advanced Materials Research, 22, (pp 27-36) (2007).
- [3] C T Lin, P W Kao, Effect of fiber bridging on the fatigue crack propagation in carbon fiberreinforced aluminum laminates, Materials Science & Engineering A, 190, (pp 65-72) (1995).
- [4] D. Trias, "Fracture Mechanics (Computer lab sessions)", Universidad de Girona (2012).
- [5] F. Javidrad, M. Mashayekhy, "A Cohesive Zone Model for Crack Growth Simulation in AISI 304 Steel", Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran, (2014).