

# Caracterización de la respuesta a fractura de las aleaciones de aluminio 2024-O y 2024-T3

A. Monsalve\* y R. Morales\*\*

## Resumen

Se caracterizó la respuesta a fractura de las aleaciones de aluminio empleadas en aeronáutica, 2024-O (recocida) y 2024-T3 (endurecida por precipitación). El estudio de la aleación en estado de recocido se realizó a través del concepto de Trabajo Esencial Específico de Fractura, utilizando el protocolo ESIS 1995. Se utilizaron probetas DENT (Double Edge Notched Tension) variándose la longitud de ligamento con el fin de determinar el valor del trabajo esencial específico de fractura para cada espesor utilizado. Se determinó, además, la dependencia entre el valor del trabajo esencial específico de fractura y el espesor del material, encontrándose una dependencia creciente entre el trabajo esencial específico de fractura y el espesor. En el caso de la aleación 2024-T3, se determinó, sólo para bajos espesores en que predomina la tensión plana, el valor del trabajo esencial específico de fractura. Sin embargo, para esta aleación, los resultados fueron menos concluyentes debido a la alta tenacidad a la fractura que posee la aleación endurecida. Finalmente, se realizó la caracterización de la superficie de fractura de estas aleaciones encontrándose un micromecanismo dúctil en el caso de la aleación recocida y dúctil-frágil en el caso de la aleación endurecida.

**Palabras clave** Aluminio. Fractura. Dúctil. Frágil. Aeronáutica.

## Characterization of fracture behavior of 2024-O and 2024-T3 aluminum alloys

## Abstract

The fracture behavior of 2024-O (annealed) and 2024-T3 (precipitation hardened) aluminum alloys used in aeronautical applications have been characterized. The study of the annealed alloy was carried out through the concept of Essential Specific Work of Fracture, using the ESIS protocol. DENT (Double Edge Notch Tension) samples were used, varying the ligament length in order to determine the relationship between the essential specific work of fracture and the thickness of the material. In the case of 2024-T3 alloy, the essential specific work of fracture was determined only for low thicknesses, where the predominant conditions are plane stress. However, for this alloy, the results were not conclusive because of the high fracture toughness of these hardened alloys. Finally, the fracture surface of these alloys was characterized finding a ductile mechanism in the case of the annealed alloy and ductile-brittle mechanism in the case of the hardened alloy.

**Keywords** Aluminum. Fracture. Ductile. Brittle. Aeronautic.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio es un tema permanentemente investigado<sup>[1]</sup>, debido a su importancia en diversas aplicaciones industriales. Las dos aleaciones estudiadas en el presente trabajo, son típicamente empleadas en la industria aeronáutica, principalmente en pieles y piezas de pequeños espesores. La aleación 2024-O presenta una gran ductilidad, lo que unido al pequeño espesor hace necesario el empleo

de un nuevo parámetro que sea capaz de describir el proceso de fractura de una forma más precisa. La aleación 2024-T3, endurecida por precipitación, se usa, también, en pequeños espesores, por lo que el comportamiento de ambas aleaciones no queda completamente descrito por el factor crítico de intensidad de tensiones. Por otro lado, debido precisamente a los bajos espesores empleados, la condición predominante de carga es de tensión plana<sup>[2]</sup> y <sup>[3]</sup>. Al respecto, conviene señalar que, en estas condiciones, la tenacidad no resulta ser una propiedad

(\*) Trabajo recibido el día 5 de septiembre de 2003 y aceptado en su forma final el día 3 de septiembre de 2004.

(\*\*) Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Casilla 10233, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

(\*\*\*) Academia Politécnica Aeronáutica, Fuerza Aérea de Chile, Santiago, Chile.

del material ya que su valor muestra una fuerte dependencia con el espesor del mismo. No obstante, dado que la práctica industrial habitual es el trabajo con bajos espesores, surge la necesidad de realizar una caracterización de la respuesta a la fractura precisamente en el rango de bajos espesores para estos materiales. Por esta razón, en el presente trabajo se han estudiado las dos aleaciones serie 2000 ya especificadas, desde el punto de vista de su resistencia a la fractura en el contexto de pequeños espesores. Al margen de la variedad de usos que presentan estas aleaciones, lo que parece estar claro es la necesidad de conocer en mayor detalle el comportamiento a fractura, sobre todo si se tiene en cuenta que muchos de sus usos están relacionados con aplicaciones en las que son de suma importancia los aspectos de seguridad, como ocurre en la industria aeronáutica.

