

# PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRACTURA DE CHAPAS DE ALUMINIO DE PEQUEÑO ESPESOR

G. Vadillo, I. Villa y J. Fernández-Sáez

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.  
Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. 28911 Leganés. Madrid

**Resumen.** En el análisis del comportamiento en fractura de chapas metálicas de pequeño espesor, elementos utilizados, principalmente, en el sector aeronáutico y en el del automóvil, deben tenerse en cuenta una serie de características específicas entre las que se encuentran el comportamiento dúctil que exhiben, la propagación estable de la fisura con un aumento considerable de su longitud antes de la rotura inestable, condiciones tensionales próximas a las de tensión plana, así como la presencia de modos de fallo debidos a pandeo de la placa. En este trabajo se utiliza un procedimiento basado en el parámetro **CTOD- $\delta_5$**  para analizar resultados experimentales realizados sobre placas fisuradas de pequeño espesor y diferentes dimensiones de la aleación de uso aeronáutico Al2024-T3. Aunque el estudio es muy preliminar, la sencillez del procedimiento y los resultados obtenidos hacen atractiva su utilización.

**Abstract.** The fracture behaviour analysis of thin sheet metal, which are used commonly in aeronautical and automotive industries, is an important research field. In this studies, should be kept in mind characteristics like ductile behaviour, large stable crack growth before the unstable fracture, plane stress conditions and the presence of buckling mode of failure. In this work, a procedure based in the **CTOD- $\delta_5$**  parameter is used to analyse experimental results of fracture tests on thin sheet 2024-T3 aluminium alloy. Although the study is very preliminary, the simplicity of the procedure and the obtained results make attractive its use.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento en fractura de componentes de pequeño espesor es un tema que ha cobrado una gran relevancia en muchas aplicaciones de ingeniería como, por ejemplo, el análisis de tuberías de gas [1] o el estudio de estructuras aeronáuticas [2].

En el análisis del comportamiento en fractura de este tipo de componentes, deben tenerse en cuenta una serie de características específicas, como son el notable incremento de la longitud de la fisura antes de la rotura inestable del componente, las condiciones tensionales próximas a tensión plana, debido al pequeño espesor, lo cual dificulta la transferencia de los resultados de laboratorio, debido a que éstos se obtienen, normalmente, siguiendo las normas actuales que requieren condiciones de deformación plana dominante en las probetas de ensayo, y, finalmente, la posible aparición de modos de pandeo que contribuyen al colapso de la estructura.

Se ha explorado la aplicación de diferentes criterios para predecir la resistencia a la fractura de paneles de pequeño espesor, entre los que se pueden destacar los basados en :

1. el factor de intensidad de tensiones, **K<sub>I</sub>**, cuya aplicación tiene dificultades por el tamaño de las zonas plásticas desarrolladas antes de la rotura.
2. la integral **J**, que también presenta dificultades teóricas por el notable incremento de la longitud de la fisura antes de la rotura inestable.

3. el **CTOA** (Crack Tip Opening Angle), definido como el ángulo que forman los labios de la fisura en su extremo. Es un parámetro que caracteriza el estado de deformaciones en el extremo de la fisura [3].
4. el **CTOD** (Crack Tip Opening Displacement), introducido por Wells [4] para medir la tenacidad de fractura de un material en determinadas condiciones

Recientemente, Newman y otros [5] han revisado la utilización de estos dos últimos parámetros, que se han mostrado los más adecuados para abordar este tipo de problemas.

Schödel y Zerbst [6] han propuesto el uso del parámetro **CTOD- $\delta_5$** , introducido por Schwalbe [7] (una de las definiciones de **CTOD**), como criterio de fractura aplicable a paneles de pequeño espesor. El **CTOD- $\delta_5$**  se define como el desplazamiento relativo de dos puntos simétricos con relación al plano de la fisura, de tal forma que, inicialmente, distan 5 mm y la línea que une dichos puntos pasa por el extremo de la fisura.

La propuesta de Schödel y Zerbst [6] es una extensión del procedimiento general **SINTAP**, aplicable, en su formulación original, a estructuras y componentes sometidos a estados tensionales próximos a deformación plana. En un reciente número de la revista *Engineering Fracture Mechanics* (67, (2000), pp. 479-668) se presentan las diferentes aplicaciones de este procedimiento general.

