

**CRITERIOS PARA LA REALIZACION DE ENSAYOS DE TRACCION EN METALES A ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMACION****J. Rodríguez, M.A. Martínez, R. Cortés y V. Sánchez Gálvez****Departamento de Ciencia de Materiales. Universidad Politécnica de Madrid  
ETSI de Caminos, Canales, y Puertos. Ciudad Universitaria, s.n.  
28040-Madrid**

**Resumen.** En este trabajo se estudian los ensayos de tracción en barra Hopkinson para comprobar la validez de este método en la caracterización de materiales metálicos a velocidades de deformación del orden de  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Los campos de tensiones y deformaciones en el interior de la probeta se analizan mediante el método de los elementos finitos. La modelización numérica permite comprobar las hipótesis en las que se basa el ensayo: situación de equilibrio y deformación uniforme en la probeta. El proceso de simulación proporciona también algunos criterios para el diseño del equipo experimental y la geometría de la probeta.

**Abstract:** An experimental and numerical analysis of tensile tests in the Hopkinson bar is made to assess the suitability of this method to characterize metallic materials in tension conditions at strain rates about  $1000 \text{ s}^{-1}$ . The stress and strain fields that appear in the specimen are analyzed by the finite element method. This mathematical simulation of the test allows a check of the hypotheses normally used in obtaining results: equilibrium situation and uniform strain distribution in the specimen. The simulation process also provides some criteria to design the experimental set up and the specimen geometry for the best agreement with the ideal situation.

## 1. INTRODUCCION

El comportamiento mecánico de los materiales a altas velocidades de deformación es un área de gran interés, dado el número de aplicaciones industriales en las que los materiales se encuentran sometidos a estas condiciones. En la caracterización mecánica de materiales a altas velocidades de deformación surgen grandes dificultades de interpretación de los resultados experimentales, como consecuencia de la necesidad de considerar los efectos debidos a la propagación de ondas de tensión en el material.

En este sentido, el desarrollo de las técnicas experimentales basadas en la barra Hopkinson significó un gran avance en este área. Inicialmente, el dispositivo experimental de la barra Hopkinson se utilizó para realizar ensayos de compresión [1,2]. En estos ensayos, una pequeña probeta cilíndrica del material a ensayar se sitúa entre dos barras alargadas fabricadas en un material

de alto límite elástico, de forma que se garantice que van a permanecer en régimen elástico durante todo el ensayo. En esta situación, se acelera un proyectil (una tercera barra del mismo material) contra el sistema, generando una onda de compresión en el extremo la primera barra, que se propaga sin perturbarse hasta alcanzar la probeta, donde es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida a la segunda barra. Suponiendo que el estado de tensión en las barras es unidimensional y la deformación es uniforme en la probeta, puede determinarse la curva tensión-deformación del material. Pueden encontrarse abundantes resultados experimentales en la literatura [3 a 6]. Los esfuerzos dedicados a evaluar la influencia en los resultados del ensayo de factores como el rozamiento entre barras y probeta, efectos inerciales y de dispersión de ondas han sido numerosos [7 a 13]. El ensayo de compresión en la barra Hopkinson es reconocido en la actualidad como un método apropiado de caracterización dinámica de materiales.

Una gran cantidad de materiales se comporta de un modo diferente en tracción y compresión. Además, la influencia de la velocidad de deformación se manifiesta en muchas ocasiones en propiedades relacionada con el comportamiento en tracción, como por ejemplo la ductilidad. Por ello, resulta necesario disponer de algún método experimental que permita realizar ensayos de tracción a altas velocidades de deformación. Como consecuencia de los buenos resultados obtenidos con los ensayos de compresión en barra Hopkinson, se pensó en emplear también esta técnica para los ensayos de tracción. Los primeros intentos se sitúan en los años 60 y son debidos a Harding et al. [14]. La onda de tracción se genera mediante el impacto de un proyectil tubular que se acelera por medio de un cañón de aire comprimido. Las barras y la probeta se conectan mediante uniones roscadas. El sistema ha evolucionado en las últimas décadas y hoy en día es uno de los más utilizados, si bien existen otros métodos de tracción que se han desarrollado con pocas variaciones del diseño original de compresión [15,16].

