

## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE DAÑO DE GURSON-TVERGAARD PARA LA SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE SMALL PUNCH

I. I. Cuesta<sup>1</sup>, J. M. Alegre<sup>1</sup>, L. Sarabia<sup>2</sup>, M. S. Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior, C/Villadiego s/n, 09001 Burgos.

E-mail: iicuesta@ubu.es, jalegre@ubu.es

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas y Computación, Universidad de Burgos, Facultad de Ciencias, Plaza Misael Bañuelos s/n, 09001 Burgos.

E-mail: lsarabia@ubu.es, ssanchez@ubu.es

### RESUMEN

El ensayo de Small Punch tiene como objetivo final la determinación de las propiedades a fractura del material (tenacidad) en aquellos casos en los que no se dispone de material suficiente para la realización de ensayos convencionales de fractura. El modelo de daño de Gurson, modificado por Tvergaard y Needleman, permite simular el comportamiento del material hasta su rotura, en base a una serie de parámetros de material que deben ser determinados para la correcta aplicación del modelo. En el presente artículo se ha desarrollado una metodología para la identificación de los parámetros de daño que gobiernan dicho modelo a partir de la curva carga-desplazamiento obtenida en el ensayo de Small Punch. Dicha metodología permite simular correctamente los ensayos de Small Punch realizados con probetas en las que se ha variado el espesor y la temperatura del ensayo. La modelización se ha efectuado en 3D con el objetivo de poder introducir en un futuro la posible anisotropía de algunos materiales. El trabajo futuro consistirá en determinar la validez de los mismos en otras situaciones tensionales, como la que se genera en las probetas CT, y que permitirá la estimación de la tenacidad a fractura del material.

### ABSTRACT

The final Small Punch test objective is to determine the fracture properties of the material (fracture toughness) when not enough material is available for the accomplishment of a conventional fracture tests. The damage model of Gurson, modified by Tvergaard and Needleman, allows to simulate the behaviour of the material until its fracture, based on several material parameters that must be determined for the correct application of the model. In the present article, a methodology for the identification of the damage parameters has been developed, based on the load-displacement curve obtained in the Small Punch test. This methodology permits the correct simulation of the Small Punch test made with test specimens in which has varied its thickness and the test temperature. With the objective of being able in the future to introduce the possible anisotropy of some materials, a 3D modelling has been developed. The following step in the simulation will consist in determining its validity in other stress fields, like the one generated in the CT specimens, and that will allow to finally estimate the fracture toughness of the material.

**PALABRAS CLAVE:** Small Punch, modelo de daño de Gurson-Tvergaard.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el ensayo de Small Punch (SPT) se ha utilizado para la determinación de las propiedades mecánicas [1,2] de materiales para los cuales no se dispone de material suficiente para poder realizar ensayos convencionales, como puede ser el caso de soldaduras o piezas irradiadas en servicio [3], pretendiendo así caracterizar el material mediante un ensayo de carácter no destructivo para el funcionamiento de la pieza.

Actualmente se pretende obtener las propiedades mecánicas y de fractura de estos materiales a partir de la interpretación y evaluación de la curva carga-desplazamiento obtenida en el SPT. En general, en

dicha curva se pueden diferenciar hasta seis zonas (Figura 1), aunque la finalización de una y el comienzo de la siguiente no se pueden determinar exactamente. Cada una de estas zonas está fuertemente influenciada por diferentes parámetros que definen el material ensayado.

El objetivo del presente artículo es aplicar el modelo de daño de Gurson-Tvergaard, el cual tiene en cuenta la nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos, para la simulación del comportamiento del material hasta su rotura. Los parámetros que definen dicho modelo están relacionados con las diferentes zonas observadas en el SPT, y en el presente trabajo se establece una metodología para su obtención.