Además, el problema de la propagación de fisuras y resistencia residual de paneles de pequeño espesor ha sido abordado desde otros puntos de vista. Así, Chabanet y otros [8] y Besson y otros [9] han aplicado modelos micromecánicos como el de Gurson-Tvergaard- Needleman (modelo GTN) y otros basados en la Mecánica del Daño como el de Rousselier. El problema que surge con este tipo de modelos es el gran número de parámetros que hay que calibrar, especialmente en el modelo GTN.

También hay que reseñar la aplicación de métodos basados en modelos de fisura cohesiva, como alternativa a los anteriormente citados [10].

En este trabajo se utiliza el criterio basado en el parámetro **CTOD- $\delta_5$** , de acuerdo con el procedimiento propuesto en la referencia [6], para analizar resultados de ensayos, publicados por Johnston [11], sobre chapas fisuradas de pequeño espesor y diferentes dimensiones de la aleación de uso aeronáutico Al2024-T3. Los resultados experimentales consisten en las curvas **F- $\Delta a$**  (carga-incremento de la longitud de fisura) para las diferentes probetas ensayadas. Se ha utilizado el mencionado procedimiento para, a partir de los resultados experimentales de una cierta probeta con unas determinadas dimensiones, predecir el comportamiento de otras de diferentes dimensiones y del mismo material.

## 2. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO SINTAP A PANELES DE PEQUEÑO ESPESOR

El análisis se inicia tomando como dato la curva de resistencia a la fractura del material en términos del parámetro **CTOD- $\delta_5$** , (curva  **$\delta_{5R}(\Delta a)$** , que se supone una propiedad del material). Para un cierto componente de geometría dada que contiene una fisura de tamaño **a**, resultado de haber experimentado un incremento de longitud  **$\Delta a$** , a partir de su tamaño inicial  **$a_0$** , el objetivo es calcular la carga exterior que es capaz de soportar dicho componente en esas condiciones. Para ello se establece el criterio:

$$\delta_5(F, a) = \delta_{5R}(\Delta a) \quad (1)$$

donde  **$\delta_5(\mathbf{F}, \mathbf{a})$**  representa el valor del parámetro **CTOD- $\delta_5$**  asociado a cada valor de la fuerza exterior aplicada, **F** y a cada tamaño de fisura, **a**.

Para el cálculo de  **$\delta_5(\mathbf{F}, \mathbf{a})$**  se adopta el siguiente procedimiento [6]:

$$\delta_5(F, a) = \frac{\delta_e}{[f(L_r)]^{-2}} \quad (2)$$

donde  **$\delta_e$**  viene dado por:

$$\delta_e(F, a) = \frac{K_I^2}{E' \sigma_Y} \quad (3)$$

siendo  **$K_I$**  el factor de intensidad de tensiones,  **$\sigma_Y$**  el límite elástico del material y  **$E'$**  se puede escribir en función del módulo de elasticidad del material, **E**, mediante:  **$E' = E/(1-\nu^2)$**  (para deformación plana) o bien,  **$E' = E$**  (para tensión plana), donde  **$\nu$**  es el coeficiente de Poisson.

**f(L<sub>r</sub>)** es una función definida como sigue:

$$f(L_r) = \left[ 1 + \frac{1}{2} L_r^2 \right]^{-1/2} \times \left[ 0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6) \right] \quad (4)$$

para  $0 \leq L_r \leq 1$

$$f(L_r) = f(L_r = 1) \times L_r^{(N-1)/2N}$$

$$\text{para } 1 \leq L_r \leq L_{r\text{máx}} \quad (5)$$

**L<sub>r</sub>** se define como el cociente entre la carga aplicada **F** y la carga de colapso plástico para el componente analizado, **F<sub>Y</sub>**, es decir:

$$L_r = \frac{F}{F_Y} \quad (6)$$

El resto de los parámetros que aparecen en las expresiones anteriores vienen dados por:

$$L_{r\text{máx}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{\sigma_Y} \right] \quad (7)$$

$$N = 0.3 \left[ 1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_u} \right] \quad (8)$$

siendo  **$\sigma_u$**  la resistencia a tracción del material. Para el parámetro  **$\mu$**  se toma el valor mínimo de los siguientes: 0,6 y 0,001E/  **$\sigma_Y$**

Las expresiones de  **$K_I$**  y **F<sub>Y</sub>** dependen de la geometría y dimensiones del componente analizado. Para las probetas más utilizadas en ensayos de fractura de chapas de pequeño espesor, estas expresiones son:

- Probeta compacta C(T), (figura 1)

$$K_I = \frac{F}{BW} \sqrt{\pi a} \times [f_m + 3f_b] \quad (9)$$

con:

$$f_m = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \quad (10)$$

y

$$f_b = 1.122 - 1.40(a/W) + 7.33(a/W)^2 - 13.08(a/W)^3 + 14.0(a/W)^4 \quad (11)$$

$$F_Y = B \left[ \sqrt{2(a^2 + W^2)} - a - W \right] \sigma_Y \quad (12)$$

- Probeta M(T), ( figura 2)

$$K_I = \frac{F}{2BW} \sqrt{\pi a} \times \left[ 1 - 0.025(a/W)^2 + 0.06(a/W)^4 \right] \times \left[ \cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^{-1/2} \quad (13)$$

$$F_Y = 2B(W - a) \sigma_Y \quad (14)$$

- Probeta M(T) sometida a carga biaxial, (figura 3)

$$K_I = \frac{F}{2BW} \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

$$F_Y = 2BW \left[ \lambda^2 + (1 - a/W)^{-2} - \lambda \right] \sigma_Y \quad (16)$$

$$\lambda = F_1 / F_2 \quad (17)$$

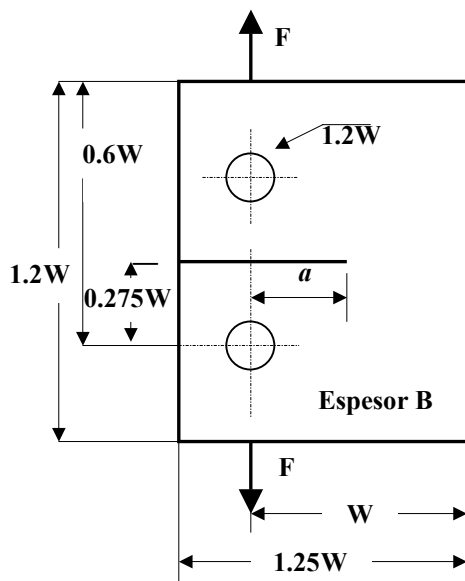


Fig. 1. Probeta C(T)

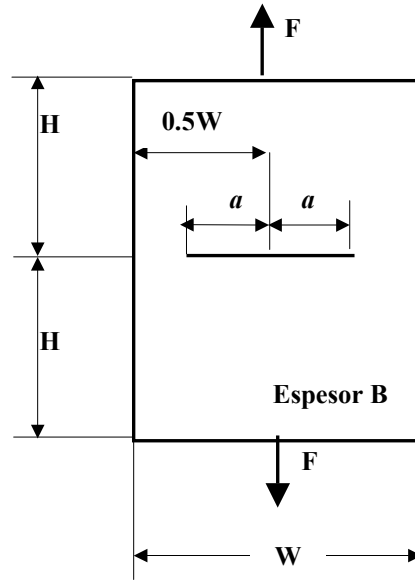


Fig. 2. Probeta M(T)

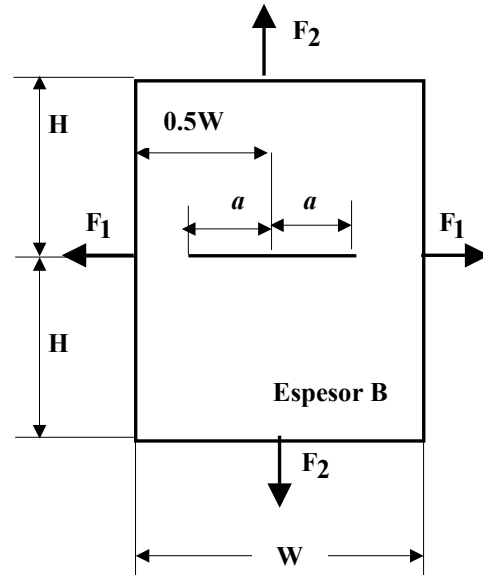


Fig. 3. Probeta M(T) sometida a carga biaxial

Aplicando este procedimiento, para una cierta probeta y para cada valor del tamaño de la fisura, se puede calcular el valor de la carga F que cumple el criterio especificado por la ecuación 1.

