

# ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA ROTURA A TRACCIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075 T7351

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL FRACTURE ANALYSIS OF THE ALUMINIUM ALLOY 7075 T7351 TENSION TEST

Alberto Monsalve<sup>\*,+</sup>, Diego Celentano<sup>\*\*</sup>, Claudio García<sup>\*\*</sup> y Ángel Royo<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica

<sup>\*\*</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de Santiago de Chile

Avda. Bdo. O'Higgins 3363 – Santiago de Chile – CHILE

e-mail: amonsalv@lauca.usach.cl, dcelenta@lauca.usach.cl,

<sup>+</sup>Academia Politécnica Aeronáutica

Gran Avenida Paradero 36 ½ - Santiago de Chile - CHILE

**RESUMEN:** Se ha realizado una secuencia de ensayos tendientes a caracterizar la rotura a tracción de la aleación de aluminio 7075 T7351 usada en la industria aeronáutica. Para cada ensayo se han medido la evolución de la carga, el alargamiento y el diámetro instantáneo en el cuello. Con estos datos se calibran los parámetros elásticos y plásticos del modelo mecánico utilizado en la simulación del ensayo de tracción. Además, se han realizado observaciones fractográficas con el fin de estudiar la morfología de la superficie fracturada. Los resultados obtenidos indican que es posible ajustar un modelo que describa de manera razonable el comportamiento a tracción en probetas cilíndricas del material en estudio a partir de un conjunto de experiencias simples.

**ABSTRACT:** A set of experimental tests have been carried out in order to characterize the mechanical behaviour of the 7075 T7351 aluminium alloy used in the aeronautical industry. The evolution of load, elongation and current diameter have been measured. These data serves to calibrate the elastic and plastic parameters which define the constitutive law considered in the numerical simulation of the tensile test. Moreover, fractographic observations have been made to study the surface morphology at the fractured zone. The obtained results show that it is possible to adjust a model able to describe in a reasonable form the tension mechanical behaviour of cylindrical specimens by performing relatively simple tests.

### 1. INTRODUCCION

En la construcción aeronáutica uno de los materiales más utilizados es el la aleación de aluminio 7075 T7351. Para el cálculo y diseño óptimo de piezas fabricadas con este material resulta imprescindible conocer sus propiedades mecánicas involucradas en la ley constitutiva que represente fielmente el comportamiento elastoplástico de dicho material. Una de las formas tradicionales de caracterizar el comportamiento mecánico de materiales es a través del ensayo de tracción. Este ensayo proporciona los parámetros de la ley tensión-deformación característica de un determinado material, tanto para el rango elástico como para el plástico. En este último rango, sin embargo, la determinación de los parámetros de endurecimiento por deformación del material no es sencilla debido a la presencia de grandes deformaciones plásticas que se desarrollan en la zona de estricción. Por lo tanto, si se pretende simular este ensayo es necesario contar con un modelo constitutivo planteado en el contexto de la plasticidad con deformaciones finitas.

En este trabajo se presenta un estudio experimental y numérico de la fractura a tracción de un aluminio 7075 T7351. Para tal fin se realizaron una serie de ensayos de probetas cilíndricas de 9 mm de diámetro nominal en una máquina universal bajo control de carga a velocidad de cruceta o celda constante. Para cada ensayo se han medido la evolución de la carga, el alargamiento y el diámetro instantáneo en el cuello. Con estos datos se calibran los parámetros elásticos y plásticos del modelo mecánico utilizado en la simulación del ensayo de tracción. Dadas las características ya comentadas del problema, dicho modelo está formulado en el contexto de la teoría de la plasticidad con grandes deformaciones en el marco del método de elementos finitos (Celentano, 1999; García, 1999). Además, se han realizado observaciones fractográficas con el fin de estudiar la morfología de la superficie fracturada. Los resultados obtenidos indican que es posible ajustar un modelo que describa de manera razonable el comportamiento a tracción en probetas cilíndricas del material en estudio a través de un pequeño número de experiencias simples.