**2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Las curvas tensión-deformación y carga-desplazamiento experimentales utilizadas en el presente estudio han sido obtenidas por el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la Universidad de Cantabria a partir de la realización de ensayos de tracción y de Small Punch respectivamente. El material utilizado ha sido un acero grado A (Lloyd's) utilizado en construcción naval. Las dimensiones de la probeta SPT han sido de 10x10mm, con orientación LS, el espesor de la probeta se ha variado entre 0.4 y 0.7mm. Para la realización del ensayo se ha utilizado un diámetro del punzón  $d=2.4\text{mm}$ , una matriz de diámetro  $t=4\text{mm}$  y un radio de acuerdo de la matriz inferior  $r=0.5\text{mm}$ . La temperatura del ensayo se ha variado entre  $-100$  y  $20^\circ\text{C}$ . La velocidad de ensayo ha sido  $v=0.2\text{mm/min}$ .

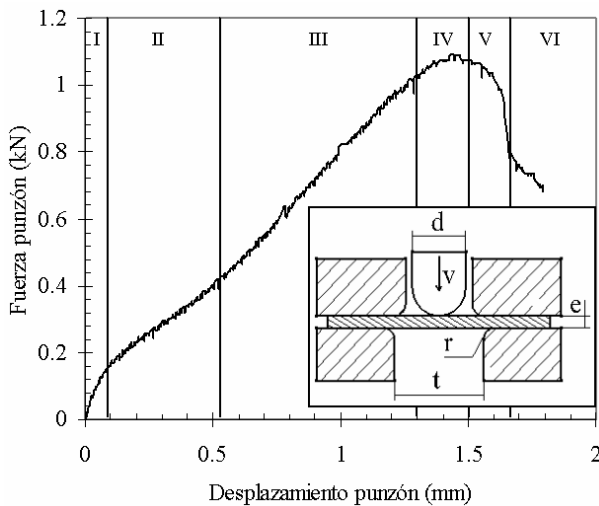


Figura 1 Curvas SPT obtenidas experimentalmente

En la Figura 1 se presenta a modo de ejemplo una curva carga-desplazamiento típica para el acero ensayado. Para definir la metodología a seguir en la identificación de parámetros se han utilizado los datos correspondientes a la probeta de 0.5mm de espesor ensayada a  $T^a$  ambiente.

**3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SPT**

El software utilizado para la simulación ha sido MSC.Marc. Debido a la simetría que presenta el SPT se ha modelado un cuarto de la geometría utilizando los planos YZ y ZX como planos de simetría, como se observa en la Figura 2. El punzón y el radio de acuerdo de la matriz inferior se han modelado con una esfera y un toroide respectivamente, considerándolos como cuerpos rígidos en el contacto. La probeta se ha considerado como un cuerpo deformable elasto-plástico y ha sido modelada con elementos hexaédricos de ocho nodos. La modelación se ha efectuado en 3D con el objetivo de poder introducir en un futuro la posible anisotropía de algunos materiales.

El coeficiente de fricción ( $\mu$ ) entre los diferentes cuerpos en el contacto es un parámetro a tener en cuenta en la simulación [4]. Como el contacto es acero-acero se ha tomado un valor  $\mu=0.1$ . Las dimensiones geométricas son las mismas que las del ensayo experimental, siendo el espesor de la probeta de 0.5mm. Las superficies en las que se apoya la probeta tanto de la matriz superior como inferior no se han modelado porque se han sustituido por restricciones de desplazamiento, con las cuales se logra el mismo efecto de empotramiento de la probeta durante el ensayo.

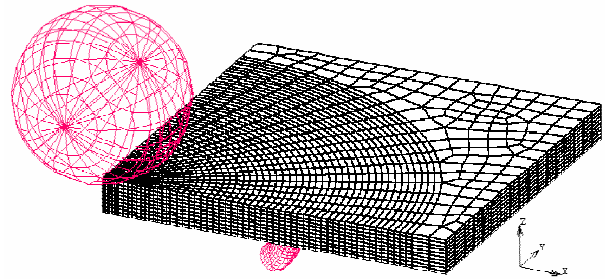


Figura 2. Geometría utilizada en la simulación.