Específicamente, la caracterización de la respuesta a fractura de ambas aleaciones se realiza a través de la utilización del concepto de Trabajo Esencial Específico de Fractura. Esta determinación se realizó en el marco de la prenorma denominada Protocolo ESIS 1995 [4] (European Standard Integrity Society), que contempla la utilización de probetas DENT (Double Edge Notched Tension), que son ensayadas a tracción bajo control de desplazamiento.

## 2. BASE TEÓRICA

De acuerdo al Protocolo ESIS [4], las condiciones geométricas que deben satisfacer las probetas, se resumen en:

$$3t \leq L \leq \min(w/3, 2r_p) \quad (1)$$

donde,  $w$  es el ancho de la probeta,  $t$  el espesor,  $L$  es la longitud del ligamento y  $r_p$  corresponde al radio de la bola plástica, calculada a través de la mecánica lineal de la fractura como [5 y 6]:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

en que,  $K_{IC}$  es una primera estimación de la tenacidad a la fractura y  $\sigma_{ys}$  corresponde al límite elástico. Una primera estimación del radio de la bola plástica puede realizarse a través de una suposición razonable para el valor de  $K_{IC}$ . Dada la alta tenacidad de la aleación empleada, se ha supuesto, de manera conservadora, que  $K_{IC}$  es  $21 \text{ MPam}^{1/2}$ , co-

respondiente a la aleación 2024 T351 [7]. La condición  $L \leq 2r_p$  tiene por objetivo asegurar que todo el ligamento esté en plasticidad antes de que la grieta comience a avanzar por el material. A su vez, la condición  $3t \leq L$  es para garantizar las condiciones de tensión plana, en tanto que la condición  $L \leq w/3$  es para asegurar que la deformación en el ligamento no se vea afectada por fenómenos de borde.

Puede demostrarse que, en este caso, la expresión para el trabajo específico de fractura  $w_f$  es [8]:

$$w_f = \frac{W_f}{lt} = w_e + \beta w_p l \quad (3)$$

donde,  $W_f$  es el trabajo total de fractura,  $w_f$  es el trabajo específico de fractura,  $w_p$  es el trabajo plástico de fractura,  $\beta$  es un factor geométrico y  $w_e$  es el trabajo esencial específico de fractura. Como se sabe [6],  $w_p$  está relacionado con el trabajo por unidad de volumen del material deformado plásticamente, en tanto que,  $w_e$  corresponde al trabajo realizado en la zona de proceso y está directamente relacionado con la fractura.

## 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La composición química de la aleación de aluminio estudiada se muestra en la tabla I, pudiéndose apreciar el alto contenido de cobre y magnesio que caracteriza a este tipo de aleación.

Para la evaluación de  $w_e$  en modo I, se utilizaron probetas DENT, cuyas dimensiones se muestran en la figura 1 y con orientación T-L como se muestra en la figura 2.

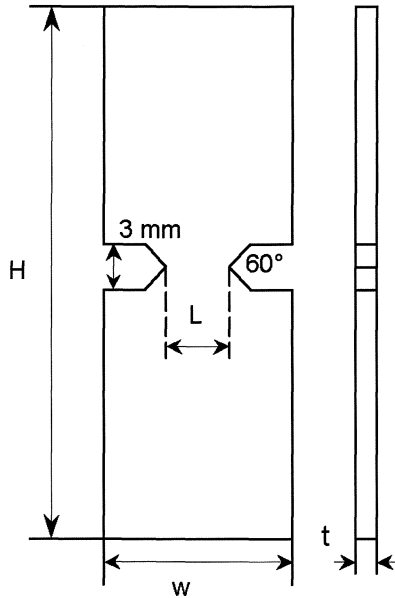
$L$ , se denomina longitud de ligamento y constituye la variable experimental más relevante en este tipo de determinación. Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio estudiadas, obtenidas experimentalmente, se resumen en la tabla II.

La dirección de corte de las probetas es tal, que la grieta crece paralela al sentido de laminación, como puede apreciarse en la figura 2. Se traccionó a velocidades de 0.5 y 1 mm/min, en una máquina

**Tabla I.** Composición de la aleación de aluminio estudiada

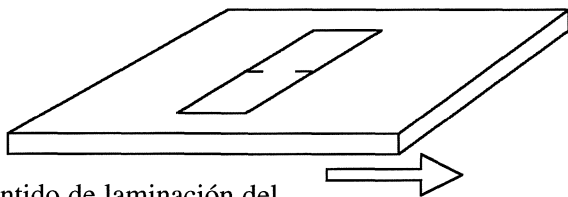
*Table I. Composition of the aluminum alloy studied*

% Cu	% Mg	% Zn	% Mn	% Fe	% Si	% Cr	% Ti
3,8-4,9	1,2-1,8	0,25	0,3-0,9	0,5	0,5	0,1	0,15



**Figura 1.** Esquema de las probetas DENT utilizadas para la determinación de  $w_e$  en modo I.

*Figure 1.* Drawing of DENT samples used to determine  $w_e$  in mode I.



