

ANÁLISIS NUMÉRICO DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DINÁMICA SOBRE MATERIALES DÚCTILES

J. A. Loya, J. Fernández-Sáez y C. Navarro

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid
Avda de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid.

Resumen. En este trabajo se presentan resultados preliminares de la simulación numérica, realizada por el método de los Elementos Finitos, de ensayos de tracción, estáticos y dinámicos, sobre probetas cilíndricas con entallas laterales de materiales cuyo mecanismo de rotura es predominantemente dúctil. El objetivo fundamental es analizar la influencia de la velocidad de deformación y de los fenómenos de endurecimiento del material, por deformación y velocidad de deformación, así como de la triaxialidad del campo tensional, en la rotura de este tipo de materiales. Se han considerado diferentes geometrías de la entalla y diferentes valores de los parámetros que caracterizan el comportamiento viscoplástico del material. Para analizar la influencia de los efectos antes citados, se utiliza el modelo micromecánico de daño dúctil de Rice y Tracey.

Abstract. In this work, results of the numerical simulation of both static and dynamic tensile test on cylindrical notched specimens have been presented. The main purpose is to analyse the influence of different effects (strain rate, strain hardening, strain rate hardening and triaxiality) in the fracture behaviour of ductile materials. The numerical analysis has been carried out using the Finite Element Method. Different notch geometry and several parameters characterising the material behaviour have been considered. To quantify the influence of the cited effects, the Rice and Tracey micro-mechanical ductile damage has been used.

1.- INTRODUCCIÓN

En condiciones estáticas, es un hecho bien conocido que la deformación de fractura de un material dúctil, no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de la triaxialidad del estado tensional [1,2], evaluada ésta como cociente entre la tensión hidrostática, σ_H y la tensión equivalente de Von Mises, σ_e . Los resultados de ensayos de tracción sobre probetas cilíndricas con diferentes entallas laterales de perfil circular, con las que se consiguen campos tensionales con distinta triaxialidad, ponen de manifiesto que la deformación de rotura disminuye cuando aumenta la triaxialidad del campo tensional [1,2]. Este resultado puede explicarse aplicando un modelo micromecánico simple de daño dúctil, como el de Rice y Tracey [3], u otros más complejos como el de Gurson [4] (posteriormente modificado por Tvergaard y Needleman [5]), el de Rousselier [6], o los basados en la teoría de Mecánica del Daño [7]. En condiciones dinámicas, aunque hay algunos estudios como el de Roudier y Francois [8] o el de Achenbach *et al.* [9], existe menos información sobre el comportamiento en fractura de materiales dúctiles.

En este trabajo se presentan resultados preliminares de la simulación numérica, realizada mediante el método de Elementos Finitos, de ensayos de tracción, estáticos y dinámicos, sobre probetas cilíndricas con entallas laterales de materiales dúctiles, con objeto de analizar la influencia de la velocidad de deformación y los fenómenos de endurecimiento, por deformación y velocidad de deformación, así como la triaxialidad del campo tensional, en la rotura de este tipo de materiales.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS SIMULADOS

Se han simulado dos tipos distintos de ensayos de tracción: uno, estático, que se realiza en una máquina universal de ensayos, y otro, dinámico, que se lleva a cabo en una barra Hopkinson. En este último caso, la probeta se coloca entre dos barras cilíndricas (incidente y transmisora) de sección circular como se indica en la figura 1. El estado de carga se provoca generando una onda de tracción mediante el choque de un tubo concéntrico (proyector) con la barra incidente contra un tope situado al final de ésta.

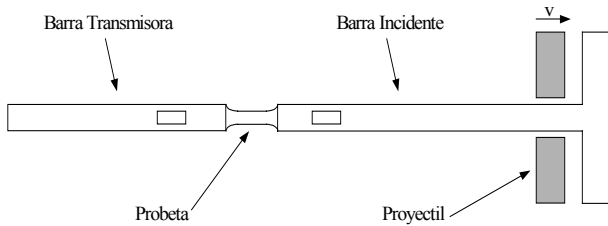


Fig. 1. Esquema del ensayo de tracción en barra Hopkinson.

Se han estudiado probetas cilíndricas entalladas lateralmente con tres tipos diferentes de entalla (ver figura 2), dos de perfil circular y distinto radio de curvatura (tipos A y B), y una con entalla aguda (tipo C). Los tres tipos de probetas tienen el mismo diámetro en el fuste (5 mm) y en el cuello de la entalla (4 mm). Variando la geometría de la entalla se inducen campos de tensiones en el cuello de la misma con distinta triaxialidad.