Se han utilizado los datos experimentales de la curva tensión-deformación para obtener las propiedades elásticas, como son el módulo de Young ( $E$ ) y del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), y las propiedades plásticas del material. El comportamiento plástico se ha ajustado mediante una ecuación tipo Hollomon ( $\sigma=K\varepsilon_p^n$ ). Estos parámetros ( $\mu$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $K$  y  $n$ ) son insuficientes para reproducir correctamente el SPT debido a que durante el ensayo se genera daño en el material previo a su rotura, con lo cual es necesario la utilización de un modelo de daño para poder simular el comportamiento del material hasta su rotura. El modelo de daño utilizado ha sido el modelo de Gurson-Tvergaard [5], definido por la expresión (1).

$$F = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2\sigma_y}\right) - \left[1 + (q_1 f^*)^2\right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f^* &= f & \text{si } f \leq f_c \\ f^* &= f_c + \delta(f - f_c) & \text{si } f > f_c \end{aligned} \quad (2)$$

El parámetro  $f^*$  (2) se introduce en el modelo para poder reproducir el decrecimiento de la capacidad de carga si se produce la coalescencia de huecos. Siendo  $f$  la fracción volumétrica de huecos, cuyo valor varia en cada instante en función del crecimiento de los huecos existentes y de la nucleación de nuevos huecos (3).

$$\begin{aligned} \dot{f} &= \dot{f}_{\text{crecimiento}} + \dot{f}_{\text{nucleacion}} \\ \dot{f}_{\text{crecimiento}} &= (1-f) \dot{\varepsilon}_{kk}^p \\ \dot{f}_{\text{nucleacion}} &= \frac{f_N}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_m^p - \varepsilon_n}{S}\right)^2\right] \dot{\varepsilon}_m^p \end{aligned} \quad (3)$$

Dicho modelo depende de los siguientes parámetros que hay que determinar:

- $q_1$  y  $q_2$  son parámetros de material. Dichos parámetros se han mantenido fijos según determinan varios autores [6,7], los cuales han comprobado que valores de  $q_1=1.5$  y  $q_2=1$  proporcionan buenos resultados para la mayoría de los aceros.

- $f_0$  es la fracción volumétrica de huecos inicial. En nuestro caso se ha tomado  $f_0=0$  ya que se ha considerado que no existe daño inicial en el material, y que este se genera a lo largo del proceso de deformación de la probeta.

- $\epsilon_n$  es la deformación media para la nucleación. En las zonas de material en las que se alcanza este valor de deformación comienza la nucleación de huecos y su posterior crecimiento si la deformación aumenta.

- $S$  es la desviación estándar del parámetro  $\epsilon_n$  ya que este sigue una distribución normal en el modelo de daño. El valor de  $S$  será pequeño si el material se considera homogéneo, mientras que tomará un valor elevado si el tamaño de las partículas de la segunda fase del material varía mucho [6]. En nuestro caso se considera el material homogéneo, siendo  $S=0.01$ .

- $f_N$  es la fracción volumétrica de la nucleación de huecos, con este parámetro se controla la fracción volumétrica de huecos que se forman cuando se alcanza el valor de  $\epsilon_n$ , es decir, cuando comienza la nucleación.

- $f_c$  es la fracción volumétrica de huecos crítica. Este parámetro nos indica el valor para el cual la coalescencia de huecos comienza a tener lugar en el material, con lo que la capacidad resistente desciende notablemente. En la curva carga-desplazamiento del SPT este fenómeno se puede asociar con la zona de carga máxima ya que una vez alcanzada, la carga del punzón desciende significativamente.

- $f_F$  es la fracción volumétrica de huecos en el fallo. Una vez que se inicia la coalescencia de huecos la fracción volumétrica de los mismos sigue aumentando hasta alcanzar el valor de  $f_F$ , momento en el que se produce la rotura del material. Una vez fijado el valor de  $f_c$ , el valor de  $f_F$  va a ser el que gobierne la velocidad de coalescencia ( $\delta$ ) que viene dada por la expresión (4) y en la que  $f_u^*=1/q_1$ .

$$\delta = \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} \quad (4)$$

#### 4. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE MATERIAL EN EL SPT

En la curva carga-desplazamiento obtenida en el SPT se pueden llegar a distinguir hasta seis zonas, como se puede observar en la Figura 3. Los parámetros de

material ( $\mu$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $f_0$ ,  $\epsilon_n$ ,  $S$ ,  $f_N$ ,  $f_c$ ,  $f_F$ ) necesarios para la correcta simulación del SPT empiezan a tener influencia sobre el ensayo en diferentes momentos del mismo, por lo que será posible su identificación a partir de la forma de la curva carga-desplazamiento obtenida en el ensayo. Las zonas de la curva y la influencia de cada uno de los parámetros sobre ella se exponen a continuación.

