

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DE ROTURA EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE ACERO PERLÍTICO

Fernando Suárez¹, David A. Cendón², José Miguel Atienza², Jaime C. Gálvez¹, Manuel Elices²

¹Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n 28040 - Madrid, España.
E-mail: fsuarez@caminos.upm.es; jaimed.galvez@upm.es

²Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n 28040 - Madrid, España.
E-mail: dcendon@mater.upm.es; jmatienza@mater.upm.es; melices@mater.upm.es

RESUMEN

El ensayo de tracción permite obtener la curva tensión-deformación hasta el instante de carga máxima, sin embargo, a partir de ese momento el análisis de las tensiones y de las deformaciones resulta complicado. Conocer el comportamiento del material a partir del instante de carga máxima resulta fundamental para diseñar estrategias que mejoren la seguridad estructural.

Este trabajo presenta los resultados de una campaña experimental de ensayos de tracción sobre acero perlítico en la que se han estudiado sus deformaciones de rotura así como sus superficies de fractura, todo ello en probetas cilíndricas con diferentes diámetros. Esta campaña ha sido acompañada de simulaciones numéricas con el fin de analizar el comportamiento del material en el interior de la sección. Adicionalmente, se han analizado las superficies de fractura de las probetas y se ha observado una relación no proporcional entre el tamaño de las probetas y el tamaño de la zona interna atribuida al crecimiento de poros. Esta relación no proporcional sugiere que dicha zona actuaría como un concentrador de tensiones, de forma similar a una fisura, y estaría afectado por el efecto de la triaxialidad de las tensiones en la zona de rotura.

ABSTRACT

Through the standard tensile test, the stress-strain curve of steel may be obtained before the ultimate tensile strength is reached; then, stresses and strains are difficult to estimate. It is interesting to know the material behaviour after the ultimate tensile strength in order to improve the structural safety in any structure.

This paper presents the results of an experimental campaign of tensile tests on pearlitic steel where the ultimate strain and the fracture surface have been studied. Cylindrical specimens with different diameters have been tested. This campaign has been complemented with numerical simulations in order to analyse the behaviour inside the cross section. Observing the fracture surfaces of the specimens, it has been found that the relationship between the specimen diameter and the diameter of the area identified as the place where the void growth and coalescence occur, are not proportional. This non-proportional relationship suggests that this area acts as a stress concentrator, the same way a crack does, and it would be conditioned by the stress triaxiality affecting the area where the failure occurs.

PALABRAS CLAVE: Ensayo de Tracción, Nucleación, Crecimiento y coalescencia de huecos, Extensometría óptica.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de tracción es una de las técnicas más sencillas y también la más utilizada en la caracterización de aceros [1]. A partir de la curva fuerza-desplazamiento se puede obtener de forma precisa la curva tensión-deformación hasta el instante de carga máxima. Sin embargo, a partir de ese momento, son varias las incógnitas que siguen existiendo y aspectos como la aparición del cuello de estricción o la deformación de rotura siguen siendo discutidos.

A menudo, la dificultad para determinar el comportamiento del material a partir del instante de carga máxima hace que se desestime este último tramo de la curva tensión-deformación cuando, en opinión de los autores, contiene una información muy valiosa sobre el comportamiento mecánico del material, especialmente sobre la energía máxima que el material es capaz de absorber, parámetro fundamental en caso de rotura accidental o intencionada. Conocer las causas que

determinan la deformación última de rotura resulta fundamental para mejorar la seguridad estructural.

En materiales metálicos dúctiles, algunos modelos de daño para metales se basan en la hipótesis de nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos. Dicha hipótesis considera que una vez alcanzado cierto estado tensional aparecen huecos internos en el material (nucleación de huecos) que, a medida que crece la sollicitación, incrementan su tamaño llegando a conectarse con los huecos contiguos (coalescencia de huecos).

En las superficies de rotura de las probetas se distingue habitualmente una zona interior que se identifica con el fenómeno de crecimiento y coalescencia de poros (véase Figura 1). Es destacable que dicha zona aparece claramente diferenciada sin apreciarse una transición con la contigua. Esta particularidad presenta similitudes con las superficies de fractura de probetas cilíndricas de materiales frágiles con defectos internos.