## 2. SITUACIÓN FÍSICA

Con el objeto de caracterizar el comportamiento mecánico del aluminio 7075 T7351 se procedió, en primera instancia, a la realización de cinco ensayos de tracción a una velocidad de cruceta de 2.5 mm/min. La configuración geométrica de la probeta utilizada para dichos ensayos obedece a la norma ASTM E-8M (ver figura 2.1).

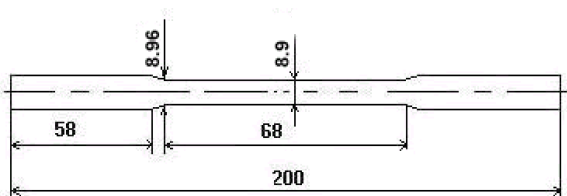


Figura 2.1. Configuración geométrica de la probeta utilizada en los ensayos de tracción

El extensómetro se ubicó en la zona central con una longitud de trabajo de 50 mm. Las variables mecánicas obtenidas del ensayo se presentan en la tabla 2.1. Las curvas tensión ingenieril versus deformación ingenieril ( $L$  y  $L_0$  son las longitudes instantáneas e inicial entre marcas, respectivamente y  $A_0$  es el área transversal inicial) obtenidas para las cinco probetas anteriores se muestran en la figura 2.2.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del aluminio 7075 T7351.

| Probeta N°                    | Módulo de Young [GPa] | Tensión de fluencia [MPa] | Carga en la carga máxima [kN] | Tensión en la carga máxima [MPa] | Def. ing.pto de ruptura [%] |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1                             | 78.5                  | 467.4                     | 33.34                         | 542                              | 8.6                         |
| 2                             | 80                    | 474.2                     | 33.95                         | 552                              | 9                           |
| 3                             | 77.4                  | 471.5                     | 33.44                         | 544                              | 9.2                         |
| 4                             | 76.1                  | 471.5                     | 33.11                         | 538                              | 9.1                         |
| 5                             | 80.3                  | 467.2                     | 33.22                         | 540                              | 8.8                         |
| <b>Media Aritmética</b>       | <b>78.5</b>           | <b>470.4</b>              | <b>33.41</b>                  | <b>543.2</b>                     | <b>8.94</b>                 |
| <b>Rango <math>\pm</math></b> | <b>1.76</b>           | <b>3.0</b>                | <b>0.325</b>                  | <b>5.40</b>                      | <b>0.240</b>                |

Las dimensiones de la probeta antes de realizado el ensayo fueron: diámetro de 8.9 mm y longitud entre marcas de 50 mm. El valor de dichos parámetros cuando la probeta ha sido fracturada fueron: diámetro de 8.03 mm y longitud entre marcas de 54.3 mm. Esto significa

que la deformación ingenieril en el instante de ruptura es de alrededor del 9% (ver tabla 2.1).

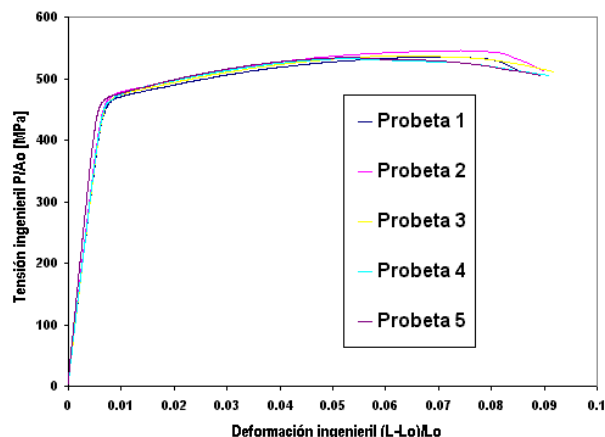


Figura 2.2. Tensión ingenieril versus deformación ingenieril

Para caracterizar el comportamiento del material frente a endurecimiento por deformación en la zona de estricción se procedió a registrar para otras cuatro probetas ensayadas la variación de la carga en función del diámetro instantáneo en el cuello. Estos datos permitieron obtener los parámetros involucrados en la función de endurecimiento potencial: tensión real versus deformación equivalente (Goicolea et al., 1996). La gráfica y la ecuación obtenida por medio de los experimentos se presentan en la figura 2.3. En la simulación numérica, se supuso que la superficie de fluencia queda definida por:

$$Y(\epsilon_p) = \sigma_{eq} \quad (2.1)$$

donde  $\sigma_{eq} = \sqrt{3J_2}$  con  $J_2 = \frac{1}{2} \tau' : \tau'$  siendo

$\tau'$  el tensor desviador de tensiones de Kirchhoff  $\tau$ . La función de endurecimiento  $Y$  viene dada por:

$$Y(\epsilon_p) = A^p \epsilon_{eq}^{n^p} \quad (2.2)$$

donde  $A^p=700.1$  MPa y  $n^p=0.09345$  son las constantes que se obtienen a través de la figura 2.3 y  $\epsilon_{eq}$  es la deformación uniaxial equivalente definida como:

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{E} + \epsilon_p \quad (2.3)$$

siendo  $E$  el módulo de Young y  $\epsilon_p$  la deformación plástica definida como  $\epsilon_p = -2 \ln(D/D_0)$  donde  $D$  y  $D_0$  son los diámetros instantáneo e inicial en el cuello respectivamente.

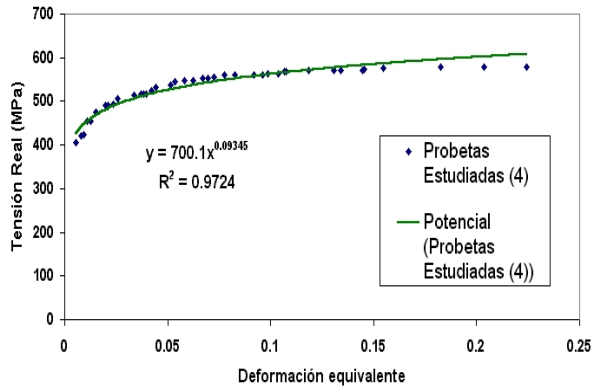


Figura 2.3. Tensión real versus deformación equivalente

### 3. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se enmarca en el contexto general de la termomecánica de los medios continuos (Malvern, 1969). La función de energía libre adoptada en este trabajo se supone definida en términos de las deformaciones total y plástica de Almansi y de la deformación plástica efectiva que caracteriza al endurecimiento. Detalles de este modelo así como de su discretización en el contexto del método de elementos finitos se encuentran en Celentano (1999).

#### 3.1. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DE CÁLCULO

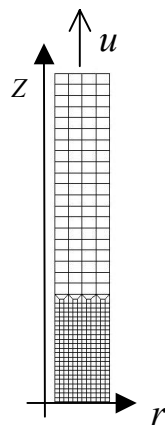


Figura 4.1. Malla de elementos finitos y condiciones de borde

La discretización espacial consta de una malla formada por 360 elementos axisimétricos cuadriláteros de cuatro nodos (ver figura 4.1). En el análisis numérico sólo se ha considerado un cuarto de la probeta debido a la simetría existente. Se observa que la malla utilizada tiene una distribución no uniforme de elementos siendo más fina en su parte inferior con el fin de simular en forma más precisa los elevados gradientes de las distintas variables que se esperan en esa zona.

### 3.2. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados experimentales y los obtenidos a través de la simulación numérica. En primera instancia se presenta en la figura 5.1 la variación del diámetro en la zona del cuello en función de la deformación ingenieril axial.

