

DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE COLAPSO PLÁSTICO A TRAVÉS DE SUPERFICIES DE RESPUESTA EN PROBETAS SPT PREFISURADAS

I.I. Cuesta¹, J.M. Alegre¹, P.M. Bravo¹

¹Grupo de Integridad Estructural, Universidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior
C/Villadiego s/n, 09001, Burgos
E-mail: iicuesta@ubu.es

RESUMEN

El ensayo miniatura de punzonado (SPT) sobre probetas prefisuradas tiene por objetivo la obtención de las propiedades a fractura del material (K_{mat}) cuando no se dispone de suficiente material para la realización de ensayos convencionales. La aplicación de los procedimientos de integridad estructural, a través del uso del diagrama de fallo (FAD), permiten evaluar cuando un componente fisurado alcanza la rotura. La combinación de los ensayos de probetas SPT prefisuradas con el diagrama FAD permite estimar la tenacidad a fractura del material. Para poder aplicar esta metodología uno de los parámetros que es necesario determinar es la carga de colapso plástico (P_U) de las probetas SPT prefisuradas, para conocer la coordenada L_r en el diagrama FAD. Una forma habitual de obtener dicha carga es mediante la simulación numérica de la probeta fisurada. El presente trabajo aporta una expresión para obtener P_U en probetas SPT prefisuradas, que pueda ser utilizada sin necesidad de realizar la simulación numérica. Dicha expresión ha sido calculada aplicando técnicas de superficie de respuesta basada en el diseño de experimentos, para materiales cuya ley de comportamiento se ajusta a una ecuación tipo Ramberg-Osgood. La expresión permite obtener la carga de colapso plástico en función de las dimensiones de la probeta y de los parámetros elastoplásticos del material, cubriendo el rango habitual de comportamiento de los aceros.

ABSTRACT

The main objective of the Small Punch Test (SPT) using pre-cracked specimens is to determine the fracture properties of the material (K_{mat}) when there is not enough material for conducting conventional tests. The accomplishment of the structural integrity procedures, through the Failure Assessment Diagram (FAD), allows predicting the failure of cracked components. In this sense, the combination of pre-cracked SPT specimens and the FAD allows the fracture toughness of the material to be estimated. In order to apply this methodology it is necessary to calculate the plastic collapse load (P_U) of the pre-cracked SPT specimens, so the load ratio L_r of the FAD is determined. The common method to calculate this load is performing a numerical simulation of the cracked geometry. This paper provides a closed expression for P_U in pre-cracked SPT specimens, which can be used avoiding the necessity to perform a finite element numerical simulation. This expression has been calculated using response surface models based on the experiment design for materials whose behavior follows a Ramberg-Osgood equation. The expression provides the plastic collapse load as a function of the specimen dimensions and the elastoplastic material parameters, covering the common behavior range of the steels.

KEY WORDS: Ensayo Small Punch, Diagrama FAD, Superficie de Respuesta.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de probetas miniatura (SPT) consiste básicamente en un punzonado sobre una probeta cuadrada o circular de reducidas dimensiones, mediante un punzón de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada por dos matrices.

En las últimas décadas han sido muchos los investigadores que han utilizado el SPT con el fin de obtener las propiedades de fractura de un material, en

los casos que no se dispone de material suficiente para poder realizar ensayos normalizados, como por ejemplo en el caso de soldaduras o material irradiado. La gran mayoría de los trabajos [1-5] sobre este tema hasta el momento han sido realizados con probetas convencionales de SPT, siendo muy pocos los autores que han utilizado probetas prefisuradas [6-8].

Por otro lado, dentro del campo de la integridad estructural, se está imponiendo el uso de diagramas de fallo (FAD), los cuáles permiten establecer cuando un

componente fisurado alcanza las condiciones de rotura. Es un gráfico de doble entrada, donde en el eje horizontal esta representando el grado de plastificación alcanzado por la probeta en el instante de fallo, a través de un parámetro denominado ratio de carga (L_r). El eje vertical representa el ratio del factor de intensidad de tensiones alcanzado en el instante de fallo, normalizado con respecto a la tenacidad a fractura del material (K_{mat}), quedando descrito a través del ratio de tenacidad (K_r).

