

**FoDAMI****15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021**

MODELO PREDICTIVO EN 2D PARA LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE FRACTURA EN COMPUESTOS LAMINADOS TIPO CARALL

Maximiliano Paiva¹, Juan C. Rios¹ y Eduardo Asta¹

¹ Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional.
Calle Paris.N°580, Hedo, Argentina
correo-e: paiva.maximiliano@gmail.com; jcrios@frh.utn.edu.ar.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un modelo predictivo del comportamiento de tenacidad a la fractura de una geometría de probeta C(T) con un material compuesto híbrido de Aluminio reforzado con fibras de carbono (CARALL). 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 2-D y elementos planos 2-D con el fin de aproximar el modelo a las curvas experimentales carga-desplazamiento obtenidas de los resultados de ensayos experimentales J, logrando llegar, a través del ajuste de los parámetros de los elementos, a una aproximación aceptable y un tanto conservadoras frente a los resultados experimentales.

Palabras Clave: *Modelo predictivo, Probeta C(T), Material Compuesto, Elementos Cohesivos.*

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, FML (FiberMetal 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 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 6061 T0 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 5/4 (Al-0-Al- 90-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 6061-T0 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. En el gráfico de la Fig. 1 se observa la curva constitutiva tensión- deformación del laminado 5/4.

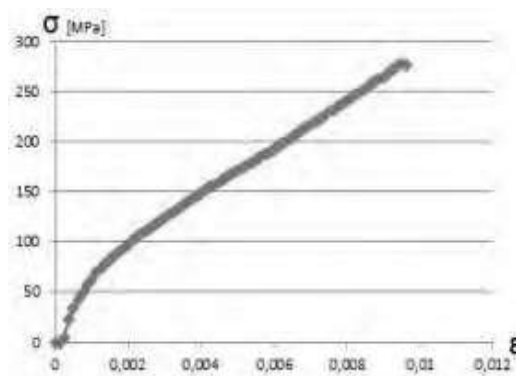


Figura 1-Curva constitutiva tensión deformación.

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 programa cuenta con herramientas que permiten la creación de una geometría y su posterior mallado, pero en este caso se utilizó una malla previamente definida donde se representa la geometría de una probeta de mecánica de la fractura C(T), 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 Fig. 2.

Todos los datos asociados a la malla (nodos, conectividad de los elementos, grupos de nodos y de elementos, etc) se pasaron al código APDL (lenguaje de programación de ANSYS) y utilizando un archivo con formato ".txt". Todos los demás parámetros del modelo de elementos finitos, tales como: materiales, fuerzas, presiones y desplazamientos, se deben incluir en el mismo archivo de texto.

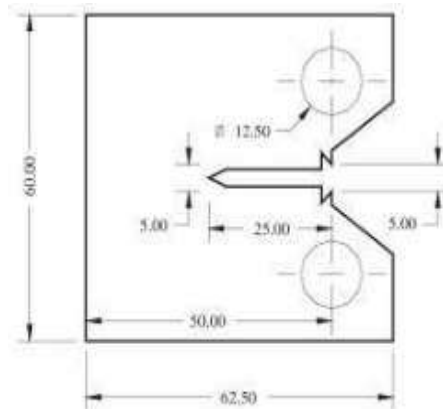


Figura 2- Geometría de la probeta C(T)

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) 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.

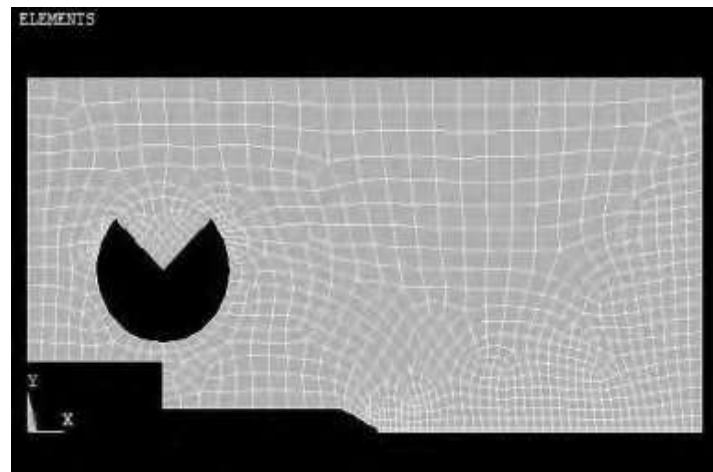


Figura 3-Discretización de la geometría de la probeta C(T)

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).

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. 4:

- 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.