### 3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A PARTIR DE LAS CURVAS F-Δa

En el anterior análisis se ha partido del conocimiento de la curva  $\delta_{SR}(\Delta a)$ , y se ha supuesto que esta curva es independiente de la geometría. En ocasiones, se puede disponer de la curva F-Δa para diferentes probetas, en vez de las curvas  $\delta_{SR}(\Delta a)$ , en cuyo caso se puede plantear la pregunta de si a partir de diferentes curvas F-Δa es posible obtener una única curva  $\delta_{SR}(\Delta a)$  independiente de la geometría, o lo que es lo mismo, si

a partir de una curva  $F-\Delta a$  correspondiente a una cierta probeta se puede predecir la correspondiente a otra del mismo material.

Tratando de responder a esta pregunta, se han analizado resultados experimentales publicados por Johnston [11] correspondientes a ensayos realizados sobre probetas tipo M(T) (ver figura 2) de la aleación de aluminio 2024-T3. Las dimensiones de las probetas analizadas aparecen en la tabla 1 y las propiedades del material necesarias para el estudio se muestran en la tabla 2.

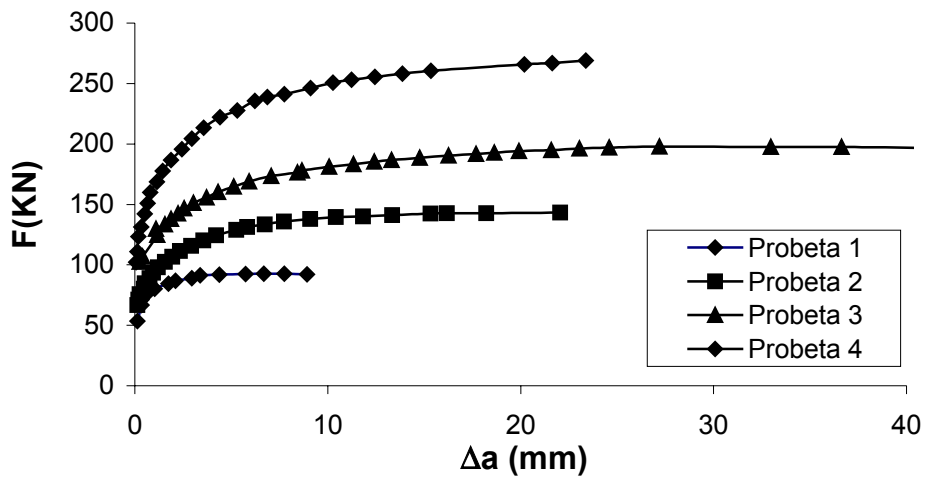
**Tabla 1.** Dimensiones de las probetas analizadas

PROBETAS	B (mm)	W (mm)	$a_0$ (mm)
Probeta 1	1.6	304.8	50.85
Probeta 2	1.6	609.6	101.87
Probeta 3	1.6	1016	169.291
Probeta 4	1.6	1016	101.6

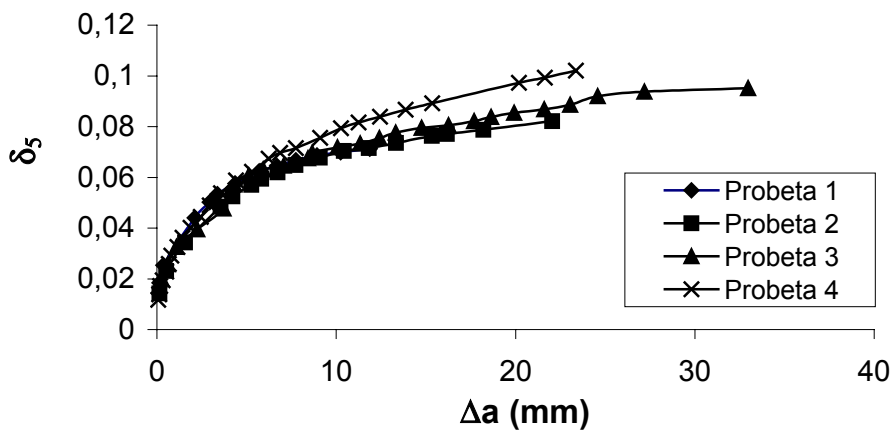
**Tabla 2.** Propiedades del material

PROPIEDADES	
E (MPa)	71400
$\nu$	0,3
$\sigma_y$ (MPa)	383
$\sigma_u$ (MPa)	496

En la figura 4 se muestran las curvas  $F-\Delta a$  correspondientes a las probetas analizadas. A partir de estas curvas y aplicando el procedimiento anteriormente descrito, se han obtenido las curvas  $\delta_{5R}(\Delta a)$  que cumplen con el criterio expresado en la ecuación (1). Estas curvas se representan en la figura 5 para cada una de las probetas analizadas y se observa que tienen una gran similitud, aunque la correspondiente a la probeta número 4 presenta valores de  $\delta_5$  ligeramente superiores a las de las demás.