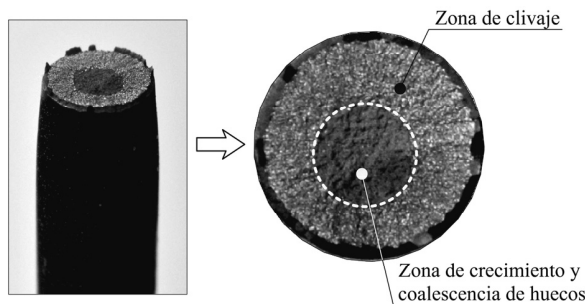


Figura 1. Identificación de la zona de crecimiento y coalescencia de poros en la superficie de fractura de una probeta cilíndrica.

El planteamiento de este trabajo consiste en considerar como hipótesis de partida que el comportamiento del material es dúctil hasta el instante de rotura, momento en el cual la rotura se desencadena de acuerdo a un comportamiento frágil. De esta manera, se identifica la zona central de crecimiento y coalescencia de poros con un defecto interno que, una vez alcanzado un tamaño crítico, desencadena la rotura.

Para comprobar dicha hipótesis, se ha realizado una campaña experimental de ensayos de tracción sobre acero perlítico y se han estudiado sus deformaciones en el instante de rotura, así como sus superficies de fractura, todo ello en probetas cilíndricas con diferentes diámetros. Esta campaña ha sido acompañada de simulaciones numéricas con el fin de analizar el comportamiento del material en el interior de la sección de la probeta, lugar en el que se inicia la rotura. Se han estudiado las superficies de fractura de probetas de diferentes diámetros y se han medido el diámetro final mínimo de la probeta y las zonas interiores atribuidas al crecimiento y coalescencia de huecos. Finalmente, se han comparado estos resultados con los esperados de aplicar un modelo de rotura frágil y con los obtenidos de

un modelo numérico, que contempla el daño basado en el crecimiento y coalescencia de huecos.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material empleado en este estudio es acero eutectoide usado en la fabricación de los alambres de pretensado. Se ha empleado el alambro de partida, por lo que el material estudiado no ha sido sometido a ningún proceso de trefilado que pueda alterar la isotropía del mismo.

El material, con una sección de 12 mm de diámetro, fue suministrado en rollos por la fábrica EMESA- Trefilería (Arteixo-La Coruña).

Un enfriamiento controlado del material durante su fabricación ha permitido que el material presente una estructura perlítica, formada por finas láminas de ferrita y cementita. Debido a que el material no ha sido sometido al proceso de trefilado, no presenta una orientación preferencial de dichas láminas, por lo que se puede considerar un material isótropo en sus propiedades mecánicas. Esta hipótesis de isotropía ha sido confirmada mediante ensayos de dureza realizados sobre las diferentes direcciones [2].

2.2. Probetas

Se ensayaron probetas cilíndricas de diámetros de 3, 6 y 9 mm. Las dimensiones de las probetas se recogen en la Figura 2. Se ensayaron 3 probetas de cada tipo.

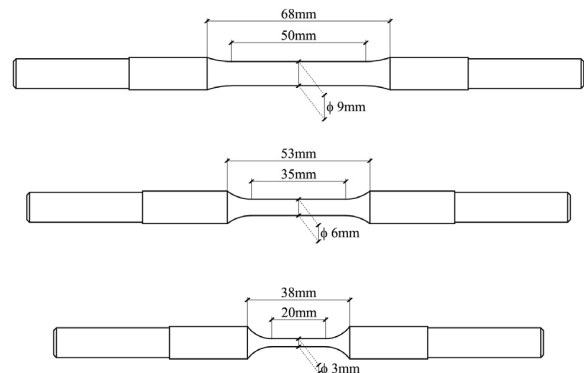


Figura 2. Dimensiones de las probetas homotéticas.

2.3. Ensayos e instrumentación

Cada una de las 9 probetas fue sometida a un ensayo de tracción, realizado con una máquina universal estática marca Suzpecar con control en desplazamiento. La carga fue medida con una célula de carga de 100kN.

Con el fin de obtener la mayor información posible de los ensayos, todas las probetas fueron instrumentadas con un extensómetro resistivo y, adicionalmente, se empleó un sistema de medida de desplazamientos y deformaciones mediante óptica de alta resolución (Vic-

2D) [3]. Este sistema permite medir el desplazamiento relativo de un conjunto aleatorio de puntos marcados en la superficie de la probeta antes del ensayo. Posteriormente, un software específico permite obtener el desplazamiento relativo entre dos puntos cualesquiera a lo largo del ensayo, ofreciendo así la posibilidad de realizar las medidas extensométricas que se deseen.