Sentido de laminación del material

**Figura 2.** Dirección de corte de las probetas DENT.

*Figure 2.* Cutting direction of DENT samples.

electromecánica Instron, modelo 4482 (100 kN). En cada experiencia se obtuvo el registro carga-desplazamiento, a partir del que se obtuvo la energía específica absorbida en la fractura. Luego, se correlacionó esta energía específica con la longitud de ligamento para cada espesor, obteniendo el trabajo esencial específico de fractura<sup>[9]</sup>.

Para la determinación de la relación existente entre el trabajo esencial específico de fractura y el espesor del material, se graficó el valor obtenido de  $w_e$ ,  $v/s$  los diferentes espesores de probetas ensayadas.

En el presente trabajo se estudiaron dos aspectos: a) el valor del trabajo esencial específico de fractura en probetas de espesor constante; b) la dependencia entre el trabajo esencial específico de fractura y el espesor del material.

**Tabla II.** Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio estudiado

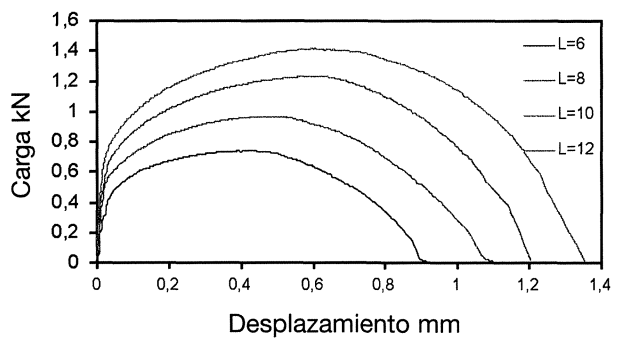
*Table II.* Mechanical properties of studied aluminum alloys

	Límite Elástico (MPa)	UTS (MPa)	% Elongación a rotura
2024-O	76	180	17
2024-T3	270	409	15

#### 4. RESULTADOS

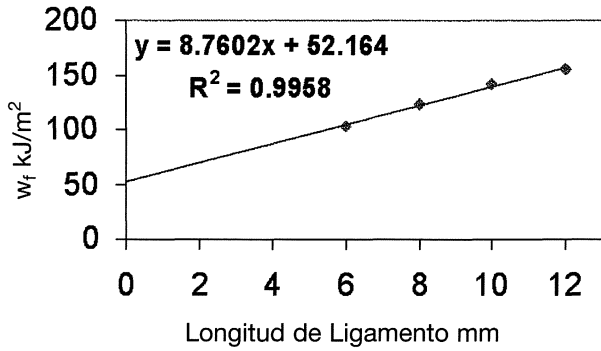
En la figura 3 se muestra las curvas carga-desplazamiento para espesor de probeta de 0.8 mm, en el caso de la aleación 2024-O, para diferentes longitudes de ligamento. A su vez, en la figura 5, se muestran las curvas carga-desplazamiento para la aleación 2024-T3, para probetas de 2 mm de espesor. Tal como se aprecia, al aumentar la longitud de ligamento aumenta la energía absorbida por las probetas, debido a la mayor área en estas curvas. A partir de la energía absorbida en cada uno de los ensayos, es posible calcular el trabajo (energía) absorbido para cada longitud de ligamento. Estos resultados se muestran en las figuras 4 y 6. Como se aprecia en estas figuras, el trabajo específico de fractura, en ambos casos, aumenta linealmente con la longitud de ligamento.

Finalmente, en las figuras 7 y 8 se muestran las curvas de trabajo esencial específico de fractura frente al espesor del material, para el aluminio 2024-O y 2024-T3, respectivamente. En el caso de la figura 7 se aprecia un aumento en el valor del trabajo esencial específico de fractura frente al espesor del material. Por otro lado, en la figura 8 se muestra la curva de trabajo esencial específico de



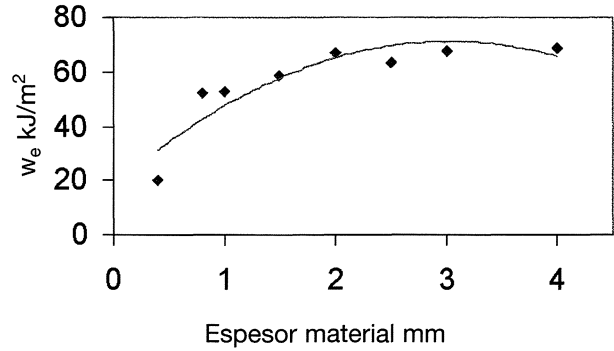
**Figura 3.** Curva carga-desplazamiento, probeta 0,8 mm de espesor, aluminio 2024-O.

