

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ROTURA POR TRACCIÓN DE ALAMBRES DE ACERO PERLÍTICO CON UN MODELO DE FISURA COHESIVA

F. Suárez¹, D. A. Cendón², J. C. Gálvez¹, J. M. Atienza², M. Elices²

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

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

RESUMEN

La fractura de metales dúctiles como el acero suele explicarse a partir de la hipótesis de nucleación, crecimiento y coalescencia de microhuecos. A partir de esta teoría, se han desarrollado diversos modelos numéricos, entre los que el modelo de Gurson y sus variantes son los más extendidos. Dichos modelos reproducen matemáticamente el fenómeno físico de crecimiento de huecos resultando en un desarrollo progresivo del daño en el interior del material durante un ensayo de tracción. En estos modelos, el daño comienza a desarrollarse en fases muy tempranas del ensayo, incluso anteriores a la carga máxima. Ensayos realizados por los autores parecen indicar, sin embargo, que en el caso de barras de acero eutéctico empleado en la fabricación de alambres de pretensado, el daño originado en el interior del material como consecuencia del crecimiento de microhuecos sólo es apreciable en un estado muy avanzado del ensayo, momentos antes de producirse la rotura. Además, desde hace décadas se conoce que la triaxialidad de tensiones tiene una fuerte influencia sobre la rotura de los materiales. En este trabajo se presenta un modelo de rotura para elementos de acero sometidos a tracción, basado en un comportamiento cohesivo del material y que contempla el valor de la triaxialidad de tensiones, diferente en cada punto de la sección crítica de rotura.

ABSTRACT

The fracture of ductile materials, such as steel, is usually explained with the theory of nucleation, growth and coalescence of microvoids. Based on this theory, many numerical models have been developed, with a special mention to Gurson-type models. These models simulate mathematically the physical growth of microvoids, leading to a progressive development of the internal damage that takes place during a tensile test. In these models, the damage starts to develop in very early stages of the test. Tests carried out by the authors seem to point out that, in the case of eutectoid steel bars used for manufacturing prestressing steel wires, the internal damage that takes place as a result of the growth of microvoids is only noticeable in a very advanced state of the test. In addition to this, it is known that the stress triaxiality has a strong influence over the fracture of ductile materials. This work presents a fracture model for steel specimens in a tensile test, based on a cohesive behaviour and taking into account the effect of stress triaxiality, which is different in every point of the fracture plane.

PALABRAS CLAVE: Ensayo de Tracción, Modelo Cohesivo, Modelo de Gurson, Fractura, Acero.

1. INTRODUCCIÓN

La rotura de materiales dúctiles ha sido tradicionalmente explicada a través de la hipótesis de nucleación, crecimiento y coalescencia de microhuecos. Según esta hipótesis, en una primera fase, bajo estados de carga avanzados, surgen microporos dentro del material (nucleación), generalmente provocados por decohesión de pequeñas inclusiones con el resto del material o por la propia rotura de la partícula que constituye la inclusión. En una segunda fase, y bajo estados de deformación mayores, estos microporos incrementan sus dimensiones (crecimiento) hasta,

finalmente, llegar a interconectarse entre sí (coalescencia).

Esta teoría ha servido de base a diversos modelos numéricos que han intentado reproducir la rotura en materiales dúctiles, siendo el modelo de Gurson y sus variantes los que han alcanzado mayor difusión [1]. Desde su aparición, este tipo de modelos se ha aplicado a diversos materiales dúctiles, tales como el aluminio, el cobre o el acero, proporcionando resultados muy precisos. Evoluciones posteriores de los mismos han permitido reproducir, no sólo el endurecimiento por

deformación debido al crecimiento de poros, sino incluso la rotura del material [2].