3. MODELO DE FRACTURA ELÁSTICO LINEAL

Como se ha comentado, el planteamiento de este trabajo contempla la hipótesis de que, tras un comportamiento dúctil, la rotura se desencadena de manera frágil. Para comprobar este aspecto, se ha empleado la fórmula de Sih [4], que proporciona una expresión para obtener el factor de intensidad de tensiones (K_I) en el caso de un sólido cilíndrico con una grieta circular centrada y perpendicular al eje:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi r} \frac{F_{(r/R)}}{\left(1 + \frac{r}{R}\right) \sqrt{1 - \frac{r}{R}}} \quad (1)$$

donde:

$$F_{(x)} = \frac{2}{\pi} [1 + 0.5x - 0.625x^2 + 0.421x^3] \quad (2)$$

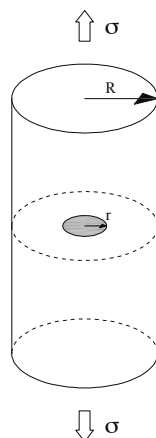


Figura 3. Variables empleadas en la fórmula de Sih [4].

La Figura 3 muestra un esquema del sólido cilíndrico con un defecto interno, en ella se indican los parámetros de la ecuación (1). Esta fórmula establece una relación entre el radio del sólido, el radio del defecto interno y el factor de intensidad de tensiones. Igualando este último a la tenacidad de fractura K_{IC} , se puede establecer una relación directa entre el radio del defecto interno, el radio del sólido y la tensión remota de rotura.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Para estudiar el comportamiento del material en el interior de la probeta antes de la rotura, se realizaron simulaciones numéricas en 3D de las probetas

ensayadas. Dichas simulaciones se realizaron empleando el programa ABAQUS 6.9 y mallando la probeta completa. Se emplearon elementos hexaédricos de 8 nodos. La Figura 4 muestra la imagen de una de las mallas utilizadas.

Para simular correctamente la aparición del cuello de estricción, la simulación se realizó en grandes desplazamientos. La carga se aplicó con control de desplazamiento, imponiendo un desplazamiento creciente en los nodos del extremo superior y manteniendo fijos los nodos del extremo inferior, emulando de esta manera la aplicación de la carga realizada en los ensayos.

Se adoptó el modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), que el propio programa ABAQUS tiene implementado [5]. Este modelo identifica y cuantifica el crecimiento y coalescencia de huecos. A continuación se exponen brevemente las principales características de este modelo.

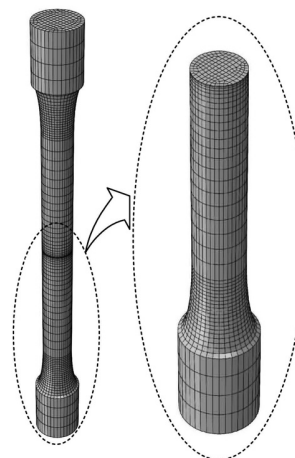


Figura 4. Vista general de la geometría empleada en las simulaciones (izquierda) y detalle de la zona central (derecha).

4.1. Modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)

El modelo fue desarrollado por Gurson en 1977 [6, 7] y posteriormente ajustado y ampliado por Tvergaard y Needleman [8]. El modelo está basado en el comportamiento de un volumen esférico incompresible con un poro esférico concéntrico en su interior. Considera el incremento de volumen de poros total como la suma del incremento debido al crecimiento de poros y del incremento debido a la nucleación de nuevos poros:

$$\frac{df}{dt} = \frac{df_{gr}}{dt} + \frac{df_{nucl}}{dt} \quad (3)$$

El criterio de plastificación del modelo es:

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (4)$$

donde p y q son la presión hidrostática y la tensión equivalente de Von Mises, respectivamente.

$$p = \sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (5)$$

$$q = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (6)$$

A su vez, las constantes q_1 , q_2 y q_3 son los parámetros introducidos por Tvergaard y Needleman para mejorar las predicciones del modelo de Gurson en materiales con poros uniformemente distribuidos. Si el valor de dichos parámetros es igual a la unidad se obtiene el modelo de Gurson original.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Comparación de resultados obtenidos mediante extensómetro resistivo y extensómetro óptico (Vic-2D)

Una de las principales dificultades que existen al estudiar el comportamiento del material a partir del instante de carga máxima radica en que dicho comportamiento viene gobernado por un fenómeno local, la aparición del cuello de estricción.