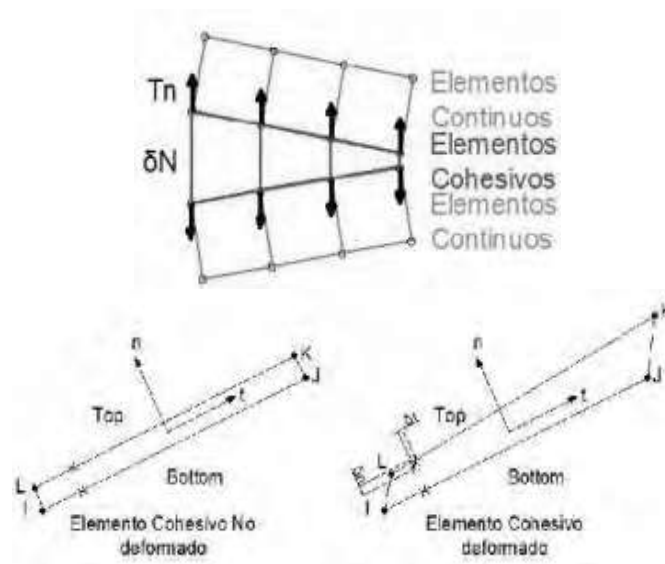


Figura 4 Representación de elementos cohesivos sometidos a esfuerzo normal

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 area bajo la curva ($T(\delta)$), representa la enegía absorbida por el elemento cohesivo, G_0 , y se define como la energía cohesiva.

El parametro G_0 (Energía total disipada por la fractura), se representa a traves 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 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

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

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

La curva Tensión desplazamiento de la Fig. 5 representa la respuesta de un elemento cohesivo que sigue la ecuación constitutiva de forma exponencial.

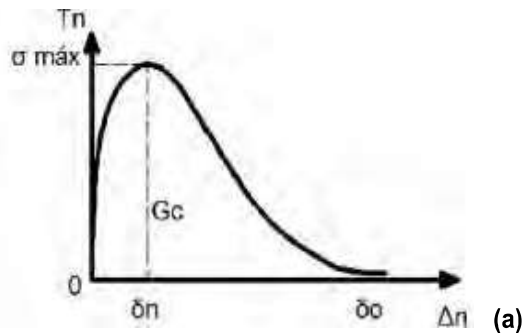


Figura 5-Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Exponencial

Las ecs. (4) y (5) describen el comportamiento bilineal del elemento cohesivo, que se observa en la Fig. 6

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

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

La curva Tensión desplazamiento de la Fig. 6 representa la respuesta la ecuación constitutiva de forma bilineal propia del elemento cohesivo que responde a las ecuaciones. (4) y (5).

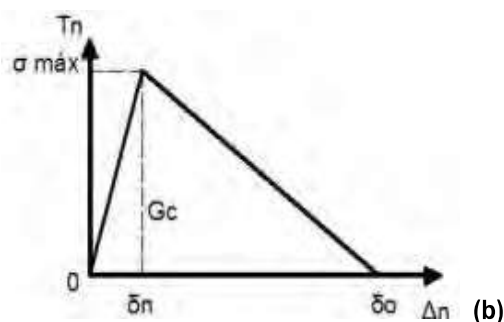


Figura 6- Modelo constitutivo. Elemento Cohesivo Bilineal

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 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. 7.

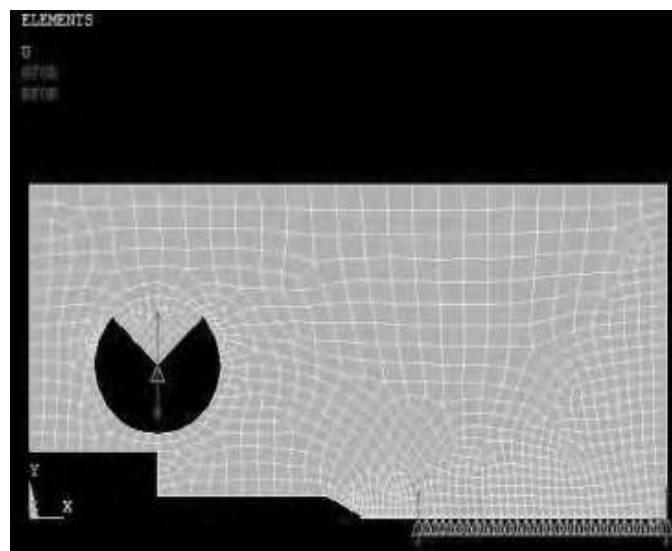


Figura 7-Elementos y condiciones de borde extraídos del modelo en ANSYS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Gráficos P vs. V_{II}

En los siguientes gráficos se representan los valores de Carga vs desplazamiento de ambos modelos constitutivos frente a los valores obtenidos de ensayo.