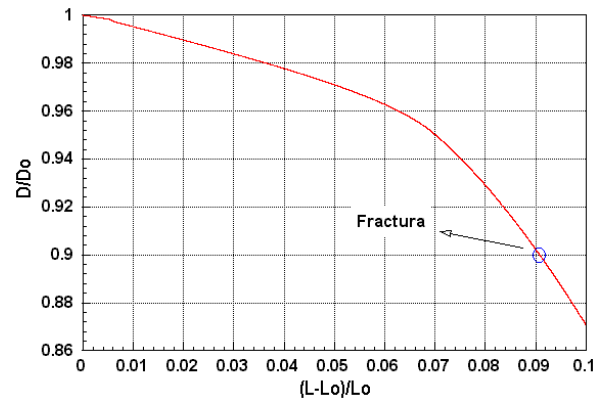


Figura 5.1. Relación de diámetros en la zona del cuello en función de la deformación ingenieril

La figura 5.2 presenta una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente para las cuatro probetas ensayadas de la figura 2.3 y la simulación numérica de la carga ( $P$ ) en función de la deformación logarítmica ( $\epsilon_{zz} = \epsilon_p$ ) en la sección del cuello. La figura 5.3 muestra la tensión axial media en dicha sección (calculada como  $P/A$ , donde  $A$  es el área instantánea en la zona del cuello) también en función de la deformación logarítmica.

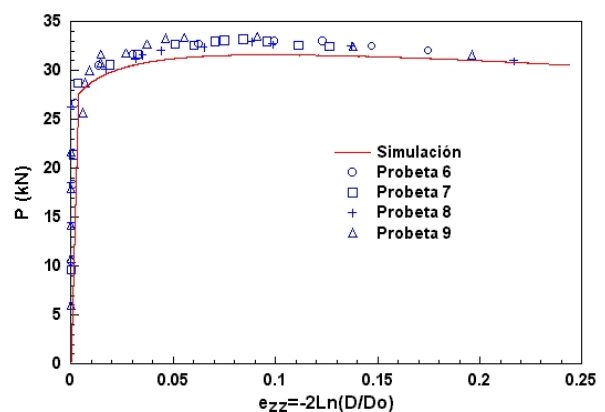


Figura 5.2. Carga en función de la deformación logarítmica en la sección del cuello

Con respecto a los resultados experimentales, se debe mencionar la notable reproducibilidad obtenida en los mismos. Este hecho se observa claramente en la poca dispersión que presentan los parámetros expuestos en la tabla 2.1. La reproducibilidad del comportamiento mecánico del material en el ensayo de tracción también

puede apreciarse en la figura 2.2. Estos resultados corresponden a la primera fase del trabajo cuyo objetivo fue la obtención de las propiedades mecánicas del material.

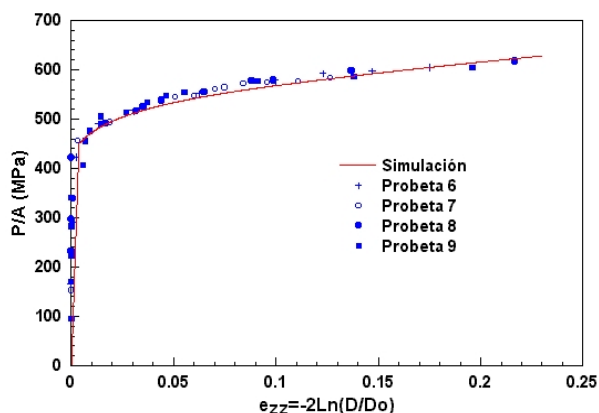


Figura 5.3. Tensión media en función de la deformación logarítmica en la sección del cuello

La segunda fase experimental consistió en la determinación de los parámetros de la ecuación constitutiva elastoplástica del material (ecuación (2.2)). Estos parámetros fueron obtenidos a través de la correlación potencial presentada en la figura 2.3. En ella se puede apreciar el buen ajuste entre los datos experimentales y la correlación que de ellos nace. La importancia de las constantes  $A^p$  y  $n^p$  radica en que ambas definen el comportamiento elastoplástico del material.