- **Zona I.** Es la zona en la que el material tiene un comportamiento puramente elástico. Los únicos parámetros que tienen influencia en esta zona son  $E$  y  $\nu$ . El tramo de curva comprendido en esta zona se puede ajustar a una recta.

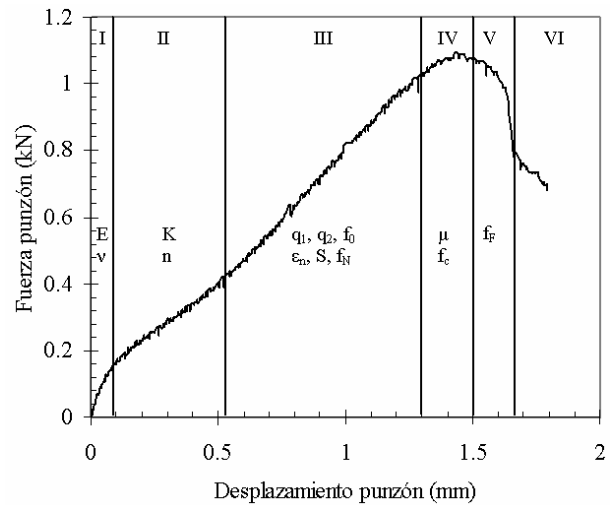


Figura 3 Curva carga-desplazamiento del SPT

- **Zona II.** Es la zona de transición elasto-plástica, el material comienza a plastificar en algunos puntos de la probeta empezando así a tener importancia los parámetros  $K$  y  $n$ , ya que son los que definen el comportamiento plástico del material.

- **Zona III.** Es la zona en la que el material tiene un comportamiento puramente plástico en todos los puntos de la probeta que no están restringidos por las matrices. La nucleación de huecos comienza en los puntos de mayor deformación plástica, por lo que los parámetros  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $f_0$ ,  $\epsilon_n$ ,  $S$  y  $f_N$  empiezan a tener importancia. La fracción volumétrica de huecos comienza a crecer conforme va aumentando el desplazamiento del punzón. El tramo de curva comprendido en esta zona también se puede ajustar mediante una recta.

- **Zona IV.** Es la zona de carga máxima, en esta zona se produce un adelgazamiento importante del espesor de la probeta y comienza la coalescencia de huecos debido a que la fracción volumétrica de huecos alcanza en algunos puntos de la probeta el valor de  $f_c$  en el inicio de esta zona, dicha fracción sigue aumentando hasta que se llega a la carga máxima del punzón, momento en el que en esos puntos de la probeta se alcanza el valor de  $f_F$  y comienza el fallo del material. Se ha comprobado

que en esta zona el parámetro  $\mu$  comienza a tener importancia [4].

- **Zona V.** Es la zona de ablandamiento del material, una vez que en algunos puntos de la probeta se ha llegado a la rotura del material. La capacidad resistente disminuye bruscamente debido a la velocidad de coalescencia de huecos, la cual depende del parámetro  $f_F$ . La velocidad de caída en la curva está relacionada con el parámetro  $\delta$ . La fisura que se produce en la probeta comienza a crecer de forma circular entorno al centro de la probeta.

- **Zona VI.** Es la zona de rotura final de la probeta, en esta zona el punzón atraviesa por completo la probeta. En los ensayos experimentales no es usual llegar hasta la rotura total de la probeta, ya que el ensayo se suele parar cuando se ha alcanzado la zona V de la curva.

### 5. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

La determinación de los parámetros de material a partir de la curva carga-desplazamiento va a ser posible debido a que estos empiezan a tener influencia en diferentes zonas de la curva, como ya se ha explicado anteriormente. Los parámetros  $\mu$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $f_0$  y  $S$  han sido determinados sin necesidad de recurrir a la curva carga-desplazamiento debido a que se poseían datos suficientes para su identificación (curva tensión-deformación, bibliografía). Una vez identificados los parámetros anteriores, únicamente quedan por determinar  $\epsilon_n$ ,  $f_N$ ,  $f_c$  y  $f_F$  todos ellos parámetros del modelo de daño.