4.1.1. Gráfico con Modelo Exponencial

En el gráfico de la Fig. 8 se observan las curvas de carga vs. Desplazamiento para elementos cohesivos con una formulación exponencial, donde se variaron los parámetros T_n máx y G_{max} definidos en las ecs. (2) y (3), para la formulación del elemento cohesivo exponencial.

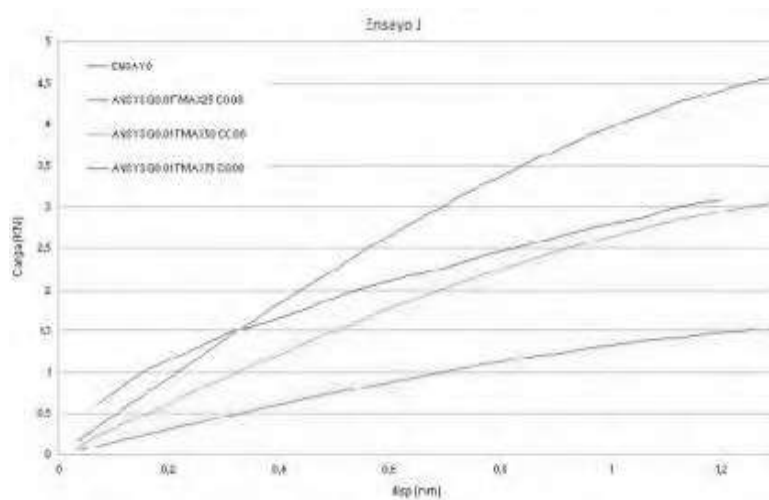


Figura 8- Variación de Curvas en Función de los parámetros del elemento cohesivo

En la Fig. 9 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 σ_{max} , para luego mantener el campo de tensión con valores próximos a la tensión máxima. Se eligieron los valores de σ_{max} y G_{max} que permitieron ajustar el resultado del modelo numérico con los valores experimentales.