El extensómetro resistivo se emplea habitualmente para medir la evolución de la deformación durante el ensayo de tracción. Dicho dispositivo abarca una zona muy reducida de la probeta y es usual, por tanto, que el cuello de estricción quede parcial o totalmente fuera de la zona medida, lo cual imposibilita obtener datos extensométricos a partir del instante de carga máxima.

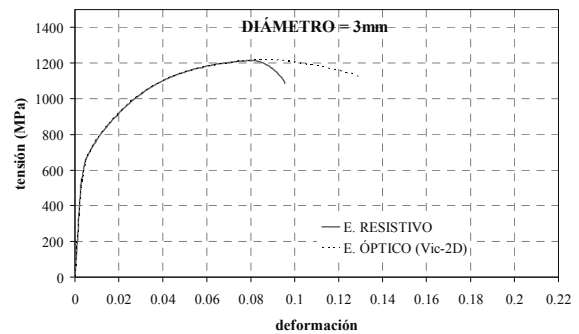
Como ya se ha comentado, el sistema de extensometría óptica (Vic-2D) no presenta este inconveniente, ya que permite realizar tantas medidas extensométricas como se desee y donde se desee, pudiendo garantizar así que el cuello de estricción quede recogido en la medición.

Se han comparado los resultados obtenidos con ambos sistemas de extensometría, representando gráficamente las curvas tensión verdadera-deformación verdadera (se entiende por tensión verdadera, la obtenida a partir de una hipótesis de conservación de volumen) [1]. La base de medida empleada en los extensómetros ópticos ha sido de 12,5mm, que coincide con la del extensómetro resistivo, con el fin de realizar mediciones totalmente comparables. Es interesante observar cómo el cuello de estricción hace que, aunque la tensión real siempre aumente en la zona más cargada, la tensión verdadera calculada según la hipótesis de conservación de volumen también muestre un descenso.

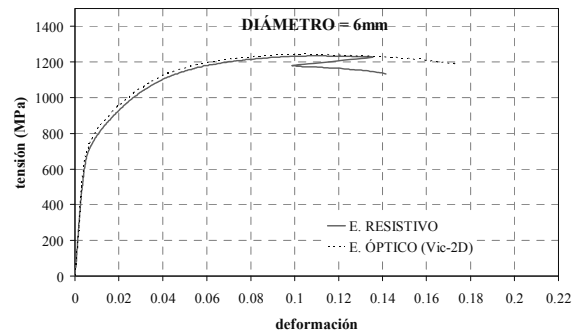
La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los tres diámetros y compara la medida del extensómetro resistivo con la del extensómetro óptico. En la figura se muestran los resultados para tres de las

nueve probetas ensayadas, una probeta de cada diámetro.

a)



b)



c)

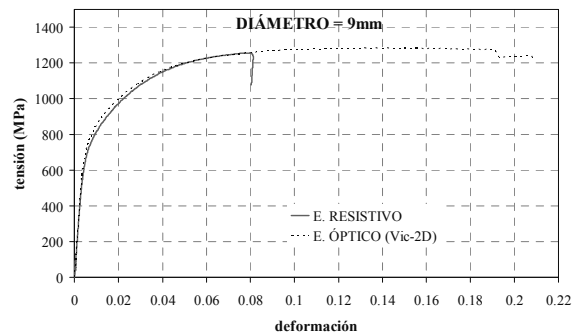


Figura 5. Curvas tensión verdadera-deformación verdadera, comparación entre resultados con extensómetro resistivo y extensómetro óptico. a) probeta de 3mm, b) probeta de 6mm y c) probeta de 9mm.

Se observa que hasta la aparición del cuello de estricción las mediciones resultan similares y que, posteriormente, las medidas del extensómetro óptico permiten obtener la curva completa hasta rotura mientras que las medidas del extensómetro resistivo dejan de aportar información. En las Figuras 5a y 5c el extensómetro queda parcial o totalmente fuera del cuello de estricción, mientras que en la Figura 5b, a pesar de abarcar correctamente el cuello de estricción, las cuchillas del extensómetro experimentan un deslizamiento e impiden medir correctamente la deformación.

5.2. Comparación de resultados experimentales con la fórmula de Sih

Como se ha indicado, la fórmula de Sih permite relacionar el radio del cilindro R y el radio del defecto interno r una vez conocidas la tensión de rotura σ y la tenacidad de fractura K_{IC} . Con los datos obtenidos de uno de los ensayos de las probetas de 6mm se han calibrado σ y K_{IC} para, posteriormente, obtener el valor del defecto interno en todos los ensayos realizados. Es importante resaltar que, debido a la formación del cuello de estricción, el radio del cilindro es menor que el de la probeta inicial. En los cálculos se ha empleado el valor del radio de la sección por donde rompe la probeta.