La presencia de los poros en la que se fundamentan estos modelos se puede apreciar, por ejemplo, en la superficie de rotura que se observa tras un ensayo de tracción simple. La figura 1 muestra el aspecto que presenta la superficie de rotura de una probeta cilíndrica de acero perlítico empleado como material de partida en la fabricación de alambres de pretensado. De acuerdo con [3], la mancha central oscura correspondería a una zona de crecimiento y nucleación de poros que iría debilitando la probeta, según la teoría del modelo de Gurson, hasta que se desencadenaría la rotura de la misma.

Sin embargo, pese a estar fundamentados en este proceso físico de crecimiento y nucleación de poros que se puede observar tras la rotura del material, la utilización de estos modelos plantea problemas fundamentales, como el gran número de parámetros necesarios para su calibración, así como el hecho de que estos parámetros no son medibles mediante ensayos experimentales, ya que se basan en valores como el volumen de poros presentes en el material en el momento del inicio de la coalescencia o el volumen de huecos que produce la rotura.

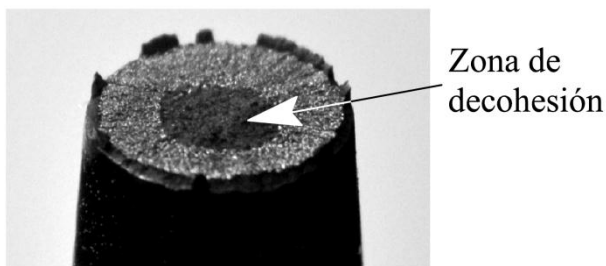


Figura 1: Superficie de rotura de las probetas.

Por otro lado, parece comprobado que el valor de la triaxialidad de tensiones (σ_H/σ_{VM}) juega un papel fundamental en los mecanismos que desencadenan la rotura [4].

En este trabajo se propone, como alternativa a los modelos basados en el de Gurson, un modelo cohesivo para reproducir la rotura del acero perlítico empleado en la fabricación de alambres de pretensado. A diferencia del modelo de fisura cohesiva tradicional [5], el modelo propuesto contempla como factor determinante el valor de la triaxialidad de tensiones, que según el modelo de Gurson, es el parámetro fundamental en el crecimiento y nucleación de poros.

2. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

El objetivo que se persigue con los ensayos es identificar en la curva F- ϵ el instante a partir del cual el daño interno que provoca la rotura final de la probeta resulta apreciable. Para ello, se han realizado dos grupos de ensayos, un primer grupo de ensayos de tracción

hasta rotura y otro segundo grupo de ensayos de tracción, detenidos instantes antes de la rotura.

Los ensayos llevados hasta rotura permitieron conocer con precisión la curva F- ϵ de las probetas. Una vez conocida esta curva, los ensayos pertenecientes al segundo grupo pudieron ser detenidos en puntos concretos de la misma, delimitando así la aparición del daño interno a lo largo del ensayo.

2.1 Material

El material empleado en este estudio es acero eutectoide, empleado en la fabricación de alambres de pretensado. Se ha utilizado el alambro de partida, esto es, el material antes de ser sometido al proceso de trefilado, con el fin de utilizar un material lo más isotrópico posible. El material, con una sección de 12mm de diámetro, fue suministrado en rollos por la fábrica EMESA-Trefilería (Arteixo- La Coruña).

2.2 Probetas

Se ensayaron probetas cilíndricas de 6mm de diámetro, cuyas dimensiones se recogen en la Figura 2.

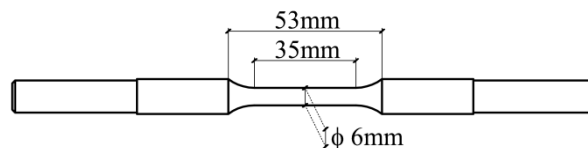


Figura 2: Geometría de las probetas

2.3 Ensayos

- Ensayos hasta rotura

En primer lugar, tras el ensayo de tres probetas se obtuvo la curva F- ϵ , que se muestra en la Figura 3.