*Figure 3.* Load-displacement curve of 0.8 mm thickness samples for aluminum 2024-O.



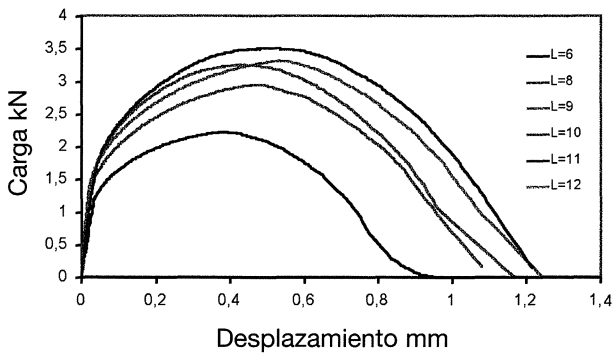
**Figura 4.** Curva  $w_f$ , v/s longitud de ligamento para 0.8 mm de espesor aluminio 2024-O.

Figure 4.  $w_f$ , v/s ligament length for 0.8 mm thickness aluminum 2024-O.



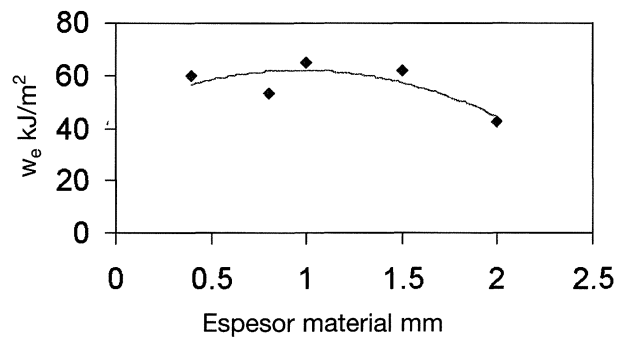
**Figura 7.** Variación de  $w_e$  con el espesor de material, aluminio 2024-O.

Figure 7. Variation between  $w_e$  and thickness of material, aluminum 2024-O.



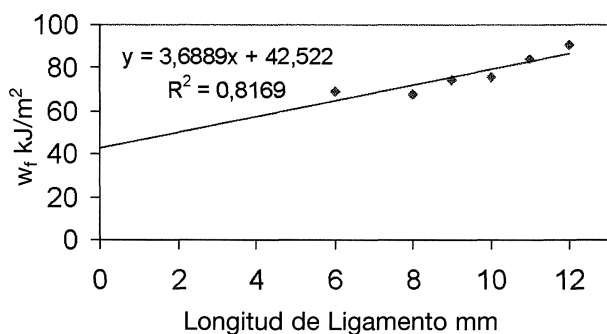
**Figura 5.** Curva carga-desplazamiento, probeta 2.0 mm de espesor, aluminio 2024-T3.

Figure 5. Load-displacement curve of 2.0 mm thickness samples of aluminum 2024-T3.



**Figura 8.** Variación de  $w_e$  con el espesor de material, aluminio 2024-T3.

Figure 8. Variation between  $w_e$  and thickness of material, aluminum 2024-T3.



**Figura 6.** Curva  $w_f$ , v/s longitud de ligamento para 2.0 mm de espesor, aluminio 2024-T3.

Figure 6.  $w_f$  v/s ligament length of 2.0 mm thickness aluminum 2024-T3.