La Tabla 1 muestra los resultados de las mediciones realizadas y los valores obtenidos mediante la fórmula de Sih, para cada una de las nueve probetas ensayadas. La Figura 6 representa gráficamente estos resultados.

Tabla 1. Comparación entre los resultados proporcionados por la fórmula de Sih y las mediciones.

PROBETA	R. probeta (mm)	R. sección de rotura (mm)	r. zona central (mm)	
			Sih	Medición
D3 p1	1.50	1.22	0.890	0.780
D3 p2	1.50	1.26	0.910	0.810
D3 p3	1.50	1.20	0.880	0.750
D6 p1	3.00	2.53	1.318	1.270
D6 p2	3.00	2.51	1.314	1.330
D6 p3	3.00	2.53	1.318	1.300
D9 p1	4.50	3.92	1.477	1.760
D9 p2	4.50	3.72	1.463	---
D9 p3	4.50	3.76	1.466	1.600

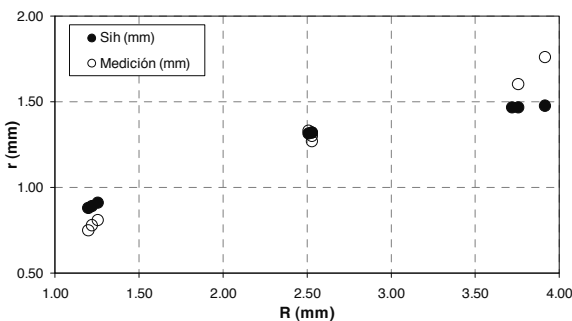


Figura 6. Comparación entre los resultados proporcionados por la fórmula de Sih y las mediciones. Crecimiento del radio del defecto interno r en función del radio de la probeta R .

Con el fin de verificar una posible relación de proporcionalidad entre el tamaño de la zona central y el tamaño de la probeta, se ha comparado el valor de la relación r/R en cada una de las probetas. La Figura 7 representa la relación r/R para los resultados proporcionados por la fórmula de Sih y los medidos experimentalmente. Un valor constante de la relación r/R indicaría proporcionalidad y, como puede observarse, no existe esta proporcionalidad. Este resultado apunta a que en el instante de rotura, el tamaño

de la zona central de crecimiento de huecos no es proporcional al diámetro de la probeta, existiendo de esta forma un cierto efecto de tamaño. Así, la deformación de rotura estaría gobernada por un mecanismo análogo al de la Mecánica de la Fractura, más que por el estado tensional de la probeta en el instante de la rotura.

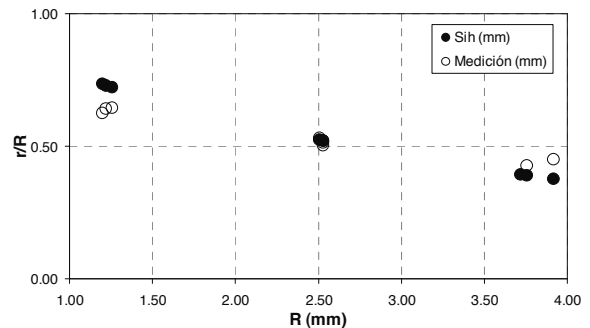


Figura 7. Comparación entre los resultados proporcionados por la fórmula de Sih y las mediciones. Evolución de la relación r/R en función del radio de la probeta R .

5.3. Comparación de resultados con el modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman

La implementación del modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) en Abaqus proporciona la fracción de volumen de poros total, así como las fracciones correspondientes a crecimiento y a nucleación de poros de forma separada [5].

Para calibrar el modelo GTN se ha empleado el modelo correspondiente a la probeta de 6mm. De esta manera, en la simulación correspondiente a la probeta de 6mm de diámetro se ha identificado el instante correspondiente a la rotura por comparación con los ensayos reales. Se ha adoptado como valor crítico el valor de la fracción del volumen de poros total presente en la sección mínima del cuello de estricción, a una distancia del eje igual al radio de la mancha central medida en las probetas ensayadas (Figura 1). En la simulación de las probetas de 3mm y 9mm se ha identificado el radio en el que aparece dicho valor crítico en el instante de rotura.