- Ensayos detenidos antes de la rotura

Posteriormente se ensayaron dos probetas hasta alcanzar deformaciones próximas a la rotura, correspondientes a cargas de 2.90t y 2.85t (éstas fueron las cargas en las que se detuvo el ensayo). En la Figura 3 se representan estos dos puntos en la curva F- ϵ .

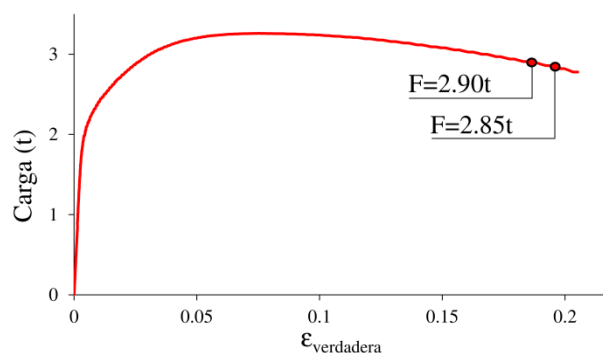


Figura 3: Diagrama F- ϵ . Se indican los puntos en los que se detuvo el ensayo para cada una de las dos probetas ensayadas.

La probeta ensayada hasta el estado de deformación más avanzado, que se corresponde con una carga de 2.85t, fue además analizada por medio de tomografía de rayos X, con el fin de observar el tamaño del daño interno desarrollado hasta ese momento en el ensayo.

Finalmente, ambas probetas fueron sometidas a un ensayo de tracción acelerado, sumergiéndolas en nitrógeno líquido y aplicando un desplazamiento rápido de las mordazas de sujeción. De este modo, se provoca una rotura fragilizada que permite observar el daño acumulado en el interior de la probeta sin introducir un daño adicional. El montaje de dicho ensayo, en el que la temperatura se midió con un termopar, puede verse en la Figura 4.

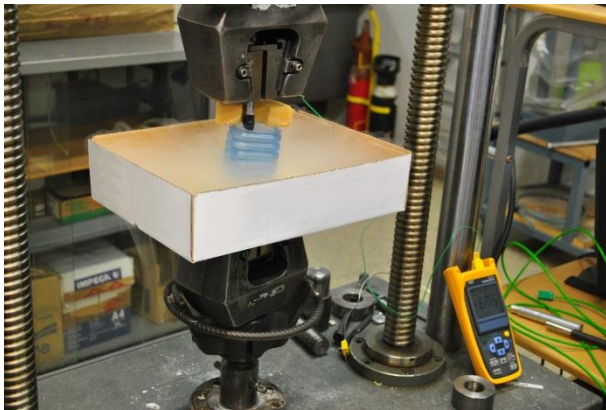


Figura 4: Montaje para el ensayo de las probetas de acero, con nitrógeno líquido.

2.4 Resultados

La Figura 5 muestra el aspecto de las dos probetas ensayadas tras los ensayos con nitrógeno líquido.

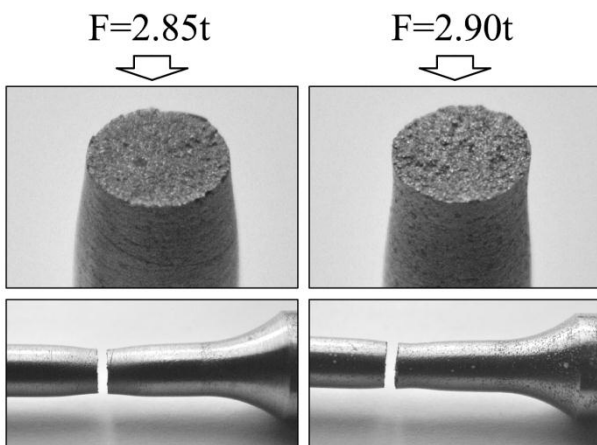


Figura 5: Aspecto de las probetas ensayadas tras la rotura con N líquido.