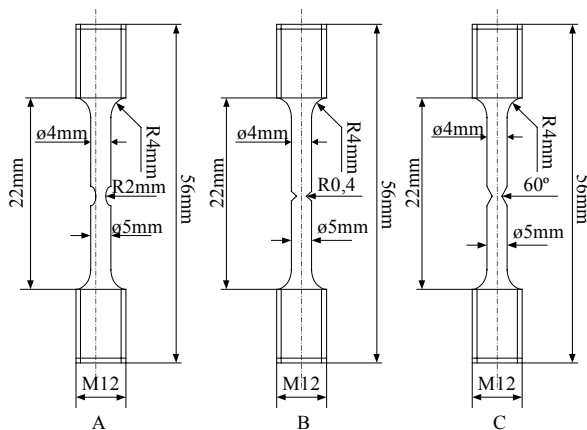


Fig. 2. Geometría y dimensiones de las probetas usadas en la simulación.

3. MODELO NUMÉRICO

Las simulaciones numéricas de los distintos ensayos se han llevado a cabo por el método de los Elementos Finitos, usando el programa comercial ABAQUS [10]. En el análisis se han tenido en cuenta las grandes deformaciones que se pueden desarrollar en algunos elementos de la probeta. Las mallas empleadas están compuestas, esencialmente, por elementos axisimétricos de cuatro nodos con un punto de integración por elemento.

Para simular el ensayo estático, y debido a la simetría de revolución del problema, se ha modelizado únicamente un cuarto de probeta, (1100 a 1176 elementos, según la geometría), en la que se ha impuesto las correspondientes condiciones de simetría, tanto en el cuello de la entalla, como en el eje longitudinal de la probeta. Como condición de carga se ha impuesto en los nudos del extremo de la probeta un desplazamiento de

1 mm en la dirección de su eje longitudinal. En el ensayo en barra Hopkinson, se ha modelizado tanto la mitad de la probeta (entre 2200 y 2352 elementos según la geometría) como la mitad de las barras incidente y transmisora (3996 elementos). Como condición de contorno se ha impuesto a los nudos del extremo de la barra incidente una velocidad constante, en la dirección de su eje longitudinal, de 10 m/s durante 100 μ s, y nula a partir de ese instante y hasta el final de la simulación. En las figuras 3, 4 y 5 se muestran detalles de las mallas utilizadas en la zona de las entallas

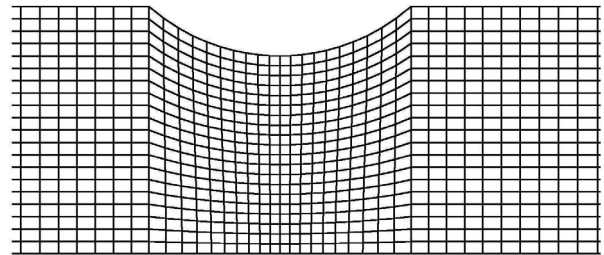


Fig. 3. Detalle de la entalla de la probeta tipo A

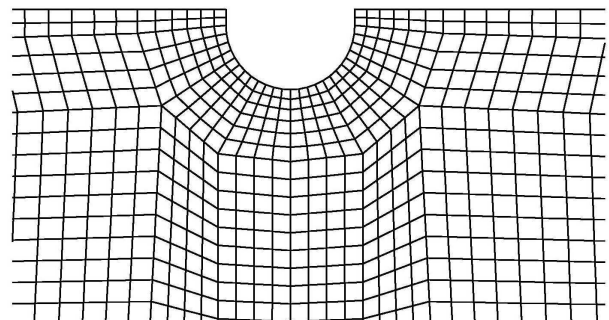


Fig. 4. Detalle de la entalla de la probeta tipo B

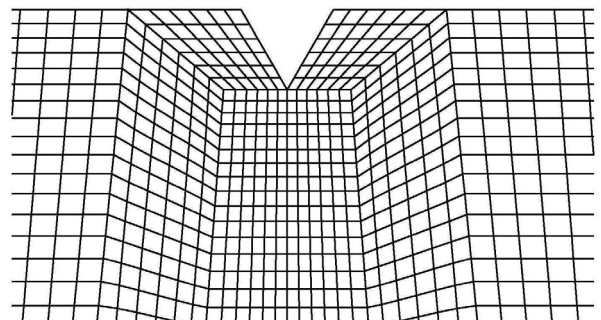


Fig. 5. Detalle de la entalla de la probeta tipo C

En la figura 6, aparece un detalle de la malla en la zona de unión de la probeta a una de las barras. Como puede observarse, en esta zona se han utilizado, además, elementos axisimétricos de tres nodos y un punto de integración por elemento para realizar la transición entre zonas de mallado con elementos de distinto tamaño.