El presente trabajo nace de la necesidad de mejorar la aplicabilidad de la metodología desarrollada en un trabajo previo [8], la cuál combina los resultados obtenidos en el SPT sobre probetas prefisuradas con el diagrama FAD para la evaluación de la tenacidad a fractura del material analizado, apoyándose el estudio en la simulación numérica. El esquema de dicha metodología se puede consultar en la Figura 1.

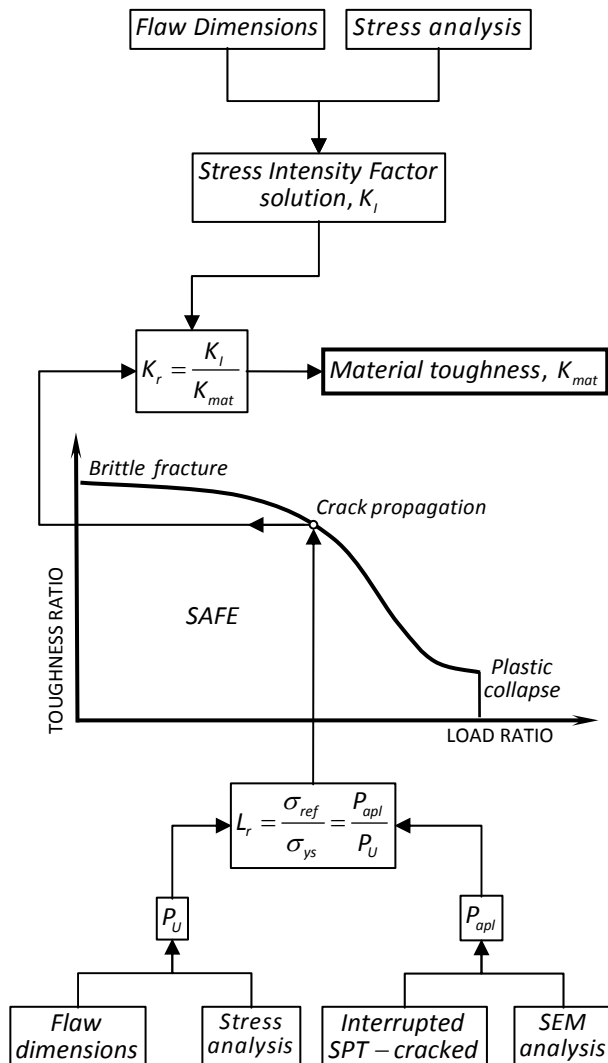


Figura 1. Esquema de la metodología para la evaluación de K_{mat} [8].

Como se puede comprobar, dicha metodología gira entorno al uso del diagrama de fallo, donde la entrada vertical K_r es desconocida, al serlo K_{mat} , por lo que se comienza entrando en el diagrama FAD por el eje horizontal. Para ello, el primer paso a realizar es la determinación mediante simulación numérica, de la carga de colapso plástico de la probeta fisurada (P_U), y de la carga aplicada sobre la probeta en el punto de inicio de la propagación de la fisura (P_{apl}) que puede obtenerse a partir de la realización de ensayos interrumpidos de SPT prefisurados y su posterior análisis fractográfico.

El objetivo de este trabajo es aportar una expresión para obtener P_U en probetas SPT prefisuradas, que pueda ser utilizada sin necesidad de realizar la simulación numérica, permitiendo de esta manera el uso de la metodología de la Figura 1 en aquellos casos que no se disponga de los medios necesarios para llevar a cabo una simulación numérica con la que determinar el valor de la carga de colapso plástico P_U .

2. PROBETAS SPT PREFISURADAS

En el desarrollo de la presente investigación, al igual que en el trabajo previo [8], se han utilizado probetas SPT prefisuradas, de dimensiones 20x20x1mm y con una fisura inicial de tipo longitudinal no pasante, como se puede ver en la Figura 2.