Tabla 2. Comparación entre los resultados proporcionados por el modelo GTN y las mediciones.

PROBETA	R. probeta (mm)	R. sección de rotura (mm)	r. zona central (mm)	
			GTN	Medición
D3 p1	1.50	1.22		0.780
D3 p2	1.50	1.26	1.010	0.810
D3 p3	1.50	1.20		0.750
D6 p1	3.00	2.53		1.270
D6 p2	3.00	2.51	1.300	1.330
D6 p3	3.00	2.53		1.300
D9 p1	4.50	3.92		1.760
D9 p2	4.50	3.72	1.390	---
D9 p3	4.50	3.76		1.600

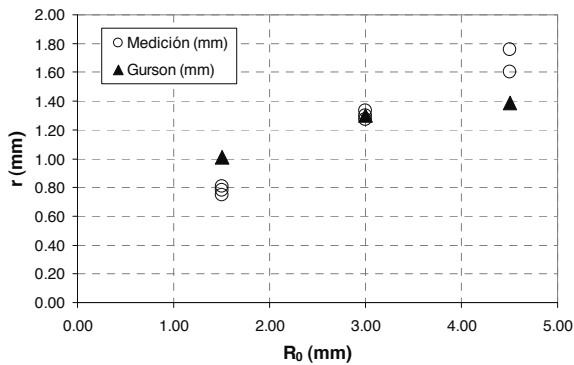


Figura 8. Comparación entre los resultados proporcionados por el modelo GTN y las mediciones.

La Tabla 2 y la Figura 8 muestran el radio de la zona central obtenido de esta manera y comparado con el medido experimentalmente para cada una de las geometrías.

CONCLUSIONES

El presente trabajo confirma que un sistema de extensometría óptica (Vic-2D) arroja resultados similares a los obtenidos mediante extensómetro resistivo, permitiendo además realizar todas las medidas extensométricas que se deseen y garantizar el estudio de la evolución de las deformaciones en el cuello de estricción.

Además, se ha comprobado que el tamaño de la zona central atribuida al crecimiento y coalescencia de poros, presente en las superficies de rotura de probetas cilíndricas, no crece de forma proporcional con el diámetro. Esta zona central tiende a crecer más lentamente a medida que se aumenta el diámetro de la probeta.

Si bien es cierto que los conceptos de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal no son aplicables a un acero empleado como material de partida para la fabricación de alambres de pretensado, la fórmula de Sih, que relaciona el radio de un defecto interno y el radio de una probeta cilíndrica sometida a tracción en materiales frágiles, proporciona resultados con la misma tendencia que los observados experimentalmente. Esta tendencia, sin embargo, es más acusada en la fórmula de Sih que en los resultados experimentales.

El modelo de Gurson-Tveergard-Needleman, basado en la teoría de crecimiento y nucleación de huecos, proporciona predicciones del tamaño de la zona central que se adaptan a los resultados obtenidos experimentalmente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación parcial de este trabajo a través de las ayudas BIA 2008-03523 e IPT-420000-2010-31. También desean mostrar su agradecimiento a Luis del Pozo y a Luisa Villar, de Emesa Trefilería, S.A. (Arteixo, La Coruña), por el suministro del material así como por sus útiles comentarios.

F. Suárez además desea agradecer a la Fundación Agustín de Betancourt por la financiación proporcionada a través de una beca de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez-Gálvez, V., "Física de la Plasticidad", ETSI Caminos, Canales y Puertos (1988).
- [2] Atienza, J.M., "Tensiones residuales en alambres de acero trefilados", Tesis Doctoral, 293 pag., Universidad Politécnica de Madrid (2001).
- [3] "Vic 3D/2D User Manual". Correlated Solutions Inc. (2005).
- [4] Sih, G.C., "Handbook of Stress Intensity Factors", Institute of Fracture and Solid Mechanics, Lehigh University (1973).
- [5] Abaqus, "Users' Manual", version 6.7. ABAQUS, Inc. (2009).
- [6] Gurson, A.L., J. Engng Mater. Tech. 99, 2 (1977).
- [7] Gurson, A.L., "Porous Rigid-Plastic Materials Containing Rigid Inclusions – Yield Function, Plastic Potential and Void Nucleation", Proc. Int. Conf. Fracture (edited by D. M. R. Tapling), Vol. 2A, 357. Pergamon Press, Oxford (1977).
- [8] Tvergaard, V., Needleman, A., "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar", Acta metall. Vol. 32, No. 1, pp. 157-169 (1984).