Todos los ensayos en la barra Hopkinson se basan en dos hipótesis fundamentales: la probeta permanece siempre en un estado de equilibrio cuasiestático y la distribución de la deformación es uniforme. Estas dos hipótesis permiten utilizar los valores medios de tensión y deformación en la elaboración de la curva representativa del comportamiento del material. Sin

embargo, después del impacto, la onda de tensión necesita un cierto tiempo para recorrer la probeta y, al menos durante los primeros microsegundos la situación no corresponde al caso de un estado de equilibrio cuasiestático. Durante esta fase los resultados proporcionados por el ensayo no son representativos del comportamiento del material. Determinar el momento a partir del cual los resultados son aprovechables es un problema clave en este tipo de ensayos.

En este trabajo, se han realizado diferentes experimentos con un dispositivo de tracción en barra Hopkinson y sus correspondientes modelizaciones numéricas para facilitar la interpretación de los resultados experimentales. El proceso de simulación proporciona también un criterio de diseño para el ensayo que tiene en cuenta las propiedades del material, la geometría de la probeta y las características del dispositivo experimental.

2. TECNICA EXPERIMENTAL

El equipo experimental consiste básicamente en una probeta de tracción cilíndrica roscada a dos barras de acero de alta resistencia de 22 mm de diámetro y 1 m de longitud. En el extremo de la primera barra (incidente) se genera un pulso de tracción por medio del impacto de un proyectil tubular contra el extremo de una barra de carga, unida mecánicamente a la barra incidente. El equipo experimental se recoge en la figura 1.

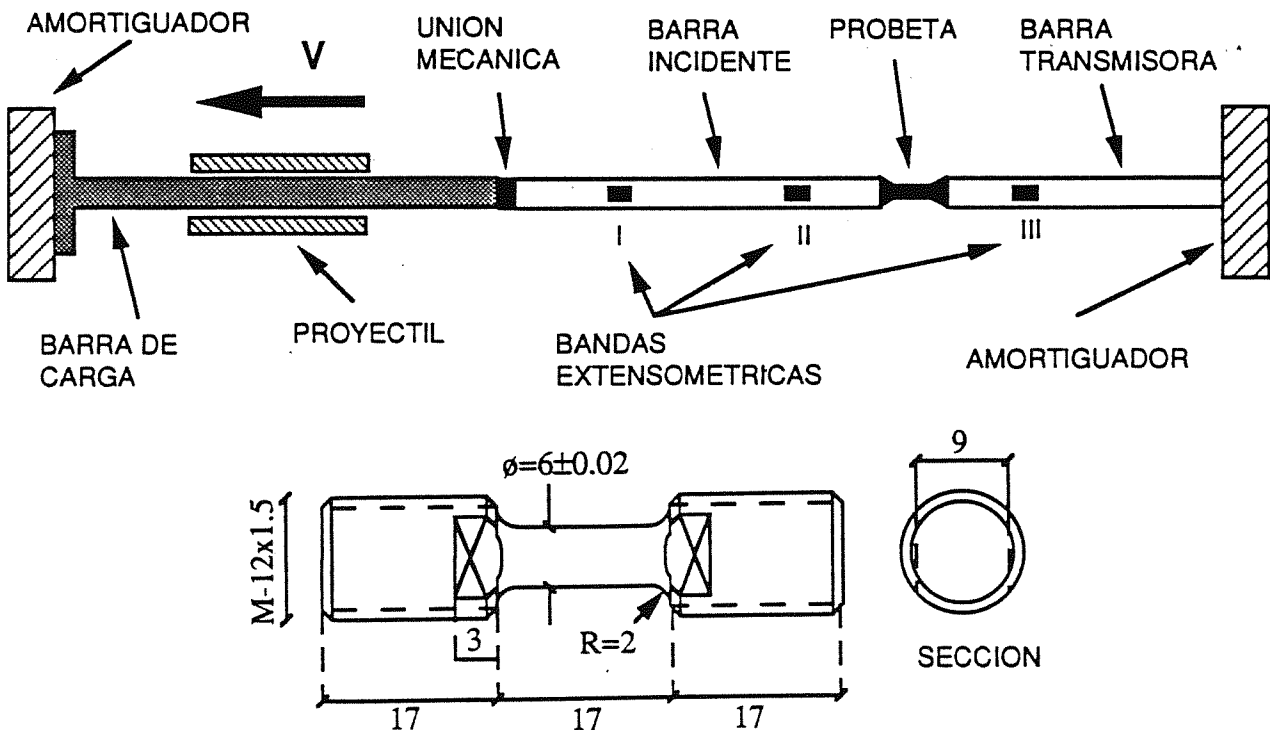


Fig.1. Dispositivo experimental y probeta (Dimensiones en mm)