La generación de la fisura inicial en las probetas SPT, previa al ensayo, se ha realizado a través de microfisuración por láser. Tras una calibración inicial, el láser, en forma de haz de pulsos de diámetro 30μm, es aplicado longitudinalmente a partir de la cara inferior, desde el centro de un lado de la probeta hacia el centro del lado opuesto.

Para la realización de los ensayos SPT interrumpidos se pueden utilizar probetas SPT prefisuradas con diferentes profundidades de fisura (a). Dicha profundidad se puede adimensionalizar con respecto al espesor de probeta (t), obteniendo de esta manera diferentes valores de la relación a/t , siendo los más habituales valores teóricos de a/t entre 0.2 y 0.5.

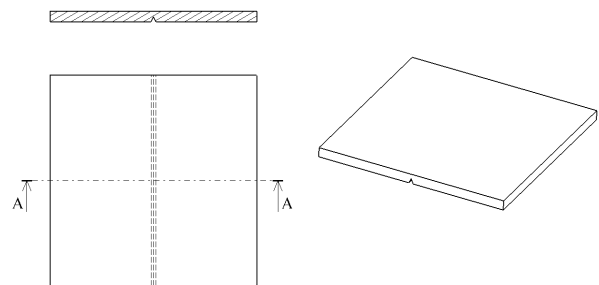


Figura 2. Probeta SPT prefisurada.

3. SIMULACION NUMERICA DE P_U

Para determinar la carga de colapso plástico de la probeta SPT prefisurada P_U , es habitual efectuar un análisis por elementos finitos de la geometría fisurada. Existen dos definiciones posibles de la carga de colapso plástico, el colapso global y el colapso de la sección neta. En el presente trabajo se ha utilizado el segundo de los procedimientos, por considerarse más preciso el resultado obtenido [9]. Este procedimiento requiere la realización de un cálculo elastoplástico con contactos.

El software elegido para la realización de esta tarea ha sido el programa MSC.Marc [10]. Debido a la simetría que presenta el SPT con probeta prefisurada se ha modelizado un cuarto de la geometría en 3D con elementos hexaédricos de 8 nodos (HEX 8), utilizando los planos YZ y ZX como planos de simetría, como se puede ver en la Figura 3. El punzón y las matrices inferior y superior se han modelado como superficies rígidas. El cálculo se ha controlado a través del desplazamiento del punzón, imponiendo un valor de este, similar al de los ensayos SPT experimentales. El material de la probeta se ha considerado como elastoplástico. Se utilizarían los datos experimentales de la curva tensión-deformación para obtener las propiedades elásticas, como son el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), el límite elástico del material (σ_0) y las propiedades plásticas del material.

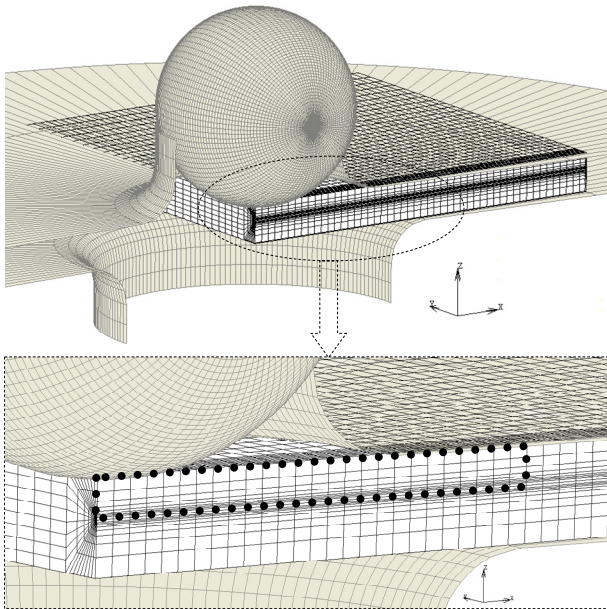


Figura 3. Modelado de la probeta SPT prefisurada y detalle de la sección neta central del plano de fisura.