La comparación entre los datos experimentales y la simulación computacional se presenta en las figuras 5.2 y 5.3. De la primera, que muestra la carga ( $P$ ) versus la deformación plástica ( $e_{zz}$ ), se puede observar el buen ajuste obtenido entre los datos experimentales y la simulación, existiendo únicamente una diferencia en las cercanías de la carga máxima. Esta diferencia puede ser explicada por el hecho que la máquina del ensayo realiza un mayor trabajo que el calculado en la simulación a causa de la deformación plástica que se presenta en las zonas de la probeta que se encuentran fuera del análisis numérico (50mm). Se debe mencionar de todos modos que dicha diferencia es bastante pequeña ya que no supera el 5%.

En la figura 5.3 se presenta la tensión real versus la deformación logarítmica en la zona del cuello. Es posible visualizar la excelente concordancia entre los datos experimentales y la simulación computacional. Este comportamiento se explica debido al hecho que los parámetros constitutivos fueron obtenidos a partir de un gráfico similar al anterior (ver figura 2.3).

De ambos gráficos se visualiza que, aunque la carga decae levemente para grandes niveles de deformación, la tensión se tiende a mantener estable. Este hecho indica la casi inexistencia de inestabilidad geométrica

en este tipo de material. Se debe señalar también que el modelo constitutivo empleado no permite predecir la fractura de la probeta, es decir, los resultados obtenidos de la simulación tienen validez física hasta un nivel de deformación logarítmica de  $e_{zz} \approx 0.20$  aproximadamente.

Se realizó además un análisis fractográfico de la superficie de fractura de la probeta rota a tracción. Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL 5410 provisto de un sistema analizador por energía dispersiva de rayos X (EDAX). La imagen obtenida fue construida a través de electrones secundarios usando un potencial de aceleración de 25 KV.

En la figura 5.4.a se muestra el aspecto de la superficie de fractura a 500 aumentos de una de las probetas ensayadas. Es posible observar la presencia de cavidades en algunas zonas de la superficie lo que está de acuerdo con la naturaleza dúctil de la fractura. Dichas cavidades contienen partículas en su interior las que, de acuerdo a la teoría de fractura, deberían dar inicio a la formación de las mencionadas cavidades.

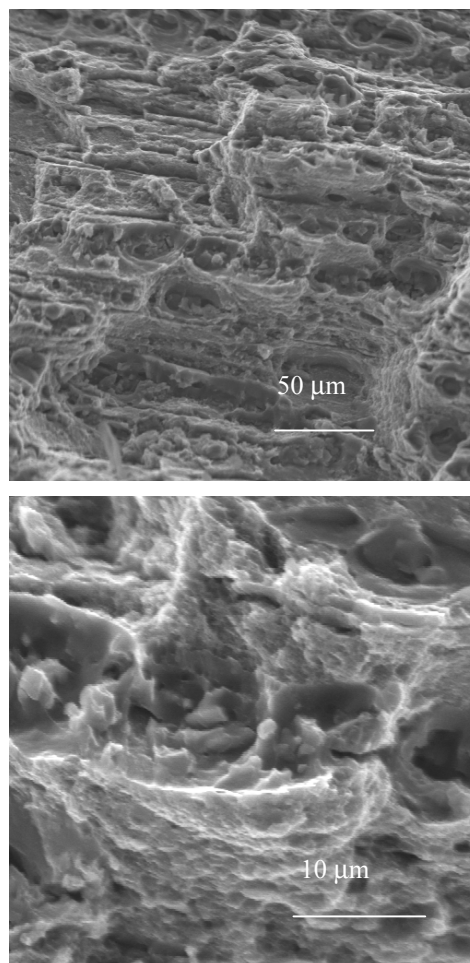
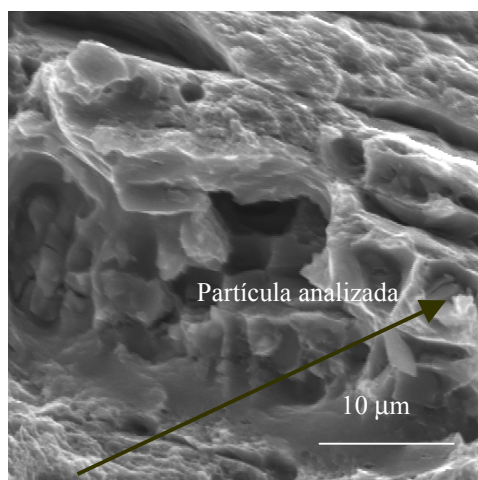