La onda de tracción viaja a través de la barra incidente y se transmite a la segunda barra (transmisora) a través de la probeta. Ambas barras están fabricadas con el mismo material (acero Silver Steel) y se comportan elásticamente durante todo el ensayo. Para registrar las señales correspondientes a las ondas incidente, reflejada y transmitida se dispone de tres grupos de bandas extensométricas situadas como indica la figura 1.

La tensión en la probeta,  $S_s$ , se calcula dividiendo la fuerza transmitida a la segunda barra por la sección de la probeta,  $A_s$ ; la velocidad de deformación en la probeta,  $\dot{e}$ , se obtiene dividiendo la velocidad relativa de los extremos de las barras por la longitud del fuste y, finalmente, la deformación se calcula integrando la velocidad de deformación en el tiempo:

$$S_s = \frac{F_b}{A_s} = \sigma_{III}(t) \quad (1)$$

$$\dot{e} = \frac{(v_a - v_b)}{L_0} \quad (2)$$

$$e = \int_0^t \dot{e}(t) dt \quad (3)$$

Para determinar las velocidades y tensiones en los extremos de las barras, debe hacerse la hipótesis de propagación unidimensional y considerar los efectos de las ondas incidente, reflejada y transmitida en los puntos de medida:

$$v_a(t) = \frac{\sigma_I(t) + [\sigma_I(t+T_1) - \sigma_{II}(t+T_1)]}{\rho c} \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \rho c v_b(t) = \sigma_{III}(t) \quad (5)$$

Resultados experimentales.

Se dispone de resultados experimentales en diferentes materiales: Al 7017 T73, Al 5083 y Al 2618 + 15% vol. SiC. Las curvas tensión-deformación obtenidas se resumen en la figura 2.

El proceso de modelización se centró en el material Al 7017 T73, cuyas propiedades son poco sensibles a la velocidad de deformación, facilitando la comparación entre resultados estáticos y dinámicos. Para validar los resultados numéricos se completaron los resultados de la figura 2 con una serie de ensayos estáticos que confirmaron que la aleación Al 7017 T73 tiene un comportamiento que puede considerarse independiente de la velocidad de deformación. Además, se realizaron varios ensayos en los que se instalaron bandas

extensométricas en el fuste de las probetas para comparar los valores reales de la deformación y el valor medio determinado a través del método descrito en las ecuaciones (1) a (5). La figura 3 muestra el resultado de esta comparación. A la vista de la figura resulta evidente que la probeta no está sometida a un proceso de deformación uniforme y deben añadirse correcciones al método usual.