Una vez realizado el cálculo, se procede a evaluar la carga para la que se alcanza la deformación plástica generalizada en la sección neta central del plano de fisura de la probeta. La cuál corresponde a la parte que no está empotrada por las matrices superior e inferior,

como se puede ver en la Figura 3 para una de las simulaciones efectuadas, coincidiendo con el área del rectángulo punteado de la figura. El valor de esta carga se considerará como P_U cuando la deformación plástica equivalente alcance el valor de 0.002 en todos los puntos de la sección neta central.

4. SUPERFICIE DE RESPUESTA DE P_U

Desde un punto de vista práctico, y para la posible aplicación ingenieril de la metodología propuesta, sería conveniente evitar la realización del cálculo elastoplástico comentado cada vez que se desee aplicar dicha metodología, lo cuál supondría una considerable reducción de los recursos de software necesarios y del tiempo de aplicación. Para tal fin, en este trabajo se han utilizado las técnicas de superficie de respuesta basadas en el diseño de experimentos, las cuáles permiten obtener una función con la que estimar el valor de P_U de una forma directa, para cualquier tipo de acero cuya ley de comportamiento se ajuste a una ecuación tipo Ramberg Osgood [11] definida por la expresión (1), siempre y cuando sus parámetros característicos estén dentro del rango de valores aquí considerados.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + K_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (1)$$

Donde K_1 y n son parámetros que describen el comportamiento plástico del material. Introduciendo el límite elástico σ_0 y un nuevo parámetro $\alpha = K_1 \cdot (\sigma_0 / E)^{n-1}$, la parte plástica de la ecuación (1) se puede sustituir por la expresión (2), quedando redefinida la ecuación de Ramberg Osgood según la expresión (3).

$$K_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n = \frac{\alpha \cdot \sigma_0}{E} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\alpha \cdot \sigma_0}{E} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3)$$

La utilización del modelo de Ramberg Osgood implica que la deformación plástica está presente incluso para pequeños niveles de tensión, aunque es prácticamente despreciable comparada con la deformación elástica.

Por otro lado, para niveles de tensión superiores a σ_0 , la deformación plástica comienza progresivamente a ser mayor que la deformación elástica. Cuando $\sigma = \sigma_0$ según la expresión (3) se obtiene que $\varepsilon = (1 + \alpha) \cdot \sigma_0 / E$, obteniendo las componentes elástica y plástica de la deformación tal y como se puede observar en la Figura 4.

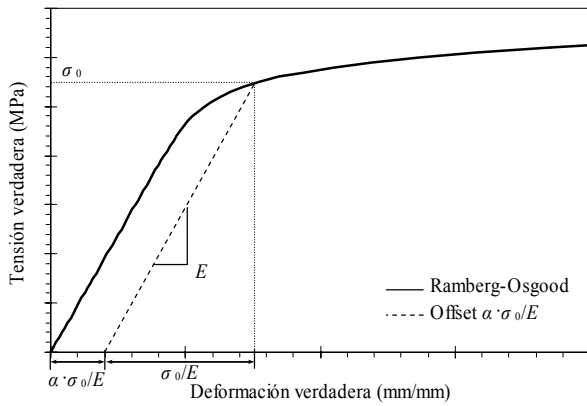


Figura 4. Curva tensión-deformación típica del modelo de Ramberg Osgood.

Comúnmente en los aceros se acepta que la deformación plástica comienza a tenerse en cuenta cuando esta alcanza un valor del 0.2%, es decir, cuando el término $\alpha \cdot \sigma_0 / E = 0.002$, con lo que el modelo de Ramberg Osgood definido en (3) puede ser simplificado según la expresión (4), en la que $\sigma_0 = \sigma_{0.2}$.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (4)$$

Donde $\sigma_{0.2}$ es el límite elástico para una deformación plástica del 0.2%, y n es un parámetro que suele variar entre 4 y 50 para la mayoría de los aceros [11]. De esta manera queda definido el comportamiento del material a través de los parámetros E , $\sigma_{0.2}$ y n . Los parámetros $\sigma_{0.2}$ y n son fundamentales a la hora de establecer el valor de la carga de colapso plástico.