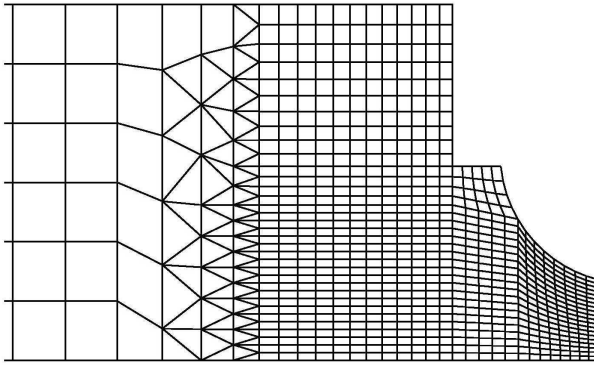


Fig. 6. Detalle de acople probeta-barras

El comportamiento del material se ha modelizado a través de la siguiente ley constitutiva:

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon_e \quad \sigma_e < \sigma_y \quad (1)$$

$$\sigma_e = k \cdot \varepsilon_p^n \cdot \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{H} \right)^m \right) \quad \sigma_e > \sigma_y \quad (2)$$

σ_e y ε_e son la tensión y la deformación equivalente de Von Mises, respectivamente, ε_p es la deformación plástica equivalente y $\dot{\varepsilon}_p$ la velocidad de deformación plástica equivalente. E es el módulo de elasticidad del material, σ_y el límite elástico y k y H son constantes características del material. En la simulación realizada, los citados parámetros han tomado los siguientes valores: $E = 210$ GPa, $\sigma_y = 570$ MPa, $k = 1586$ y $H = 3764$. Además, se ha tomado para el coeficiente de Poisson, ν , y la densidad del material, ρ , los valores de 0,3 y 7850 kg/m³, respectivamente. En cuanto a los parámetros n y m , se han considerado dos valores para cada uno de ellos, como se indica en la tabla 1, en la que se resumen los distintos casos simulados. Los que aparecen citados como 1E y 2E corresponden a ensayos estáticos, y el resto a ensayos dinámicos.

Tabla 1. Resumen de los casos simulados

Caso	n	m
1E	0,15	--
2E	0,20	--
1D	0,15	0,52
2D	0,15	1,25
3D	0,20	0,52
4D	0,20	1,25

Se ha supuesto que el material de las barras tiene un comportamiento elástico lineal con el mismo módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y densidad que el material de las probetas.

Se considera que el material presenta un mecanismo de rotura predominantemente dúctil, es decir, el proceso de fractura es consecuencia de la nucleación, crecimiento y coalescencia de microvacíos. Rice y Tracey [3] propusieron un modelo simple para calcular la evolución del radio medio de una cavidad, R , inicialmente esférica de radio R_0 , sometida a un campo de tensiones tridimensional. Según este modelo, el radio medio de una cavidad en cualquier instante se puede obtener mediante [3]:

$$\ln \frac{R}{R_0} = \int_0^{\varepsilon_p} 0,283 \exp \left(\frac{3\sigma_H}{2\sigma_e} \right) d\varepsilon_p \quad (3)$$

Usando este modelo micromecánico de fractura dúctil, se puede definir una variable de daño, D , como:

$$D = \ln \frac{R}{R_0} \quad (4)$$

Para relacionar esta variable micromecánica con variables macroscópicas medibles en los ensayos simulados, se hace la hipótesis de que la rotura de la probeta tiene lugar cuando la variable de daño alcanza un valor crítico, el cual se supone independiente de la triaxialidad del campo tensional y de la velocidad de deformación. Así pues, si se prescribe un cierto valor de daño crítico, a partir de la reducción de diámetro correspondiente al instante en el que se alcanza el citado valor crítico, se puede evaluar la deformación de fractura, la cual puede usarse como índice de la ductilidad del material en esas condiciones.