**Fig. 4.** Curvas experimentales  $F-\Delta a$  correspondientes a las probetas analizadas



**Fig. 5.** Curvas  $\delta_{5R}(\Delta a)$  obtenidas a partir de las curvas  $F-\Delta a$ .

Con objeto de conocer la capacidad del procedimiento para predecir el comportamiento de una probeta, conocida la curva  $F-\Delta a$  de otra del mismo material, se ha realizado el siguiente ejercicio. A partir de los resultados experimentales (curva  $F-\Delta a$ ) de la probeta 3 y de su correspondiente curva  $\delta_{5R}(\Delta a)$ , se han

calculado las curvas  $F-\Delta a$  para el resto de las probetas y se han comparado con sus correspondientes resultados experimentales. Estas comparaciones se presentan en las figuras 6, 7 y 8, correspondientes a las probetas números 1, 2 y 4, respectivamente.

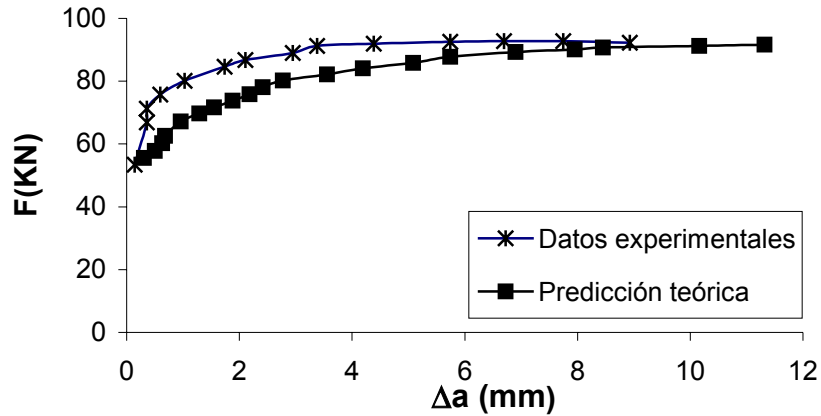


Fig. 6. Curvas  $F-\Delta a$  correspondientes a la probeta 1.

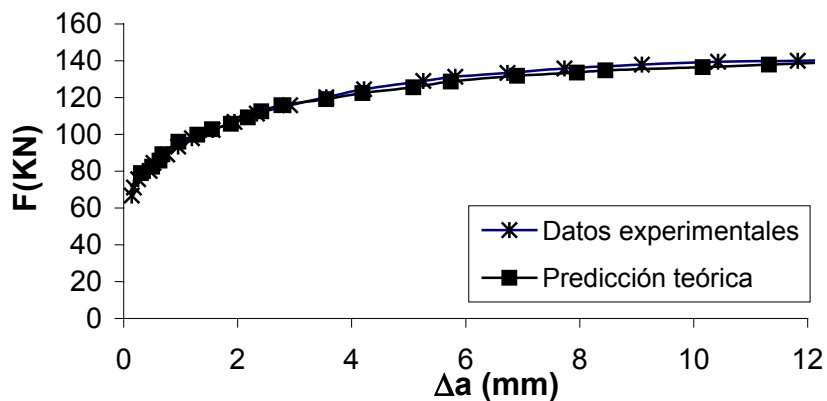


Fig. 7. Curvas  $F-\Delta a$  correspondientes a la probeta 2.