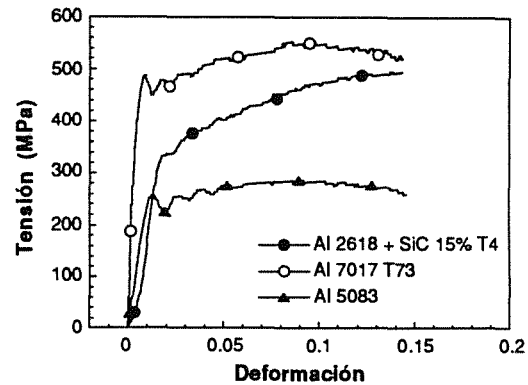


Fig. 2. Resultados experimentales

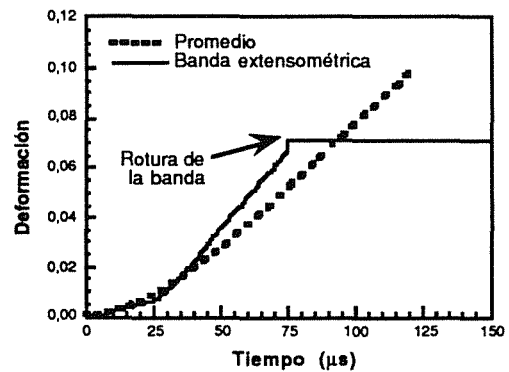


Fig.3. Medidas experimentales de deformación

**3. SIMULACION NUMERICA**

La simulación numérica del ensayo se realizó con la ayuda del programa comercial de elementos finitos ABAQUS [19]. En una primera aproximación se modelizó la probeta completa, pero análisis posteriores demostraron que los resultados eran muy similares si se limitaba el estudio a la zona de la probeta que quedaba fuera de la unión roscada con las barras. Este fue la opción finalmente elegida. La malla de elementos finitos consta de 937 nodos y 276 cuadriláteros de 8 nodos cada uno. Debido a la simetría del problema sólo se modelizó la mitad de la probeta. Para el material se empleó un modelo bilineal elastoplástico e independiente de la velocidad de deformación con módulo de Young de 71 GPa, coeficiente de Poisson de 0.33 y densidad 2700

kg/cm<sup>3</sup>. El límite elástico se consideró igual a 500 MPa, y la pendiente de la curva tensión-deformación en la zona plástica igual a 0.62 GPa. Como condición de carga se aplicó un pulso trapezoidal de velocidades a uno de los extremos de la probeta. Las características del pulso fueron: máximo valor 14 m/s, duración 220  $\mu$ s, período de crecimiento 60  $\mu$ s y de decrecimiento 40  $\mu$ s (figura 4). Esta condición de carga corresponde a la registrada experimentalmente en los ensayos.

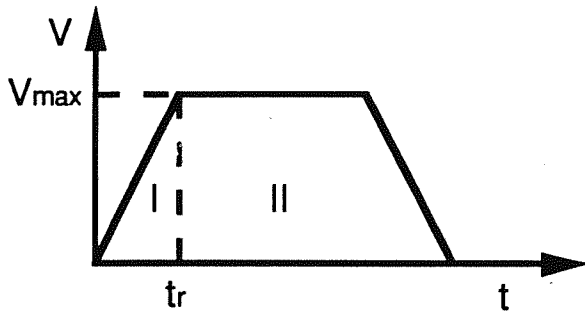


Fig.4. Condiciones de carga

Como muestra de la calidad de la modelización, en la figura 5 se comparan resultados numéricos y experimentales. El acuerdo puede considerarse bueno hasta el inicio de la estricción en la probeta.

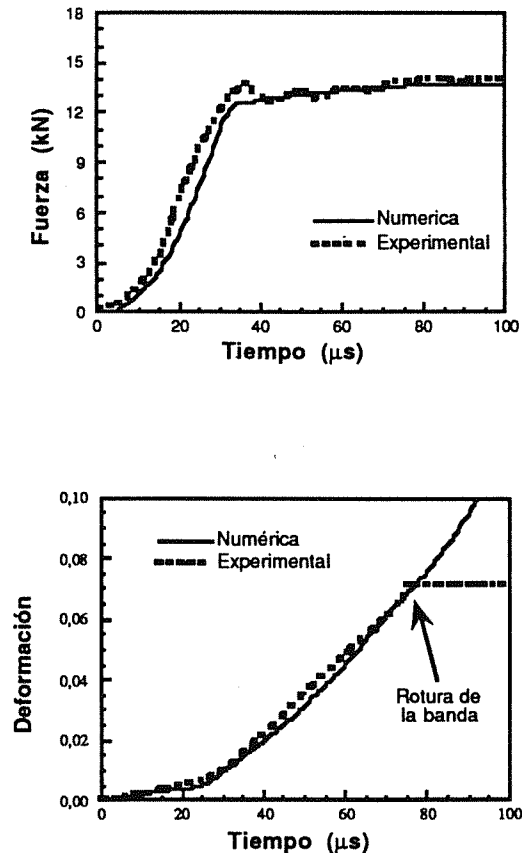


Fig.5. Validación de la simulación numérica

#### Resultados de la simulación numérica.

##### - Equilibrio.

La determinación del tiempo necesario para que la probeta alcance un estado de equilibrio cuasiestático, puede basarse en la comparación del campo de tensiones correspondiente a un ensayo a alta velocidad de deformación con el de un ensayo estático (figura 6).

La distribución de tensión en este último caso es simétrica respecto al centro de la probeta y no puede distinguirse en cuál de los dos extremos se ha aplicado la carga: la probeta está en equilibrio. En el ensayo dinámico la situación es diferente. A los 5 y 10  $\mu$ s, el campo de tensiones no es simétrico y carece de sentido hablar de tensión media en la probeta. Cuando se alcanzan los 15  $\mu$ s el proceso ha evolucionado y el campo de tensiones es similar al del ensayo estático. A partir de este instante, la tensión en la probeta puede calcularse directamente a través de la fuerza medida en las barras.