Antes de proceder a la determinación de la superficie de respuesta es necesario apuntar una primera reflexión sobre los parámetros que influyen en el valor de P_U . Dichos parámetros se pueden englobar en dos grandes grupos, que denominaremos parámetros elastoplásticos del material y parámetros geométricos. Todos ellos aparecen recogidos en la Tabla 1.

Resulta evidente que es extremadamente complicado obtener una superficie de respuesta que englobe la variación de todos estos parámetros, por lo que es necesario fijar algunos de ellos. Siguiendo un criterio de economía de costes, resulta justificado fijar los parámetros geométricos, dependientes del utillaje, así como el espesor de probeta asignado a cada utillaje. La profundidad de la fisura inicial a , es una dimensión claramente variable no solo por las propias variaciones asociadas al mecanizado de la misma, sino también porque su tamaño constituye uno de los parámetros fundamentales del proceso de fractura, se ha tenido en cuenta a través de la relación a/t .

Tabla 1. Parámetros influyentes en el valor de P_U .

Parámetros elastoplásticos	Parámetros geométricos
E	Profundidad fisura (a)
ν	Dimensiones probeta ($b \times b \times t$)
$\sigma_{0.2}$	Diámetro del punzón (d)
n	Diámetro matriz inferior ($d_{m\text{inf}}$)
	Radio de acuerdo matriz inf. (r)

De los parámetros elastoplásticos del material, los únicos que se han fijado han sido el coeficiente de Poisson y el módulo de Young, cuyo efecto en el valor de P_U se ha comprobado irrelevante, mientras que a los demás se los ha hecho variar entre los valores típicos para los aceros. La Tabla 2 recoge tanto los intervalos de valores considerados como los valores fijos de los parámetros con los que se ha trabajado para la obtención de la superficie de respuesta de P_U , para la probeta de 20x20x1mm.

Tabla 2. Valores de los parámetros influyentes en el valor de P_U .

Parámetros fijos		Parámetros variables	
ν	0.29	a/t	[0.1,0.7]
E (MPa)	200000	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	[200,1400]
$b \times b \times t$ (mm)	20x20x1	n	[4,50]
d (mm)	5		
$d_{m\text{inf}}$ (mm)	8		
r (mm)	1		

Los parámetros a/t , $\sigma_{0.2}$ y n son los que van a gobernar la superficie de respuesta de P_U ya que los demás permanecen fijos. La relación existente entre estos tres parámetros y el valor de P_U se puede expresar como $P_U = f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$, donde f se postula como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (5), en la que a/t^* , $\sigma_{0.2}^*$ y n^* son las variables codificadas de a/t , $\sigma_{0.2}$ y n respectivamente. La codificación de los valores reales de los parámetros es necesaria para que todos ellos varíen en el mismo intervalo, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$. Para cualquier valor real X_i de los parámetros variables, dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (6), obteniendo el valor codificado x_i correspondiente. Donde $X_{iN\text{Inf}}$ es el valor real del nivel más bajo del factor i , X_{iNSup} es el valor

real del nivel más alto del factor i , y \tilde{X}_i es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor i .

$$f\left(\frac{a^*}{t}, \sigma_{0.2}^*, n^*\right) = b_0 + b_1 \frac{a^*}{t} + b_2 \sigma_{0.2}^* + b_3 n^* + b_{11} \frac{a^{*2}}{t} + b_{22} \sigma_{0.2}^{*2} + b_{33} n^{*2} + b_{12} \frac{a^*}{t} \sigma_{0.2}^* + b_{13} \frac{a^*}{t} n^* + b_{23} \sigma_{0.2}^* n^* \quad (5)$$

$$x_i = \frac{2 \cdot 1.682 \cdot (X_i - \tilde{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} \quad i = \frac{a^*}{t}, \sigma_{0.2}^*, n^* \quad (6)$$