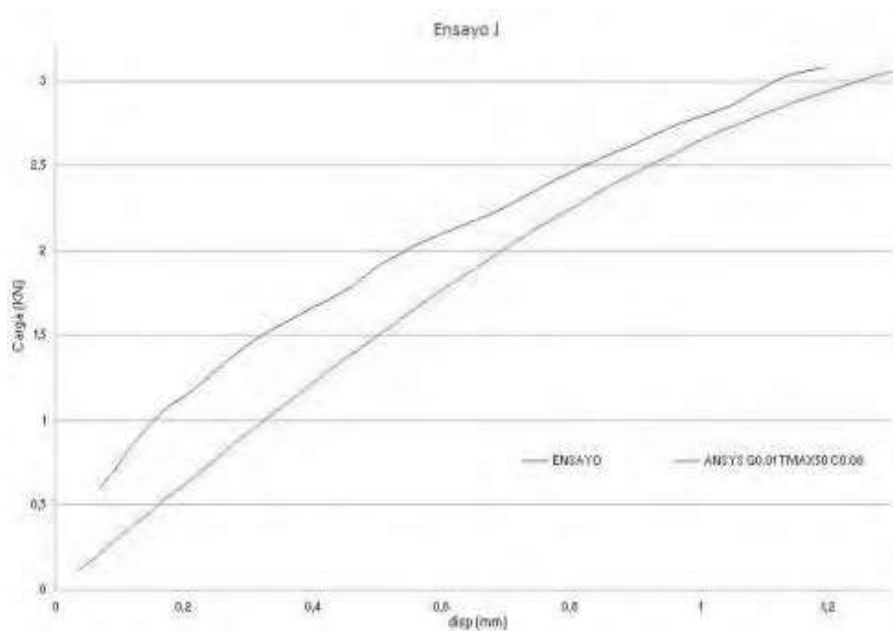


Figura 9- Resultado del modelo exponencial

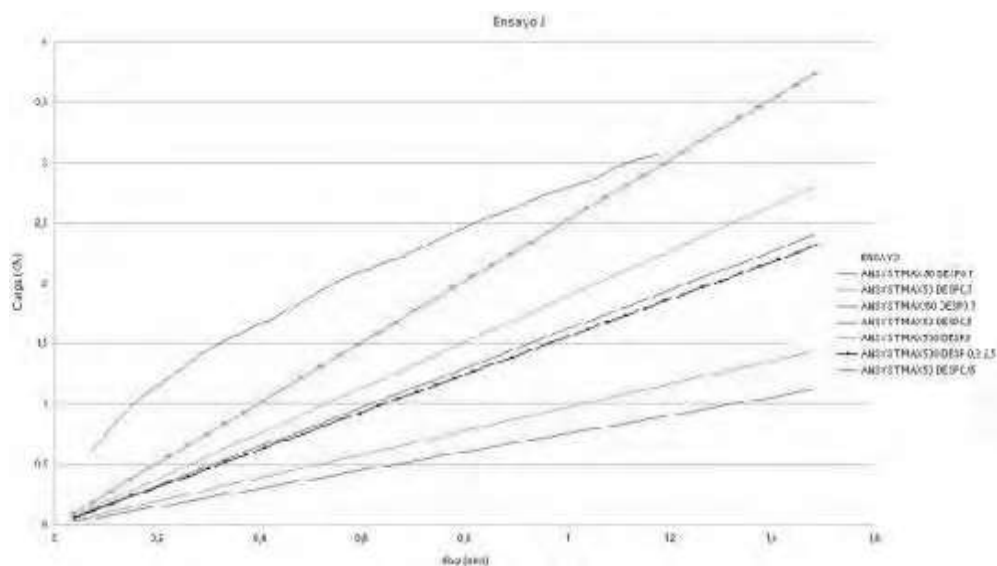
Tabla 1 – Calculo de Error Entre Resultado experimental y Resultado del modelo

Tramo de Gráfico (Desplazamiento)	Error Porcentual
1ero (0mm – 0,4mm)	41,3%
2do (0,4mm – 0,8mm)	13,7%
2do (0,8mm – 1,2mm)	5,8%

Se destaca de los resultados obtenidos, que el valor del Error disminuye hacía el final del ensayo, lo que en nuestro caso hace que los resultados numéricos tengan un mejor ajuste en el tramo de la curva que utilizaremos para el calculo de J.

4.1.2. Gráfico con Modelo Bilineal

En la Fig. 10 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 σ_{max} , pero con este modelo no se pudo llegar a demostrar la perdida de resistencia del material frente al avance de la fisura, como si se logro en el modelo exponencial.

**Figura 10- Resultado del modelo bilineal****Tabla 2 – Calculo de Error Entre Resultado experimental y Resultado del modelo**

Tramo de Gráfico (Desplazamiento)	Error Porcentual
1ero (0mm – 0,4mm)	51,8%
2do (0,4mm – 0,8mm)	24,9%
2do (0,8mm – 1,2mm)	8,8%

Al igual que el caso anterior se destaca una disminución del error porcentual hacia el final del ensayo. Pero a diferencia del modelo anterior, en este caso no se pudo llegar a obtener la disminución de los valores de carga cuando se alcanza el valor de tensión a la rotura.

4.2.1 Ajuste de Curvas

Tomando las curvas obtenidas del ensayo de laboratorio, se ajustaron los parámetros del elemento cohesivo para aproximar las curvas obtenidas del modelo numérico a las de ensayo. Para ello se fueron variando tres parámetros de los elementos cohesivos (σ_{max} ; δo ; δn), de esta manera, y teniendo en cuenta la lectura de resultados de las diferentes corridas del programa, se fueron aproximando las curvas. En la siguiente tabla se representan los valores de los parámetros utilizados particularmente en las curvas que aproximan los resultados del ensayo, debido a que se aproximó por dos tipos de elementos cohesivos (bilineal y exponencial), en la tabla se muestran ambos casos.

Tabla 3 – Parámetros de elementos cohesivos

Tipo de Elemento	Parámetros		
	σ_{max} [MPa]	δo [mm]	δn [mm]
Bilineal	50	0,15	0,15
Exponencial	σ_{max} [MPa]	Gmax	δo [mm]
	50	0,01	0,08

5. CONCLUSIONES

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

De lo obtenido se destaca que utilizando dos tipos de modelado de los elementos cohesivos (exponencial y bilineal) se puede inferir, para ambos casos, que las curvas obtenidas guardan una cierta linealidad entre $P - V_{II}$, lo que aleja estos resultados de los obtenidos de ensayo, pero ante el avance de las cargas y de los desplazamientos las curvas se comienzan a aproximar a los valores experimentales, hasta llegar a la carga máxima donde ambas curvas, en este punto, se desarrollan distintas, para el caso del elemento exponencial toma una forma aproxima o ajusta con la curva experimental y luego decae de forma suave hasta un punto donde el programa no adquiere más datos. De forma contraria, para el caso del modelo bilineal, ante el avance de la deformación sigue oponiendo resistencia para lo cual estos últimos valores no son de utilidad para el análisis. Finalmente, se advierte que ambos modelos predictivos presentan resultados conservadores en la primera parte del avance de la fisura frente a los valores de ensayo, pero esta tendencia se invierte al final del análisis donde los resultados son muy próximos a los valores obtenidos de ensayo.

5. REFERENCIAS

- [1] L B Voegesang, 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 fiber-reinforced 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)