El análisis tomográfico de la probeta ensayada hasta un estado de deformaciones mayor ($F=2.85t$) mostraba una acumulación de daño similar al observado en la superficie de rotura tras el ensayo fragilizado con nitrógeno líquido. En la Figura 6 se compara el aspecto de la superficie de rotura con la imagen obtenida con el tomógrafo.

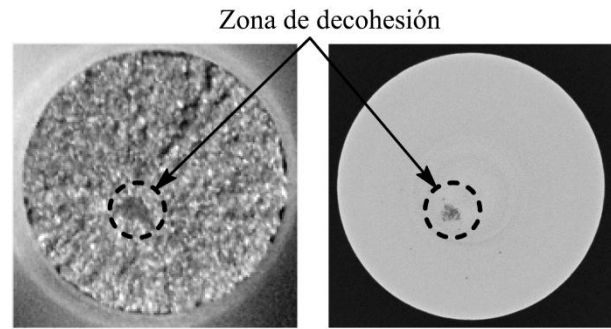


Figura 6: Zona de decohesión apreciada en el interior de la probeta con mayor deformación: superficie de rotura tras el enfriamiento con N líquido (izquierda) e imagen con el tomógrafo de rayos X (derecha).

La rotura de la probeta ensayada hasta $F=2.90t$ no se produjo por la zona de mayor estrechamiento del cuello de estricción. Parece que el posible daño interno de la probeta no se había desarrollado lo suficientemente para desencadenar la rotura en el plano que lo contenía.

3. ELEMENTO DE INTERCARA COHESIVO CON COMPORTAMIENTO DEPENDIENTE DE LA TRIAXIALIDAD

En este apartado se describe el funcionamiento del elemento de intercara desarrollado. Mientras que el comportamiento de un elemento cohesivo tradicional [5] viene definido únicamente por la energía de fractura (G_F) y la tensión de decohesión (f_t) este elemento permite simular una rotura en un plano determinado mediante un comportamiento cohesivo que, además, se ve afectado por el valor de la triaxialidad de tensiones en cada elemento del modelo.

El elemento fue programado en el programa ABAQUS a través de una subrutina de usuario UEL.

3.1 Plano de decohesión

El elemento está programado para una rotura por decohesión en el plano YZ. De esta manera, el elemento de intercara es un rectángulo situado en el plano YZ y coincide con una cara de uno de los elementos que pertenecen a la probeta ensayada. La tracción es aplicada en el sentido del eje X y, por lo tanto, es perpendicular al elemento de intercara. La decohesión se produce cuando la tensión principal en la dirección del eje X alcanza el valor de la resistencia a tracción del acero, f_t . La Figura 7 muestra gráficamente el funcionamiento del elemento.

3.2 Grandes deformaciones

El elemento está programado para adaptarse a grandes deformaciones, esto es, para tener en cuenta la disminución de área que tiene lugar con motivo de la deformación del elemento tridimensional al que está asociado. Bajo la hipótesis de conservación de volumen, la aplicación de carga provoca un estiramiento del elemento tridimensional que, a su vez, implica una

reducción del área del elemento de intercara al que está asociado, tal y como se representa en la Figura 8.

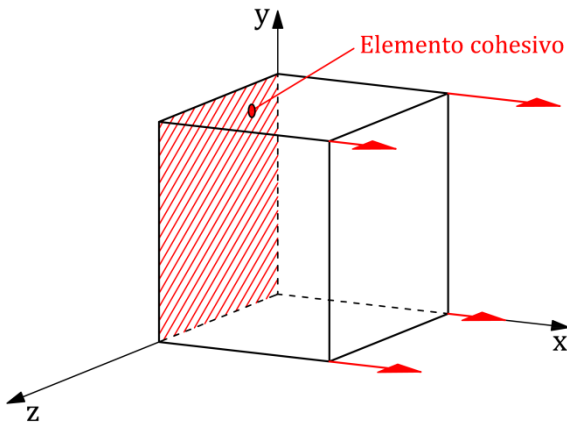


Figura 7: Elemento cohesivo y sentido de aplicación de la carga.