La determinación de los coeficientes de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$ se va a realizar a través de un diseño de experimentos central compuesto [12-14], utilizando el software NEMRODW [15] para la estimación de dichos coeficientes. Las principales características de este diseño son:

- Utilización de tres factores, los cuáles son los parámetros a/t^* , $\sigma_{0.2}^*$ y n^* .
- Dominio esférico de radio clásico, el valor del radio para tres factores es 1.682.
- Codificación de los intervalos de valores de los tres factores recogidos en la Tabla 2 para que varíen en $[-1.682, 1.682]$, según la expresión (6).
- Matriz de experimentos composite, la cuál tiene cinco niveles para cada factor.
- Sin repeticiones en el punto central del dominio (Nº de experimento 15), ya que no tiene sentido al utilizar la simulación numérica para obtener el valor de P_U .
- Utilización de la expresión (5) para el ajuste de la superficie de respuesta.

La Tabla 3 recoge, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$. Cada uno de los experimentos del plan de experimentación se realiza a través de una simulación numérica tal y como se recoge en el apartado 3 del presente estudio, con la única salvedad que los valores de a/t , $\sigma_{0.2}$ y n son los recogidos en la Tabla 3, obteniendo como resultado final de cada experimento el valor de P_U , incluido en esa misma tabla.

Una vez obtenidos estos valores de P_U , con la ayuda de NEMRODW, es posible determinar los coeficientes de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$, los cuáles se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Diseño de experimentos realizado.

N° $exp.$	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			
	a/t^*	$\sigma_{0.2}^*$	n^*	a/t	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	P_U (kN)
1	-1	-1	-1	0.222	443	13.33	2.50
2	1	-1	-1	0.578	443	13.33	1.46
3	-1	1	-1	0.222	1157	13.33	8.50
4	1	1	-1	0.578	1157	13.33	4.12
5	-1	-1	1	0.222	443	40.67	2.28
6	1	-1	1	0.578	443	40.67	1.35
7	-1	1	1	0.222	1157	40.67	7.82
8	1	1	1	0.578	1157	40.67	3.86
9	-1.682	0	0	0.1	800	27	5.62
10	1.682	0	0	0.7	800	27	2.56
11	0	-1.682	0	0.4	200	27	0.78
12	0	1.682	0	0.4	1400	27	7.03
13	0	0	-1.682	0.4	800	4	4.80
14	0	0	1.682	0.4	800	50	3.59
15	0	0	0	0.4	800	27	3.64

Tabla 4. Coeficientes de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$.

Coeficiente	Valor	Significación (%)
b_0	3.664	0.0273***
b_1	-1.132	0.0149***
b_2	1.993	<0.01***
b_3	-0.243	7.8
b_{11}	0.130	46.6
b_{22}	0.065	71.0
b_{33}	0.168	35.6
b_{12}	-0.797	0.262**
b_{13}	0.068	65.5
b_{23}	-0.077	61.4

Al 99% de confianza los coeficientes significativos para la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$ son los que se han marcado con asteriscos en función del grado de significación, siendo los más significativos los coeficientes b_0 , b_1 y b_2 . Los coeficientes que no son significativos contribuyen a curvar correctamente la superficie de respuesta, por lo que no es conveniente eliminarlos de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$. La regresión es muy significativa estadísticamente (p-valor < 10^{-4}) y explica el 99.7% de la varianza de P_U .

Analizando la Tabla 4 podemos concluir que el parámetro más influyente en el valor de P_U es $\sigma_{0.2}$, donde un aumento de este supondría un aumento de P_U , ya que el coeficiente b_2 es positivo. El segundo parámetro influyente es la relación a/t , donde un aumento de esta equivaldría a una disminución en el valor de P_U , ya que el coeficiente b_1 es negativo. El parámetro n no es relevante en el valor de P_U ya que su coeficiente b_3 no es significativo, lo que supone una ventaja a la hora de calcular su valor, ya que se puede establecer cierto margen de error porque su posible variación no va a influir significativamente en el valor estimado de P_U . Por último, se podría comentar que ni las interacciones entre los parámetros ni su efecto al cuadrado son significativos en el valor de P_U , a excepción del coeficiente b_{12} , correspondiente a la interacción entre a/t y $\sigma_{0.2}$. Dado que su valor es negativo, un aumento del producto entre a/t y $\sigma_{0.2}$ supondría una disminución del valor de P_U , sin tener en cuenta el efecto de cada uno de estos parámetros por separado.