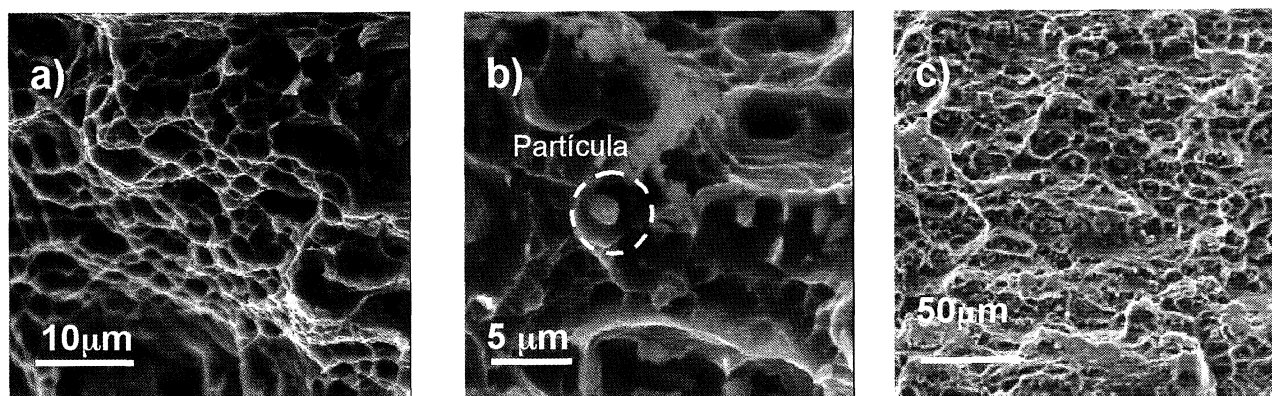
fractura frente al espesor del material. Tal como se aprecia, aparentemente el valor del trabajo esencial específico de fractura disminuye (pasando previamente por un máximo), conforme aumenta el

espesor del material. Claramente, existe una diferencia notable en el comportamiento de ambas aleaciones: en tanto la aleación 2024-O muestra un aumento en la tenacidad a la fractura al aumentar el espesor del material, la aleación 2024-T3, presenta un máximo en la tenacidad, tras lo cual, la tenacidad disminuye con el espesor.

## 5. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO

Utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL 5410, se realizó el análisis fractográfico de la superficie de fractura. Además, se realizó análisis químico por EDAX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) en puntos específicos de la superficie de ambos materiales.

En la figura 9 a) se muestra una imagen de la superficie de fractura, correspondiente a una probeta de aluminio 2024-O, pudiendo apreciarse una morfología consistente en cavidades (voids) con



**Figura 9.** a) Superficie de fractura aluminio 2024-O a 2000x. b) Superficie de fractura aluminio 2024-T3 a 3500x. c) Superficie de fractura aluminio 2024-T3 a 500x.

Figure 9. (a) Fracture surface of 2024-O aluminum, 2000x; (b) Fracture surface of 2024-T3 aluminum, 3500x; (c) Fracture surface of 2024-T3 aluminum, 500x.

gran cantidad de deformación plástica, lo que está de acuerdo con el alto valor de la macro-deformación plástica medida en el ensayo de tracción (ver Tabla II).

Es posible deducir que el micromecanismo imperante corresponde a la nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades, típico de fractura dúctil. En las figuras 9 b) y c) se aprecia la superficie de fractura del aluminio 2024-T3 y se puede observar la existencia de plasticidad en coexistencia con microfragilidad. Además, en la figura 9 b) se puede ver con mayor detalle la presencia de partículas que dan origen a las cavidades características de la fractura dúctil. La partícula indicada corresponde a  $\text{CuMgAl}_2$ .

## 6. CONCLUSIONES

Se ha determinado el trabajo esencial específico de fractura en las aleaciones de aluminio 2024-O y 2024-T3 para diversos espesores del material. Se ha encontrado una relación ascendente para el caso del aluminio 2024-O y decreciente para el aluminio 2024-T3, entre el trabajo esencial específico de fractura y el espesor del material.

El estado de esfuerzo predominante en la aleación 2024-O es el de tensión plana, en tanto que

el de la aleación 2024-T3 es una combinación de deformación y tensión plana.

El micromecanismo de fractura corresponde al de nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades en el caso de la aleación 2024-O. Para el caso de la aleación 2024-T3, la superficie de fractura observada muestra la presencia de zonas de microfragilidad coexistiendo con áreas de microductilidad.

## REFERENCIAS

- [1] J.C. CUYÁS, G.W. MUGICA, D.O. TOVÍO, A.C. GONZÁLEZ, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 139-149.
- [2] D. BROECK, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 3rd Ed. M.N. Pub., 1982.
- [3] J.F. KNOTT, *Fundamentals of Fracture Mechanics*, London, Butterworths, 1973.
- [4]ESIS, *Testing Protocol for Essential Work of Fracture*, Version 3, 1995.
- [5] Y.W. MAI y B. COTTERELL, *Int. J. Fracture* 32 (1993) 105-125.
- [6] Y.W. MAI, *Int. J. Mech.Sci.* 12 (1993) 995-1005.
- [7] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, *Fatigue and Fracture* 19 (1996).
- [8] S. HASHEMI, *J. of Materials Science* (1993) 6.178-6.184.
- [9] A. GALARZA, Tesis Doctoral, Universidad de Navarra, 2000.