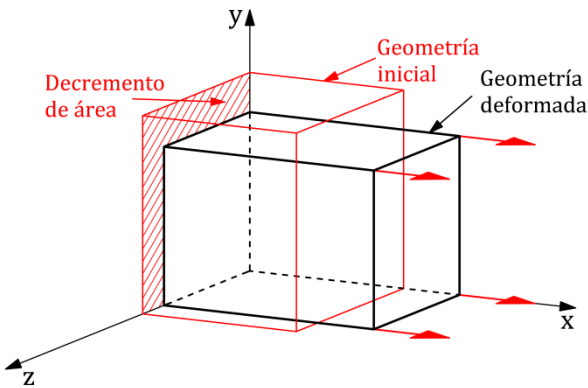


Figura 8: Efecto de las grandes deformaciones sobre la geometría del elemento cohesivo.

En cada uno de los incrementos temporales realizados durante el cálculo, el jacobiano del elemento es recalculado a partir de las coordenadas de los nodos. El valor de las coordenadas de los nodos es actualizado en cada incremento.

3.3 Curva de ablandamiento

La curva de ablandamiento se adapta al comportamiento plástico propio del acero. De esta manera, la pérdida de carga se produce inicialmente de manera suave y se acelera a medida que la fisura se abre. En concreto, esta curva de ablandamiento ha sido definida mediante una función del tipo $y=A-B \cdot x^2$. En la Figura 9 se muestra el aspecto de la curva de ablandamiento empleada.

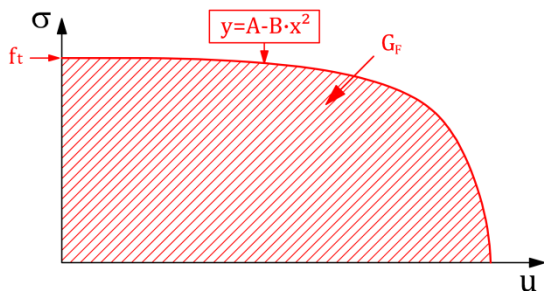


Figura 9: Curva de ablandamiento empleada.

3.4 Influencia de la triaxialidad de tensiones

Los parámetros propios de la curva de ablandamiento, energía de fractura (G_F) y tensión de fisuración (f_t), se hacen depender de la triaxialidad de tensiones que presente el elemento tridimensional al que se asocia el elemento cohesivo de intercara. Este planteamiento no es nuevo y un acercamiento similar puede encontrarse en el trabajo de Siegmund y Brocks [6].

En la Figura 9 se representa esquemáticamente el funcionamiento de la subrutina programada. El elemento cohesivo es un elemento plano de intercara, y su geometría coincide con una de las caras del elemento sólido al que está asociado. La fisura se produce en el plano YZ, por lo que el elemento cohesivo se ha de hallar en este plano. Durante el proceso de cálculo, en cada uno de los incrementos temporales en que éste se divide, la subrutina calcula el valor de la triaxialidad (σ_H/σ_{VM}) del elemento sólido al que cada elemento cohesivo está asociado. El valor de dicha triaxialidad afecta al comportamiento del elemento cohesivo, más concretamente, a los valores que rigen su curva de ablandamiento (G_F y f_t).