Teniendo en cuenta que 60  $\mu$ s es un periodo de crecimiento un poco largo para la onda de tensión, se ha repetido el análisis numérico con dos tiempos más cortos: 40 y 20  $\mu$ s (las dificultades experimentales asociadas a 20  $\mu$ s son mucho mayores). El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio no varía y la única diferencia es, obviamente, el valor de la tensión en la probeta. Este resultado es lógico, si se supone que el equilibrio se alcanzará después de algunas reflexiones de ondas elásticas de tensión en la probeta. Esta última afirmación se confirma con un análisis de una probeta de mayor longitud.

##### - Deformación uniforme.

Los resultados experimentales muestran discrepancias importantes entre la deformación media calculada por el método tradicional y la deformación medida directamente en la probeta (figura 3). Este hecho se constata también en la simulación numérica, en la que se analizó la distribución de la deformación en distintos instantes. En la figura 7 se presentan las distribuciones correspondientes a 30  $\mu$ s (régimen elástico) y 60  $\mu$ s (régimen plástico). Como puede observarse, durante el régimen elástico, la deformación en el fuste de la probeta es casi uniforme, aunque también los acuerdos con las roscas se están deformando. Por el contrario, durante el régimen plástico aparecen importantes diferencias entre las deformaciones en la zona central y en los acuerdos con las roscas. Esta situación no se altera hasta que comienza la estricción de la probeta, concentrándose, a partir de entonces, la deformación en torno al cuello de estricción.