4. RESULTADOS

De los resultados que se pueden obtener de la simulación numérica, aquí se analizan exclusivamente aquellos que sirven para cumplir el objetivo de este trabajo. Por consiguiente, en las sucesivas figuras se presentará la evolución de la variable daño máximo (que se alcanza, en todos los casos analizados, en el elemento del cuello de la entalla más alejado del eje longitudinal de la probeta) frente a la reducción porcentual del diámetro de la entalla, es decir:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_0 - \phi_a}{\phi_0} \times 100 \quad (5)$$

donde ϕ_0 es el diámetro inicial del cuello, y ϕ_a es el alcanzado en un instante determinado.

La figura 7 recoge los resultados correspondientes a los casos de la probeta tipo A. En ella se observa, que para reducciones de diámetro inferiores al 10% (máxima reducción que se consigue en el ensayo dinámico simulado), no hay diferencia entre los diferentes casos

analizados, es decir, suponiendo, como ya se ha indicado, que la rotura se produce cuando la variable de daño alcanza un valor crítico, la deformación de fractura no se vería afectada por los valores de n y m , y sería la misma en condiciones estáticas y dinámicas. Para reducciones del diámetro por encima del 16% se observa que cuando aumenta el coeficiente de endurecimiento por deformación del material, n , aumenta la ductilidad.

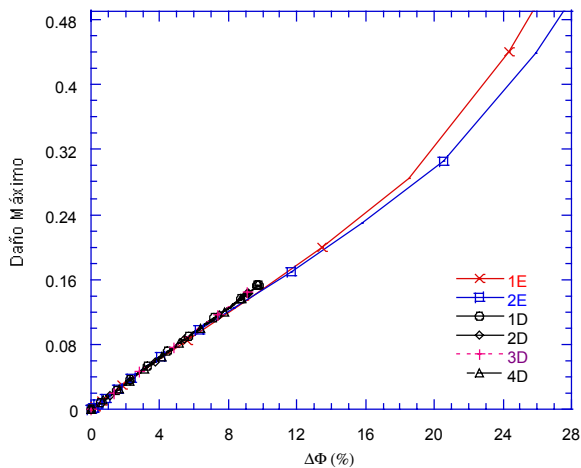


Fig. 7. Resultados correspondientes a la probeta tipo A.

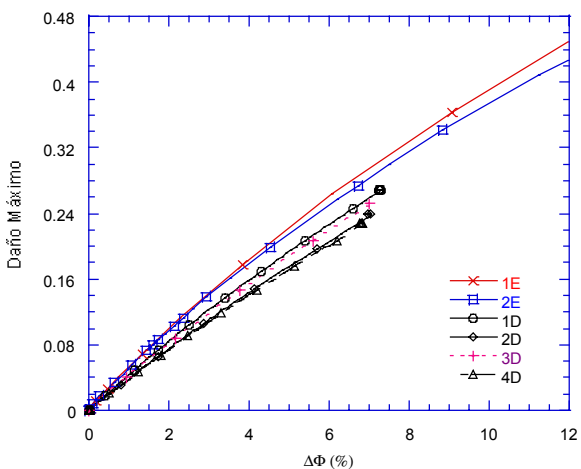


Fig. 8. Resultados correspondientes a la probeta tipo B.

Para las probetas tipo B (figura 8) y tipo C (figura 9), que presentan un coeficiente de triaxialidad creciente, se observa una disminución de la deformación de fractura a medida que aumenta la triaxialidad (se alcanzan los mismos valores de daño máximo con menores reducciones de diámetro).

Además se observa que en condiciones dinámicas se pueden alcanzar reducciones de diámetro mayores para los mismos valores de daño máximo, es decir, la velocidad de deformación tiende a aumentar la ductilidad.

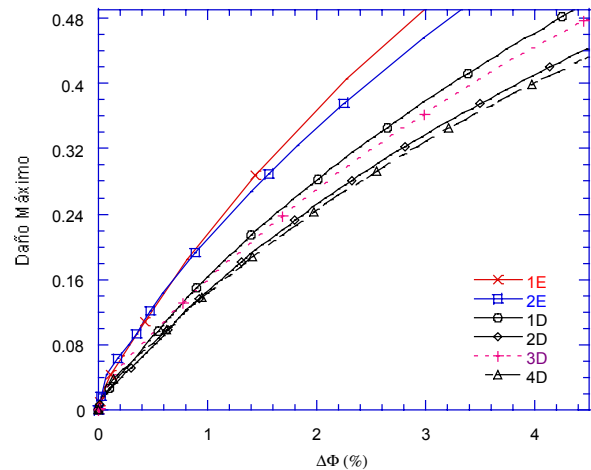


Fig. 9. Resultados correspondientes a la probeta tipo C.