#### 5.1. Determinación del comportamiento elasto-plástico

Las propiedades elasto-plásticas del material que hay que considerar han sido determinadas a partir de la curva tensión-deformación obtenida en el ensayo de tracción realizado en el LADICIM.

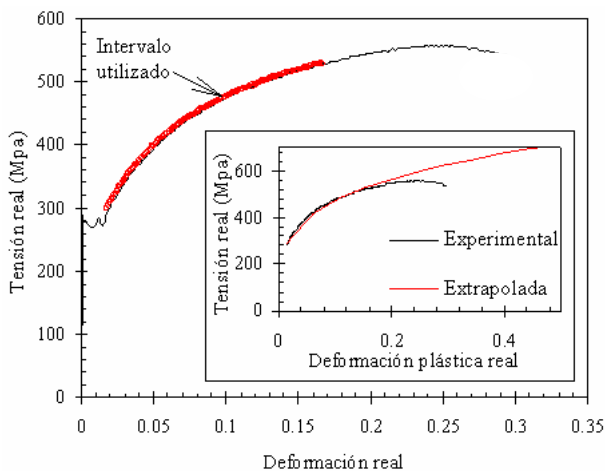


Figura 4 Curva tensión-deformación real experimental

Para valores pequeños de la deformación plástica se han utilizado los datos experimentales de la curva tensión-deformación, pero conforme va aumentando esa deformación aparece daño en la probeta y se ha extrapolado el comportamiento del material sin daño para grandes deformaciones con una ecuación tipo Hollomon ( $\sigma=K\epsilon_p^n$ ). La metodología para extrapolar la curva tensión-deformación plástica consiste en seleccionar un intervalo de puntos (Figura 4), descartando los valores cercanos a la fluencia del material y los próximos a la tensión máxima, debido a la aparición de daño local en la probeta de ensayo.

El intervalo de puntos utilizado ha sido [0.015,0.167] para la deformación plástica real. El intervalo de extrapolación es fundamental en los resultados obtenidos en la simulación, debido a que de él dependen los parámetros  $K$  y  $n$ , los cuales definen el comportamiento plástico del material. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de material obtenidos a partir de la curva tensión-deformación.

Tabla 1 Parámetros de material que definen el comportamiento elasto-plástico

| E (MPa) | $\nu$ | K     | n     |
|---------|-------|-------|-------|
| 200000  | 0.3   | 854.5 | 0.256 |

Una vez obtenidos estos parámetros se puede realizar una primera simulación sólo con el comportamiento elasto-plástico del material, es decir, sin utilizar el modelo de daño. En la Figura 5 se puede observar el buen ajuste obtenido en las primeras zonas del SPT, es a partir de la zona 3 cuando la curva simulada empieza a separarse del comportamiento real, debido a que comienza el daño en la probeta.

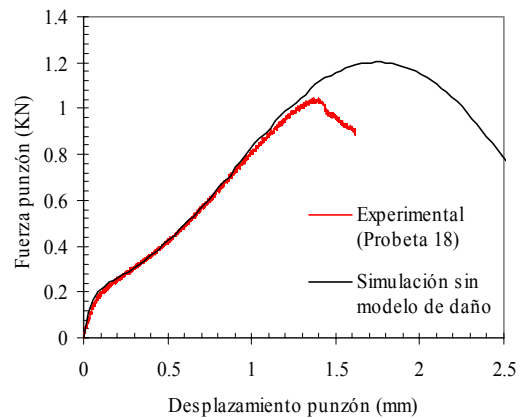


Figura 5 Comparación ensayo experimental-simulación sin modelo de daño

#### 5.2. Determinación de $\epsilon_n$ y $f_N$

Los parámetros  $\epsilon_n$  y  $f_N$  son los que van a gobernar la forma de la curva en la zona 3 ya que los demás parámetros de los que depende esta zona ya se han determinado y permanecen fijos. Al poderse ajustar a una recta ( $y=mx+n_0$ ) el tramo de curva comprendido en

esta zona, se pueden relacionar los valores de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  con los valores que toma la pendiente (m) y la ordenada en el origen ( $n_0$ ). Esta relación se puede expresar como  $m=g_1(\epsilon_n, f_N)$  y  $n_0=g_2(\epsilon_n, f_N)$ , donde  $g_1$  y  $g_2$  se postulan como modelos cuadráticos de la forma expresada en la ecuación (3).