Figura 5.4. Imagen de MEB de la superficie de fractura: a) 500X y b) 2000X

En la figura 5.4.b se muestra el aspecto que presenta la superficie de fractura a 2000 aumentos pudiéndose identificar algunas partículas que originan las cavidades ya comentadas. Además, es clara la presencia de grietas que atraviesan el material.

En la figura 5.5.a se muestra otro aspecto de las superficie de fractura. Se puede detectar con claridad la presencia de una partícula que ha dado origen a una cavidad (zona derecha inferior). El análisis químico por energía dispersiva, tanto de la aleación global como de la partícula, se presenta en la figura 5.5.b. Es interesante destacar el alto contenido de hierro de la partícula (9,82%) con relación al existente en la aleación (1,24%). Las zonas claras presentes alrededor de las cavidades dan cuenta del desarrollo de una alta cantidad de deformación plástica antes de la rotura.



|     | Aleación | Partícula |
|-----|----------|-----------|
| %Mg | 3,24     | 1,22      |
| %Fe | 1,24     | 9,82      |

Figura 5.5. a) Imagen de MEB a 2000X de la aleación y b) análisis químico por EDAX de la aleación global y de una de las partículas

No obstante estas observaciones se debe destacar que este tipo de aleaciones de aluminio no es de las que mayor comportamiento dúctil presentan. De hecho, la cantidad de deformación a rotura determinada experimentalmente corresponde, tal como se comentó anteriormente, a sólo 9% aproximadamente. De esto se desprende la existencia de un cierto comportamiento frágil de la aleación aunque la fractura se produce predominantemente de manera dúctil a través del

mecanismo de nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un análisis experimental y numérico de la rotura a tracción de la aleación de aluminio 7075 T7351. Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento dúctil-frágil del material con preponderancia del primer mecanismo de rotura. La buena reproducibilidad observada ha permitido calibrar en buena forma el modelo constitutivo utilizado en la simulación. La validación experimental de los resultados del análisis numérico es satisfactoria permitiendo predecir acertadamente el estado de tensiones y deformaciones en la zona de estricción. Como línea de investigación futura se propone incluir en el modelo la descripción de los mecanismos generadores del fenómeno de fractura.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los soportes brindados por CONICYT (Proyecto N° 1990588), la Academia Politécnica Aeronáutica y DICYT-USACH para el desarrollo de este trabajo. Los autores también agradecen al Sr. Jaime Zenteno del Departamento de Ingeniería Mecánica de la USACH su valiosa colaboración en la fabricación de las probetas ensayadas en este trabajo.

#### 6. REFERENCIAS

1. Celentano D.: A FINITE ELEMENT FORMULATION FOR NONLINEAR COUPLED THERMOMECHANICAL PROBLEMS. *Proceedings of CanCNSM*, Victoria, Canadá (1999).
2. García C.: *ANÁLISIS NUMÉRICO DE SÓLIDOS SOMETIDOS A GRANDES DEFORMACIONES*. Tesis de Ingeniería de Ejecución en Mecánica, Universidad de Santiago de Chile (1999).
3. Goicolea, J.M., Gabaldón, F. y García C.: INTERPRETACIÓN DE LA ESTRICCIÓN EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN EMPLEANDO MODELOS HIPOELÁSTICOS E HIPERELÁSTICOS. *Actas del III Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, pp. 875-885, SEMNI (1996).
4. Malvern L.: *INTRODUCTION TO THE MECHANICS OF A CONTINUOUS MEDIUM*. Prentice-Hall Inc. (1969).