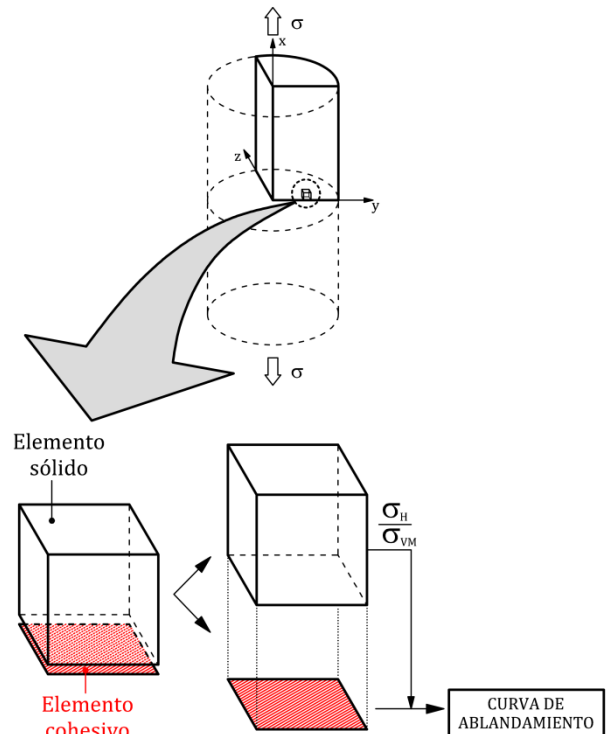


Figura 9: Esquema del funcionamiento del elemento cohesivo propuesto.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se ha empleado el elemento de intercara descrito en el apartado anterior para reproducir el ensayo de tracción de la probeta de $\phi=6\text{mm}$ ensayada. El modelo representa una octava parte de la probeta, siendo el plano YZ el plano de rotura. La Figura 10 muestra una imagen del modelo empleado.

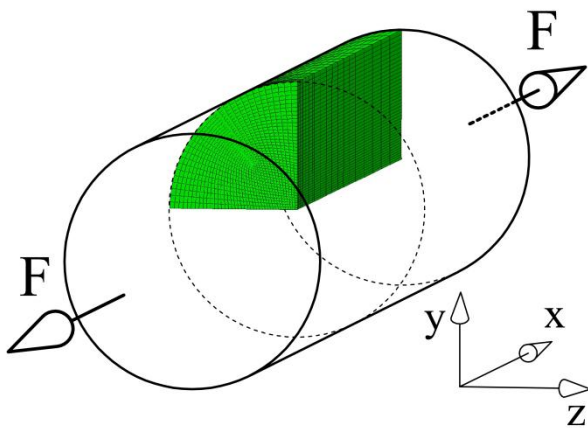


Figura 10: Malla empleada en la simulación.

Esta simulación se realizó con el programa comercial ABAQUS (versión 6.9) y el elemento de intercara, tal y como se ha mencionado anteriormente, fue desarrollado mediante una subrutina de usuario UEL.

Este modelo, a diferencia de los modelos basados en el de Gurson, sólo requiere ajustar los parámetros propios de un modelo cohesivo, esto es, la tensión de decohesión, f_t , y la energía de fractura, G_F , que, además, puede obtenerse experimentalmente mediante un ensayo de flexión en tres puntos.

4.1 Modelo del material

El cálculo se realizó bajo la hipótesis de grandes desplazamientos. Como criterio de plasticidad se utilizó el de Von Mises.

4.2 Aplicación de la carga

La aplicación de la carga se realizó mediante un desplazamiento impuesto del extremo más alejado de la sección de rotura.

4.3 Simulación de la rotura

La aparición del cuello de estricción en la probeta provoca una concentración de tensiones en el centro de la sección de rotura. De este modo, la tensión principal en la dirección de la aplicación de la carga es mayor en el centro de la probeta. Una vez que el elemento de intercara asociado al elemento situado en el centro de la probeta alcanza una tensión principal según el eje X de valor f_t , se inicia la decohesión de este elemento. Esta decohesión representa el inicio del daño y se traduce en una descarga progresiva del elemento dañado y una transmisión de carga a los elementos adyacentes. De este modo, la rotura se propaga desde el eje de la probeta hacia el exterior.