$$g(\epsilon_n, f_N) = b_0 + b_1\epsilon_n + b_2f_N + b_{11}\epsilon_n^2 + b_{22}f_N^2 + b_{12}\epsilon_n f_N \quad (3)$$

Para determinar los coeficientes de las funciones  $g_1$  y  $g_2$  se diseña un experimento en el que  $\epsilon_n$  se ha variado entre 0.15 y 0.3 con un incremento de 0.05 y el valor de  $f_N$  se ha variado entre 0.01 y 0.07 con un incremento de 0.015 (rango de valores de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  típicos para los aceros [6,7]). El diseño del experimento consiste en la realización de un total de 20 simulaciones con las combinaciones correspondientes de los parámetros  $\epsilon_n$  y  $f_N$ , obteniéndose para cada simulación el valor de m y de  $n_0$ . Se ha utilizado el software NEMRODW [8] para la estimación de los coeficientes de  $g_1$  y  $g_2$ , previa codificación de los parámetros para que varíen en [-1,1]. Los coeficientes obtenidos para las variables codificadas se muestran en la Tabla 2. Al 99% de confianza los coeficientes significativos para cada una de las funciones son los que se han destacado en negrita. Las dos regresiones son muy significativas estadísticamente (p-valor <  $10^{-4}$ ) y explican el 99.7 % y 99.3 % de la varianza de m y  $n_0$  respectivamente.

Tabla 2 Coeficientes de las funciones  $g_1$  y  $g_2$  (variables codificadas)

|          | $m=g_1(\epsilon_n, f_N)$ | $n_0=g_2(\epsilon_n, f_N)$ |
|----------|--------------------------|----------------------------|
| Coef.    | Valor                    | Valor                      |
| $b_0$    | <b>0.774075</b>          | <b>0.022333</b>            |
| $b_1$    | <b>0.011094</b>          | <b>-0.001755</b>           |
| $b_2$    | <b>-0.051640</b>         | <b>0.029950</b>            |
| $b_{11}$ | 0.001642                 | -0.001519                  |
| $b_{22}$ | 0.000086                 | 0.000071                   |
| $b_{12}$ | <b>0.007788</b>          | -0.00123                   |

A partir de las funciones  $g_1$  y  $g_2$  que ajustan adecuadamente los datos de la simulación es posible determinar los valores de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  asociados a los valores deseados de  $m=0.7909$  y  $n_0=0.0119$ . Técnicamente, se trata de buscar valores de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  que hagan mínimas simultáneamente las diferencias de  $g_1$  a 0.7909 y de  $g_2$  a 0.0119. Sin embargo, como se observa en la Tabla 2, los coeficientes para ambas funciones tienen signo distinto, lo cual significa que las dos funciones ajustadas tienen comportamiento contrapuesto respecto de los parámetros, o lo que es lo mismo, que no decrecen simultáneamente para ningún valor de los parámetros. La determinación de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  es por tanto un problema de los llamados multi-objetivo que se ha abordado mediante dos procedimientos: un estudio de deseabilidad y el cálculo del frente Pareto, realizados con el software NEMRODW y un algoritmo programado por Ortiz y col. [9] en MATLAB respectivamente. Básicamente la función de

deseabilidad es una ponderación a priori de los dos objetivos individuales y el frente Pareto representa el conjunto de soluciones que son optimales en cada uno de los objetivos. El primer procedimiento consiste pues en resolver un problema unidimensional mientras que el segundo es abordar la búsqueda desde el espacio bidimensional de los objetivos. De entre todas las soluciones obtenidas, se ha elegido una en cada caso y, para comprobar su validez, se han realizado las dos simulaciones correspondientes a los respectivos parámetros de  $\epsilon_n$  y  $f_N$ , obteniendo los valores de m y  $n_0$  que se muestran en la Tabla 3. En dicha tabla también se muestra el error de m y  $n_0$  respecto a los valores deseados  $m=0.7909$  y  $n_0=0.0119$ .