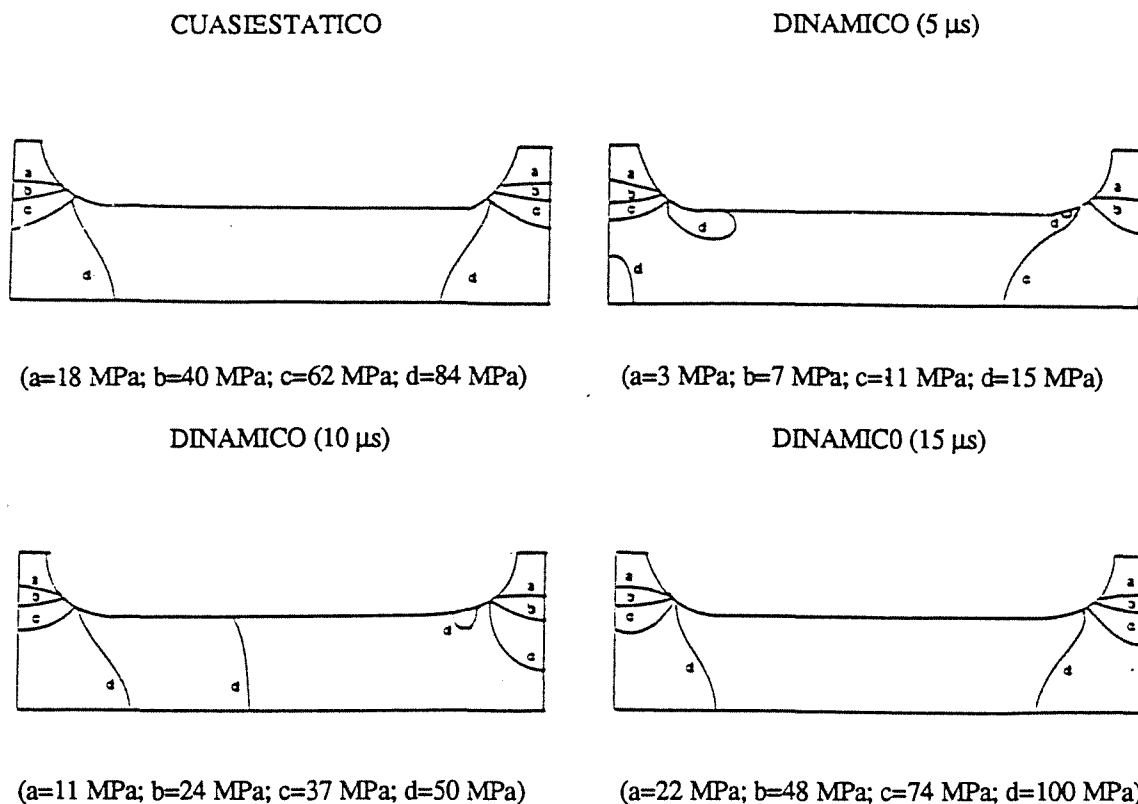


Fig.6. Contornos de tensión

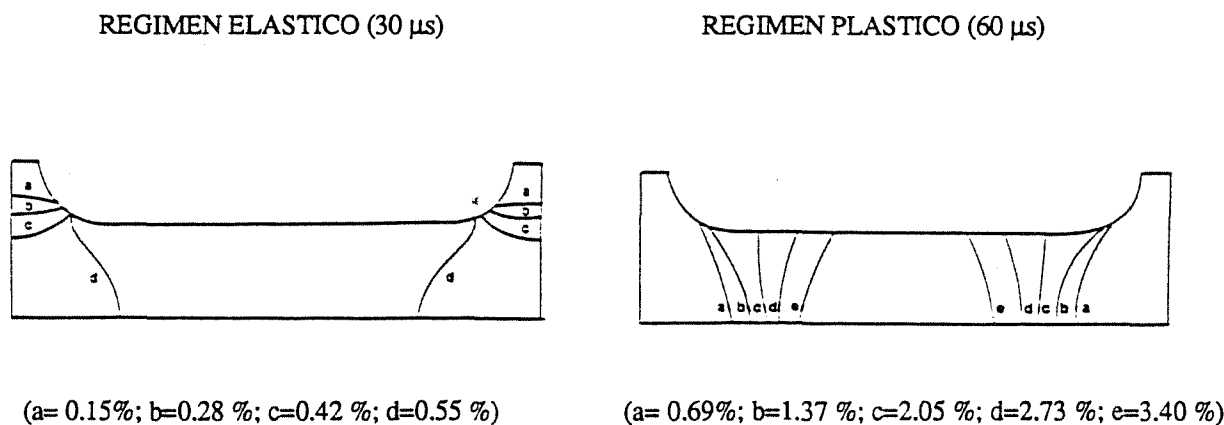


Fig. 7. Contornos de deformación

4. DISCUSION.

En los análisis numéricos realizados, la situación de equilibrio cuasiestático se alcanza mucho antes de que el material plastifique y, por tanto, los valores determinados del límite elástico son representativos del comportamiento del material. Si, por el contrario, el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio,  $t_e$ , fuera superior al del comienzo del flujo plástico los resultados no serían utilizables. Este tiempo,  $t_e$ , parece depender únicamente de la longitud de la probeta y de la velocidad de las ondas elásticas longitudinales,  $c$ , en el material:

$$t_e = \frac{n L_0}{c} \quad (6)$$

donde  $n$  es una constante y  $L_0$  la distancia entre los extremos de las barras (no es el fuste de la probeta). De los resultados numéricos,  $n = 5$  es un valor que garantiza la condición. Ahora debe compararse este valor de  $t_e$  con el tiempo que necesita el material para plastificar.

Las condiciones de carga se aplicaron como un perfil trapezoidal de velocidades (figura 4). En la zona I, la velocidad,  $v$ , puede expresarse como:

$$v = \frac{v_{max}}{t_r} t \quad (7)$$

donde  $v_{max}$  es la máxima velocidad y  $t_r$  el tiempo de crecimiento. El extremo de la probeta experimenta un

movimiento uniformemente acelerado, cuya aceleración es  $v_{max}/t_r$ . De un modo similar, en la zona II el movimiento es uniforme con velocidad  $v_{max}$ . De acuerdo con esto, la elongación en la probeta es

$$\Delta L = \frac{1}{2} a t^2 \quad (t \leq t_r) \quad (8)$$

$$\Delta L = \frac{1}{2} a t_r^2 + v_{max} (t - t_r) \quad (t > t_r) \quad (9)$$

Por otra parte, la elongación correspondiente al límite elástico es:

$$\Delta L_y = \frac{\sigma_y}{E} l_0 \quad (10)$$

donde  $\sigma_y$ ,  $E$  y  $l_0$  son el límite elástico, el módulo de Young y la longitud del fuste de la probeta.