Las imágenes de la Figura 11 muestran cómo se desarrolla el proceso de decohesión en la simulación numérica. Ha de advertirse que las deformaciones en la dirección del eje X se representan multiplicadas por un factor de 100 con el fin de que éstas sean apreciables.

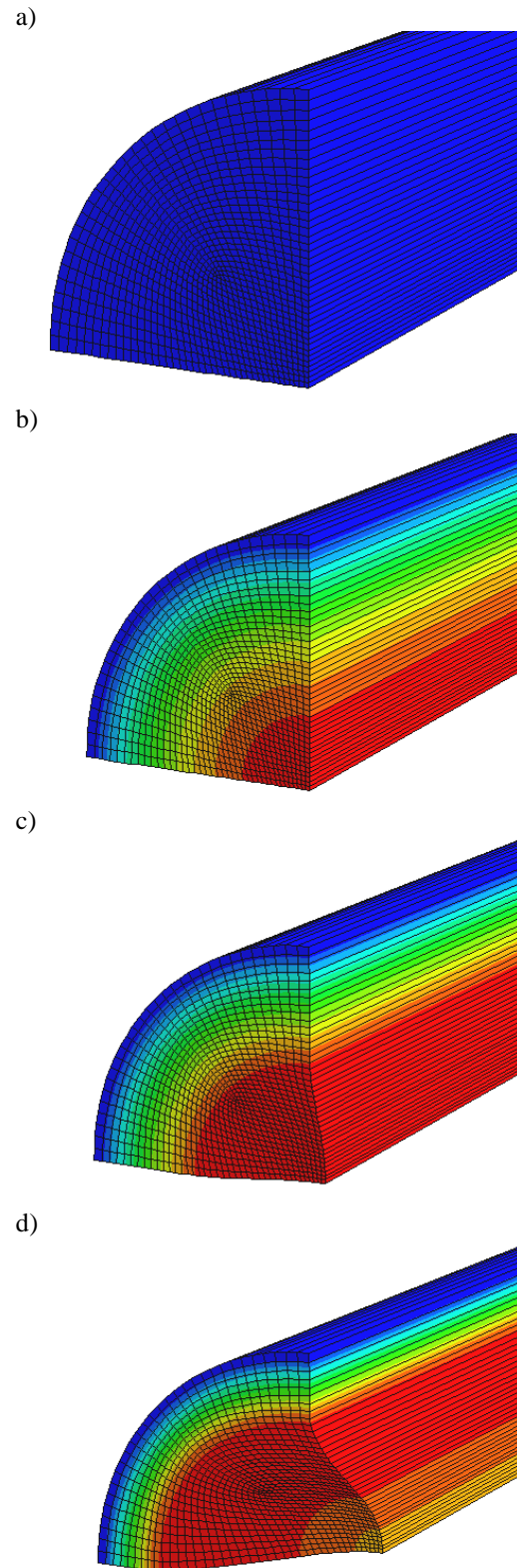


Figura 11: Evolución del daño en el modelo cohesivo desarrollado. Nota: la deformación en el eje de las X está multiplicada por un factor de 100: a) Antes de la aplicación de la carga; b) Acumulación de tensiones en el eje; c) Inicio de la decohesión en el eje; d) La decohesión se propaga de dentro hacia afuera.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Ley Fuerza-deformación

En la Figura 12 se muestran superpuestas las curvas $F-\varepsilon$ obtenidas en el ensayo y en la simulación numérica. Para obtener la deformación de la simulación numérica se ha tomado como referencia un punto situado a 6.25mm de la sección de rotura, exactamente la mitad de la base extensométrica empleada en el ensayo, de manera que los resultados de la simulación sean comparables con los experimentales.

En la curva obtenida numéricamente se indica el punto en el que comienza a producirse la decohesión.