Tabla 3 Resultados de los procedimientos utilizados

|              | DESEABILIDAD |          | FRENTA PARETO |          |
|--------------|--------------|----------|---------------|----------|
| $\epsilon_n$ | 0.2118       |          | 0.1979        |          |
| $f_N$        | 0.0294       |          | 0.0292        |          |
| ↓            | Valor        | Error(%) | Valor         | Error(%) |
| m            | 0.7905       | 0.05     | 0.7898        | 0.14     |
| $n_0$        | 0.0124       | 4.04     | 0.012         | 0.84     |

Globalmente, el error con la solución correspondiente al frente Pareto es menor, por lo que los valores de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  obtenidos con este procedimiento son los que se utilizarán para proseguir con la metodología de identificación de parámetros. En la Figura 6 se puede observar el buen ajuste obtenido para la zona 3 con los valores identificados de  $\epsilon_n$  y  $f_N$ .

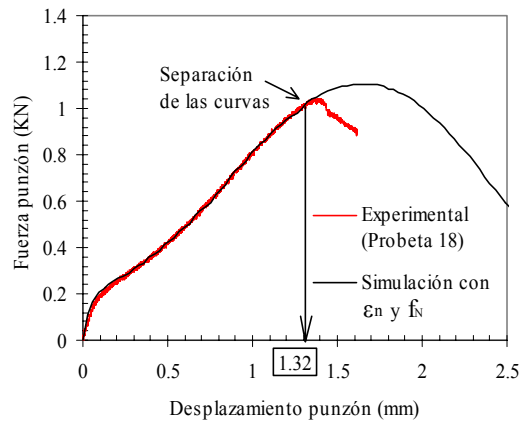


Figura 6 Comparación ensayo experimental-simulación con  $\epsilon_n$  y  $f_N$

### 5.3. Determinación de $f_c$

En la Figura 6 se puede observar el punto en el que las curvas experimental y simulada comienzan a separarse, este punto marca el inicio de la coalescencia de huecos, es decir, que la fracción volumétrica de huecos ha alcanzado el valor de  $f_c$ . La Figura 7 muestra el valor de la fracción volumétrica de huecos para los nodos de la zona donde se producirá el fallo de la probeta. La identificación del valor de  $f_c$  se puede realizar mediante la Figura 7 en la que entrando con el dato del valor de

desplazamiento del punzón en el inicio de la coalescencia (1.32mm) obtenemos el valor de la fracción volumétrica de huecos en ese instante, el cual será el valor de  $f_c$ , quedando  $f_c=0.07$ .

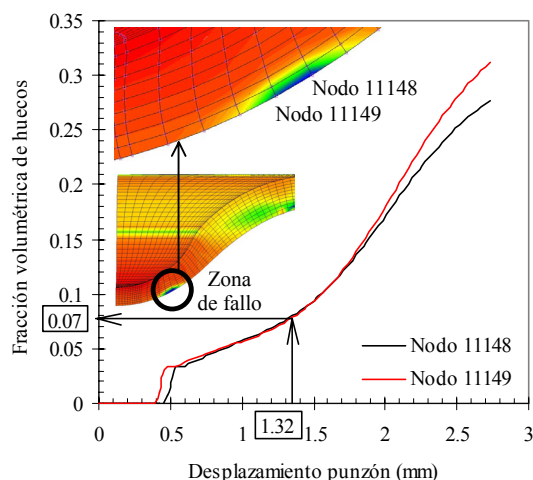


Figura 7 Fracción volumétrica de huecos en la simulación con  $\epsilon_n$  y  $f_N$

#### 5.4. Determinación de $f_F$

Una vez determinado el valor de  $f_c$  y alcanzado el punto de carga máxima, la forma de la curva en la zona 5 es gobernada por el valor de  $f_F$ , variando este valor la velocidad de coalescencia de huecos también variará. Se han realizado varias simulaciones variando el parámetro  $f_F$  para comprobar cual se ajusta mejor a los datos experimentales, en la Figura 8 se puede observar que para  $f_F=0.1$  se obtiene un buen ajuste de los datos experimentales.