Combinando las ecuaciones (8), (9) y (10) se obtiene el tiempo correspondiente al límite elástico:

$$t_y = \sqrt{\frac{2 \sigma_y l_r}{E \dot{\epsilon}_{max}}} \quad \text{si } t_y \leq t_r \quad (11)$$

$$t_y = \frac{\sigma_y}{E \dot{\epsilon}_{max}} + \frac{1}{2} t_r \quad \text{si } t_y > t_r \quad (12)$$

donde  $\dot{\epsilon}_{max}$  es el máximo valor de la velocidad de deformación durante el ensayo.

Los valores del límite elástico tendrán sentido si se verifica la condición  $t_e \leq t_y$ , que proporciona el siguiente criterio para el diseño de la probeta:

$$l_0 < \frac{\sqrt{2}}{5} \sqrt{\frac{\sigma_y l_r}{k^2 \rho \dot{\epsilon}_{max}}} \quad \text{si } t_y \leq t_r \quad (13)$$

$$l_0 < \frac{\sigma_y}{5 k \sqrt{\rho E \dot{\epsilon}_{max}}} + \frac{t_r}{10k} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{if } t_y > t_r \quad [14]$$

donde  $k = L_0/l_0$  es un parámetro geométrico y  $\rho$  la densidad. Este criterio, que garantiza el equilibrio en el momento de la plastificación, considera las propiedades del material ( $\sigma_y$  y  $\rho$ ), la geometría de la probeta ( $k$  and  $l_0$ ) y las características del dispositivo experimental ( $t_r$ ,  $\dot{\epsilon}_{max}$ ).

Aunque, esta es una condición necesaria, no asegura que en el momento de plastificar el material se esté deformando a una alta velocidad de deformación. De acuerdo con la figura 4:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_0} = \frac{v_{max}}{t_r l_0} t = \frac{\dot{\epsilon}_{max}}{t_r} t \quad \text{if } t \leq t_r \quad (15)$$

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{max} \quad \text{if } t > t_r \quad (16)$$

Cuando el material plastifica ( $t = t_y$ ):

$$\dot{\epsilon}(t_y) = \dot{\epsilon}_{max} \frac{t_y}{t_r} \quad \text{o bien} \quad \frac{\dot{\epsilon}(t_y)}{\dot{\epsilon}_{max}} = \frac{t_y}{t_r} \quad (17)$$

Definiendo un parámetro P como:

$$P = \frac{\dot{\epsilon}(t_y)}{\dot{\epsilon}_{max}} \quad (18)$$

donde el valor de  $P = t_y / t_r$  depende de cada dispositivo experimental. A partir de la ecuación (11) resulta:

$$t_r = \frac{2 \sigma_y}{E \dot{\epsilon}_{max} P^2} \quad (19)$$

La situación ideal será  $P=1$ , aunque dificultades experimentales pueden justificar otros valores de P, dado que normalmente la influencia de la velocidad de deformación se manifiesta en cambios superiores a un orden de magnitud.

En cuanto a la hipótesis de deformación uniforme, el análisis numérico y las observaciones experimentales han demostrado que no está de acuerdo en absoluto con la realidad. Sería, por tanto, necesario aplicar algún tipo de corrección que permitiera calcular la deformación real del material. Una posibilidad puede ser utilizar una longitud efectiva de probeta. Esta longitud podría interpretarse como la longitud de una probeta que con la misma elongación se deformara uniformemente. Esta magnitud puede determinarse mediante una modelización por elementos finitos. En el caso de las probetas de la aleación Al 7017 T73 analizado en este trabajo, se obtuvo una longitud efectiva de 9 mm, frente a los 13 mm de longitud del fuste de las probetas. El resultado de comparar la deformación en la zona central del fuste con la calculada usando esta longitud efectiva se recoge en la figura 8.

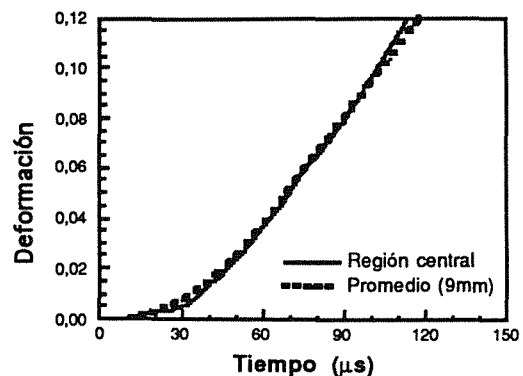


Fig.8. Valores numéricos de la deformación

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un detallado análisis numérico del ensayo de tracción a altas velocidades de deformación basado en la barra Hopkinson. Los resultados de la modelización numérica junto con las observaciones experimentales permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Las probetas empleadas en los experimentos alcanzan un estado de equilibrio cuasiestático antes de que se produzca la plastificación y proporcionan, por tanto, valores del límite elástico representativos del comportamiento del material. Dado que el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio depende de las propiedades del material, geometría de las probetas y características del dispositivo experimental, se ha propuesto un criterio para el diseño de los ensayos, que garantiza la obtención de resultados válidos.