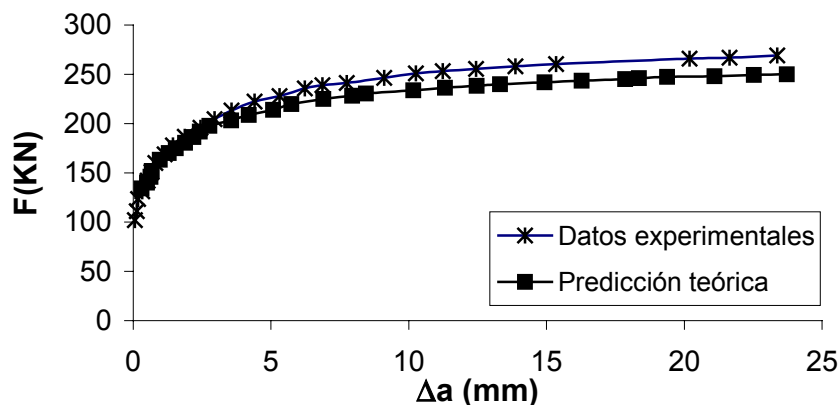


Fig. 8. Curvas  $F-\Delta a$  correspondientes a la probeta 4.

Se puede observar que las predicciones teóricas y los resultados experimentales difieren en un máximo del

13% en el caso de la probeta número 1 y de un 7% en el caso de la probeta número 4, siendo prácticamente

coincidentes en el caso de la probeta número 2. Las predicciones teóricas son más conservadoras que los resultados experimentales. Esto es así porque se ha elegido la probeta número 3 como referencia, debido a que es la que presenta mayor crecimiento de fisura, haciendo por ello innecesario extrapolaciones en el análisis de las restantes. Si se hubiese tomado como referencia los resultados de la probeta número 4, las predicciones no hubiesen resultado conservadoras.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la aplicabilidad de un criterio de fractura basado en el **CTOD- $\delta_5$**  para predecir el comportamiento en fractura de paneles de aluminio de pequeño espesor. Se ha aplicado el citado criterio de fractura de acuerdo con el procedimiento desarrollado en la referencia [6], que es una extensión a estructuras de pequeño espesor del procedimiento general **SINTAP**. Se ha partido de las curvas **F- $\Delta a$** , en vez de las curvas de resistencia a la fractura en términos del parámetro **CTOD- $\delta_5$**  y con la información correspondiente a una cierta probeta se han obtenido predicciones razonablemente precisas de la resistencia a fractura de otras de diferentes dimensiones.

Aunque este estudio es muy preliminar y debe ser complementado con el análisis de diferentes tipos de probetas, así como con diferentes espesores, los resultados alcanzados son prometedores y hacen atractiva la utilización del procedimiento.

#### REFERENCIAS

- [1] Horsley, D.J., "Background to the use of the CTOA for predictions of dynamic ductile fracture arrest in pipelines", *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 547-552 (2003).
- [2] Harris, C.E, Newman Jr, J.C., Piascik R. y Starnes Jr J.H., "Analytical methodology for prediction the onset of widespread fatigue damage fuselage structure", *Journal of Aircrafts*, 35, 307-317 (1998).
- [3] Shih, C.F., deLorenzi, H.G. y Andrews W.R., "Studies on crack initiation and stable crack growth", *Elastic-Plastic Fracture. ASTM STP 668*, American Society for Testing and Materials, pp. 65-120 (1979).
- [4] Wells, A.A., "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding", *British Welding Journal*, 563-570 (1963).
- [5] Newman Jr, J.C., James, M.A. y Zerbst, U., "A review of the CTOA/CTOD fracture criterion", *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 371-385 (2003).
- [6] Schödel, M. y Zerbst, U., "Application of the European flaw assessment procedure SINTAP to thin wall structures: analytical assessment levels", *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1035-1058 (2004).
- [7] Schwalbe, K-H., "Introduction of  $\delta_5$  as an operational definition of the CTOD and its practical use". *ASTM STP 1256*, American Society for Testing and Materials. pp. 763-78 (1995)
- [8] Chabanet, O., Steglich, D., Besson, J., Heitmann, V., Hellmann, D. y Brocks W., "Predicting crack growth resistance of aluminium sheets", *Computational Materials Science*, 26, 1-12 (2003)
- [9] Besson, J., Steglich, D. y Brocks, W., "Modeling of plane strain ductile rupture", *International Journal of Plasticity*, 19, 1517-1541 (2003)
- [10] Roychowdhury, S., Roy, Y.D.A., y Dodds Jr, R.H., "Ductile tearing in thin aluminium panels: experiments and analysis using large-displacement, 3-D surface cohesive elements", *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 983-1002 (2002).
- [11] Johnston, M., "Fracture tests on thin sheet 2024-T3 aluminum alloy for specimens with and without anti-buckling guides", *Nasa Report CR-2001-210832* (2001).