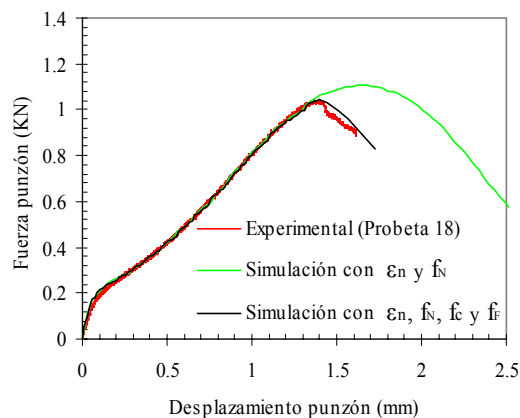


Figura 8 Comparación experimental-simulación con  $\epsilon_n$ ,  $f_N$ ,  $f_c$  y  $f_F$

## 6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha desarrollado una metodología para la identificación de los parámetros de daño del modelo de Gurson-Tvergaard a partir de la curva carga-desplazamiento obtenida en el ensayo de

Small Punch. La Tabla 4 muestra los valores de dichos parámetros obtenidos con la metodología desarrollada para un acero grado A (Lloyd's) utilizado en construcción naval. Dicha metodología permite simular correctamente los ensayos de Small Punch.

Tabla 4 Parámetros de daño del modelo de Gurson-Tvergaard para la simulación del SPT

| $q_1$ | $q_2$ | $f_0$ | S    | $\epsilon_n$ | $f_N$  | $f_c$ | $f_F$ |
|-------|-------|-------|------|--------------|--------|-------|-------|
| 1.5   | 1     | 0     | 0.01 | 0.1979       | 0.0294 | 0.07  | 0.1   |

Se ha comprobado que los parámetros de material empiezan a tener influencia sobre la curva carga-desplazamiento, obtenida en el SPT, en las diferentes zonas en las que se puede dividir la curva, permitiendo así su identificación a partir de la curva experimental. El cálculo del frente Pareto para la determinación de  $\epsilon_n$  y  $f_N$  es un método factible con el que se ha obtenido un buen ajuste de los datos experimentales, por lo que será el método utilizado en la determinación de  $\epsilon_n$  y  $f_N$ . El procedimiento presentado debe ser realizado para cada material, y en principio, para cada espesor y temperatura de ensayo, analizando de esta manera el efecto de la triaxialidad en los parámetros de daño del material.

## REFERENCIAS

- [1] Fleury E. et al., "Small Punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant (I-II)", International Journal of Pressure Vessels and Piping 75 (1998) 699-713.
- [2] Campitelli E. et al., "Assessment of the constitutive properties Form small ball punch test: experiment and modeling", Journal of Nuclear Materials 335 (2004) 366-378.
- [3] Mao X. et al., "Estimation of mechanical properties of irradiated nuclear pressure vessel steel by use of subsized CT specimen and Small Punch specimen", Scripta Metallurgica et Materialia Vol. 25 (1991) 2487-2490.
- [4] Autillo J. et al., "Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (Small Punch Test) en la caracterización mecánica de aceros", Anales de Mecánica de Fractura Vol. I (2006) 77-83.
- [5] Gurson A.L., "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile materials", Journal of Engineering Materials and Technology 99 (1977) 2-15.
- [6] MSC.Marc Volume A Theory and User Information, Chapter 7, 152-154.
- [7] Abendroth M. et al., "Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the Small Punch test and neural networks", Computational Materials Science 28 (2003) 633-644.
- [8] Mathieu D. et al., NEMROD, LPRAI, Marsella. <http://www.nemrodw.com>
- [9] Ortiz M.C., Sarabia L.A., Herrero A. and Sánchez M.S., "Vectorial optimization as a methodological alternative to desirability function", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 83 (2006) 157-168.