- La hipótesis de deformación uniforme no está de acuerdo con las observaciones experimentales. Para soslayar esta dificultad se ha definido una longitud efectiva para las probetas que permite calcular la deformación real que experimenta el material.

**Agradecimientos.** Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por la financiación aportada para la realización de esta investigación (proyecto MAT92-0086).

## 6. REFERENCIAS

- [1] H. Kolsky (1949), "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading". Proc. R. Soc. B, Vol 62, 676.
- [2] R.M. Davies (1948), "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", Phil. Trans. A, Vol 240, 375.
- [3] U.S. Lindholm and L.M. Yeakley (1965), "Dynamic Deformation of Single and Polycrystalline Aluminium", J. Mech. Phys. Solids, Vol 13, pp 41 to 53.
- [4] G.L. Wulf (1979), "High Strain Rate Compression of Titanium and some Titanium Alloys", Int. J. Mech. Sci., Vol. 21, p 713 .
- [5] A.J. Holzer y R.H. Brown (1979), "Mechanical Behaviour of Metals in Dynamic Compression " J. Eng. Mat. Tech., Vol. 101, pp 238 to 247.
- [6] J. Lankford (1981), "Temperature-Strain Rate Dependence of Compressive Strength and Damage Mechanisms in Aluminum Oxide", J. Mat. Sci., Vol 16, p 1567.
- [7] P.S. Follansbee y C. Frantz (1983), "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar ", J. Eng. Mat. and Tech., Vol 105. pp 61 to 66.
- [8] J.C. Gong, L.E. Malvern y D.A. Jenkins (1990), "Dispersion Investigation in the Split Hopkinson Pressure Bar ", J. Eng. Mat. and Tech., Vol 112. pp 309 to 314.
- [9] E.D.H. Davies and S.C. Hunter (1963), "The Dynamic Compression Testing of Solids by the Method of the Split Hopkinson Pressure Bar ", J. Mech. Phys. Solids., Vol 11, p 155.
- [10] S. K. Samanta (1971), J. Mech. Phys. Solids 19, p 117.
- [11] J.Z. Malinowski and J.R. Klepaczko (1986), "A Unified Analytic and Numerical Approach to Specimen Behaviour in the Split Hopkinson Pressure Bar ", Int. J. Mech. Sci., Vol 28. No.6. pp 381 to 391.
- [12] L.D. Bertholf and C.H. Karnes (1975), "Two-dimensional Analysis of the Split Hopkinson Pressure Bar System", J. Mech. Phys. Solids, Vol.23, pp 1 to 19.
- [13] Rodríguez, J., "Análisis y Desarrollo de Metodologías para la Obtención de Propiedades mecánicas de materiales a Altas Velocidades de Deformación y a Alta Temperatura", PhD Thesis, Universidad Complutense de Madrid, 1993.
- [14] J. Harding, E.D. Wood y J.D. Campbell (1960), "Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain", J. Mech. Eng. Sci., Vol 2, pp 88 to 96.
- [15] U.S. Lindholm y L.M. Yeakley (1968), "High Strain Rate Testing: Tension and Compression", Exp. Mech., Vol 8, pp 1 to 9.
- [16] T. Nicholas (1980), "Dynamic Tensile Testing of Structural Materials using a Split Hopkinson Bar Apparatus ", Technical Report AFWAL-TR-80-4053.
- [17] W. Johnson (1972), "Impact Strength of Materials" , Edward Arnold Publish. Co. London.
- [18] J. Duffy (1980) en J. Harding Ed., "Mechanical Properties at High Rates of Strain", Institute of Physics, London.
- [19] ABAQUS MANUAL (1989), Hibbitt, Karlsson & Sorensen Company. USA.