En la figura 10 se muestran los resultados correspondientes a los casos simulados, estáticos y dinámicos, para las tres geometrías y los distintos valores del coeficiente m , manteniendo constante el parámetro n igual a 0,15. En ella se observa, además de los efectos ya indicados de aumento de la deformación de fractura con la velocidad de deformación y de la disminución de ductilidad a medida que aumenta la triaxialidad del campo tensional, que la deformación de fractura aumenta cuando aumenta el parámetro de endurecimiento por velocidad de deformación, m . Este efecto es más acusado en la probeta tipo C (figura 11) cuya geometría de entalla da lugar a un campo tensional de mayor triaxialidad

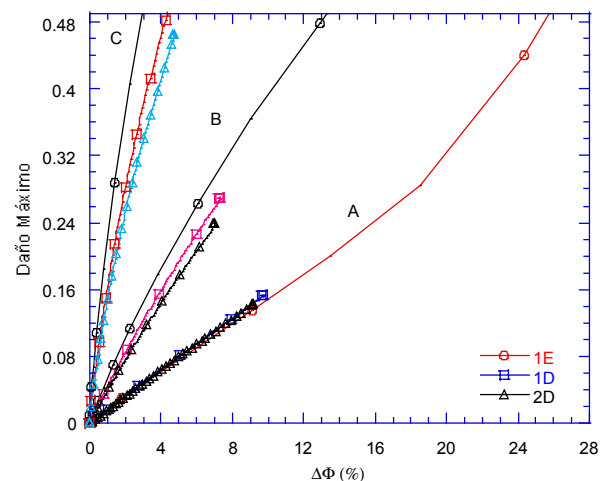


Fig. 10. Resultados de los casos con $n = 0,15$

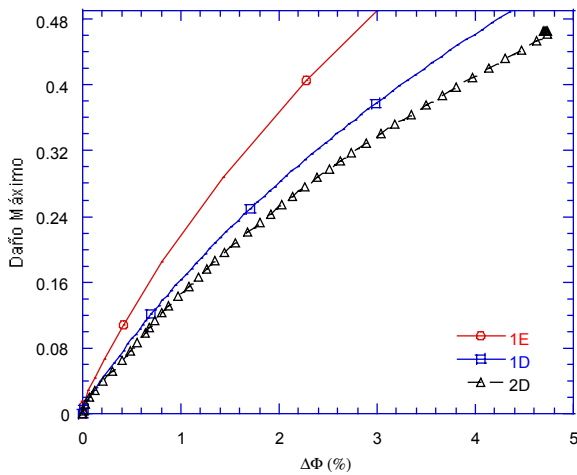


Fig. 11. Resultados correspondientes a la probeta tipo C con $n = 0,15$

En la figura 12 se muestran los resultados correspondientes a los casos simulados, estáticos y dinámicos, para las tres geometrías y los distintos valores del coeficiente n , manteniendo constante el parámetro m igual a 1,25. En ella se puede observar que la ductilidad del material aumenta cuando aumenta el coeficiente de endurecimiento por deformación, n . Observando específicamente los casos correspondientes a la probeta tipo C (figura 13) se puede decir que esta influencia es relativamente menos importante que la del endurecimiento por velocidad de deformación, y el de la velocidad de deformación.