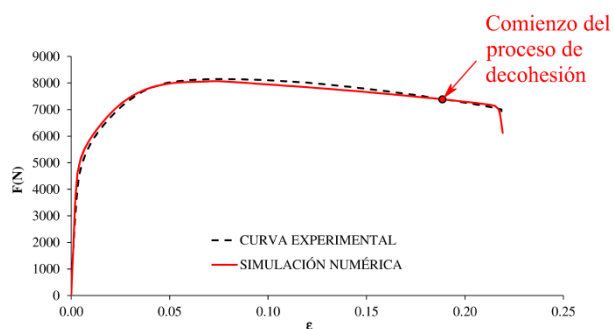


Figura 12: Comparación entre la curva $F-\varepsilon$ experimental y la obtenida con la simulación numérica.

La curva obtenida con la simulación numérica se ajusta razonablemente bien a la curva obtenida experimentalmente. Además, en esta simulación, el proceso de decohesión, que simula el daño interno observado en la superficie de fractura de las probetas ensayadas, sólo comienza a producirse en los últimos instantes del ensayo. Estos resultados se asemejan a lo observado experimentalmente por medio de la tomografía de rayos X (Figura 6).

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares presentados en este trabajo parecen indicar que el daño observado en la rotura de probetas cilíndricas de acero perlítico, identificado por la región oscura visible en la superficie de rotura, se desarrolla en los últimos instantes de un ensayo de tracción.

El modelo cohesivo, implementado en ABAQUS mediante una subrutina UEL de manera que su comportamiento dependa de la triaxialidad de tensiones, permite reproducir una rotura en la que la decohesión comienza en el eje de la probeta y se propaga hacia el exterior, iniciándose el daño en los últimos instantes del ensayo de tracción. Este comportamiento es coherente con lo observado experimentalmente.

Como se ha mencionado, este trabajo presenta resultados preliminares de un estudio más amplio centrado en el comportamiento del acero desde el instante de carga máxima hasta su rotura. Hasta el

momento los modelos de rotura más extendidos para este tipo de materiales han sido los modelos de Gurson-Tvergaard-Needleman [2] que, si bien son modelos numéricos ampliamente contrastados, requieren de una calibración de parámetros que no pueden ser medidos de forma experimental. La ventaja de un modelo cohesivo radicaría en un menor número de parámetros que, además, pueden ser medidos a priori de manera experimental. El modelo propuesto, a su vez, adolece de no reproducir la nucleación y crecimiento de microhuecos, sin embargo, en materiales como el estudiado, acero eutéctico empleado en la fabricación de alambres de pretensado, no parece ser un factor determinante en el comportamiento del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación parcial de este trabajo a través de las ayudas DPI 2011-24876 e IPT-420000-2010-31. Asimismo, desean mostrar su agradecimiento a Jon Molina-Aldareguia y Federico Sket, del Instituto IMDEA Materiales, por su ayuda en la obtención de datos mediante tomografía de rayos X. y a Luis del Pozo y a Luisa Villar, de Emesa Trefilería, S.A. (Arteixo, La Coruña), por el suministro del material así como 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] Gurson A.L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", J. Eng. Mater. Tech. (January 1977).
- [2] 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).
- [3] Suárez F., Cendón D.A., Atienza J.M., Gálvez J.C., Elices M., "Análisis de la deformación de rotura en el ensayo de tracción en probetas cilíndricas de acero perlítico", Anales de Mecánica de la Fractura, 28, Vol. I, pp.205-210 (2011).
- [4] Bao Y., Wierzbicki T., "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space", Int. J. Mech. Sci. 46, pp. 81-98 (2004).
- [5] Elices M., "Mecánica de la fractura" Departamento de Ciencia de los Materiales, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (1998).
- [6] Siegmund T., Brocks W., "A numerical study on the correlation between the work of separation and the dissipation rate in ductile fracture", Eng. Fract. Mech. 67, pp.139-154 (2000).