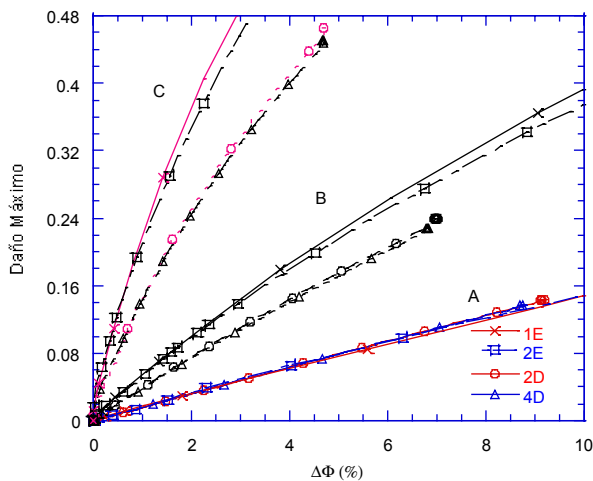


Fig. 12. Resultados de los casos con $m = 1,25$

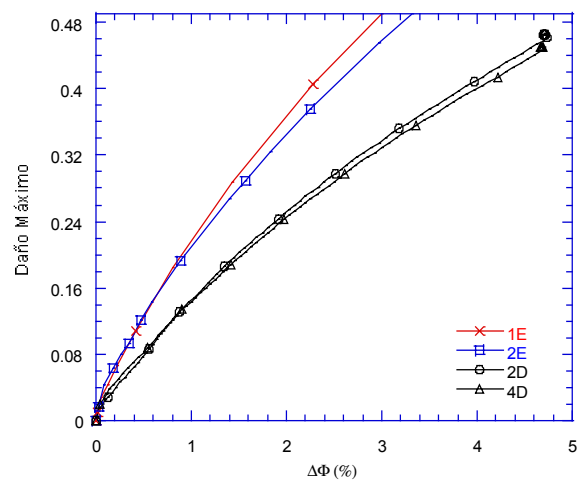


Fig. 13. Resultados correspondientes a la probeta tipo C con $m = 1,25$

5. CONCLUSIONES

En este trabajo ha realizado una simulación numérica de ensayos de tracción, estáticos y dinámicos, sobre probetas cilíndricas con entallas laterales de materiales cuyo mecanismo de rotura es predominantemente dúctil. El objetivo del estudio es analizar la influencia de la velocidad de deformación y de los efectos de endurecimiento del material, por deformación y por velocidad de deformación, así como de la triaxialidad del campo tensional, en la rotura de este tipo de materiales. La modelización se ha llevado a cabo utilizando el método de los Elementos Finitos, considerando diferentes geometrías de la entalla y diferentes valores de los parámetros que caracterizan el comportamiento viscoplástico del material. Se emplea una variable de daño derivada del modelo micromecánico de Rice y Tracey, haciendo la hipótesis de que la rotura se produce cuando dicha variable alcanza un valor crítico independiente de la triaxialidad del campo tensional y de la velocidad de deformación.

Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

La principal influencia en la deformación de rotura del material, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, es la triaxialidad del campo tensional.

La velocidad de deformación tiende a aumentar la deformación de rotura. El aumento es más notorio cuanto más dúctil es el material y cuanto mayor es la triaxialidad del campo tensional.

La ductilidad aumenta con el coeficiente de endurecimiento por velocidad de deformación, m , y, en menor medida, cuando aumenta el coeficiente de endurecimiento por deformación, n .

5. REFERENCIAS

- [1] Hancock, J.W. y Mackenzie, A.C., "On the mechanism of ductile fracture in high-strength steels subjected to multiaxial stress states", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 24, 147-169 (1976).
- [2] Mackenzie, A.C., Hancock, J.W. y Brow, D.K., "On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels", *Engineering Fracture Mechanics*, 9, 167-188 (1977).
- [3] Rice, J.R. y Tracey, D.M., "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17, 201-217 (1969).
- [4] Gurson, A.L: "Continuum Theory of ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99, 357-381 (1977)
- [5] Tvergaard, V y Needleman, A. "Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar". *Acta Metallurgica*, 32, 157-169 (1984).
- [6] Rousselier, G, "Finite deformation constitutive relations including ductile fracture damage", *Three Dimensional Constitutive relations and ductile fracture*, 331-355, Nemat Nasser (editor). North Holland Publishing Company, 1981.
- [7] Lemaitre, J. "A continuous damage Mechanics model for ductile fracture". *Journal of Engineering Materials and Technology*, 107, 83-89 (1985).
- [8] Roudier, P.H. y François, D. "Dynamic fracture toughness measurements and local approach modelling of Titanium alloys", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 19, 1317-1327 (1996)
- [9] Achenbach, U., Schlüter, N., Grimpe, F., Bleck, W y Dahl, W. "Effect of strain rate on ductile failure of FeE 460 steel". *ECF11*, 861-866 (1996)
- [10] ABAQUS User's manual versión 5.8. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1998)

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto 07N/0015/1999, financiado por Dirección General de Investigación de la Comunidad Autónoma de Madrid.