A partir de la función $f(a/t^*, \sigma_{0.2}^*, n^*)$ que ajusta adecuadamente los valores de P_U obtenidos en el diseño, es posible determinar el valor de P_U para cualquier combinación de valores de los parámetros a/t , $\sigma_{0.2}$ y n , previa codificación, siempre y cuando nos encontremos dentro del dominio esférico definido anteriormente para este diseño. La expresión (7) representa la superficie de respuesta de P_U obtenida a partir de los coeficientes de la Tabla 4 para la probeta SPT prefisurada de dimensiones 20x20x1mm.

$$f\left(\frac{a}{t}^*, \sigma_{0.2}^*, n^*\right) = 3.664 - 1.132 \frac{a}{t}^* + 1.993 \sigma_{0.2}^* - 0.243 n^* + 0.13 \left(\frac{a}{t}^*\right)^2 + 0.065 \sigma_{0.2}^{*2} + 0.168 n^{*2} - 0.797 \frac{a}{t}^* \sigma_{0.2}^* + 0.068 \frac{a}{t}^* n^* - 0.077 \sigma_{0.2}^* n^* \quad (7)$$

5. CONCLUSIONES

Para la probeta analizada se ha obtenido una superficie de respuesta, que contempla el efecto de las propiedades elastoplásticas del material y de la geometría de la fisura en el valor de la carga de colapso plástico P_U . De este modo la metodología desarrollada previamente [8], definida en el esquema de la Figura 1, puede aplicarse sin necesidad de tener que realizar el complejo cálculo numérico de P_U . Uno de los trabajos futuros a desarrollar, que permita facilitar aun más la aplicación de dicha metodología, es la determinación de una

expresión para obtener el valor del factor de intensidad de tensiones K_I , sin necesidad de recurrir a la simulación numérica por parte del usuario final.

En el caso de tener que determinar P_U para otras configuraciones de probeta, del utillaje de ensayo o material, se podría proceder de manera análoga a la aquí recogida. Simplemente estableciendo de nuevo los valores de los parámetros fijos y el rango de variación de los variables, y siguiendo el procedimiento utilizado en el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida del proyecto MCI Ref: MAT2008-06879-C03-03/MAT.

REFERENCIAS

- [1] X. Mao and H. Takahashi, *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk small punch tests*, Journal of Nuclear Materials 150 (1987), 42-52.
- [2] X. Mao, H. Takahashi and T. Kodaira, *Supersmall punch test to estimate fracture toughness Jic and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel*, Materials Science and Engineering, A150 (1992), 231-236.
- [3] Maribel L. Saucedo-Muñoz, Shi Cheng Liu, Toshiyuki Hashida, Hideaki Takahashi, Hideo Nakajima, *Correlation between JIC and equivalent fracture strain determined by small-punch tests in JN1, JJ1 and JK2 austenitic stainless steels*, Cryogenics 41 (2001), 713-719.
- [4] A. Shekhter, S. Kim, D.G. Carr, A.B.L. Croker, S.P. Ringer, *Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, Klc fracture toughness and small punch test*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 79 (2002), 611-615.
- [5] Jai-Man Baik, J. Kameda, and O. Back, *Small Punch Test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel*, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 17 (1983), 1443-1447.
- [6] Jang-Bog Ju, Jae-il Jang, Dongil Kwon, *Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80 (2003), 221-228.
- [7] I. I. Cuesta, J. M. Alegre, R. Lacalle, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, *Cálculo de la integral J en probetas SPT para la estimación de la tenacidad a fractura*, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II (2008), 486-491.
- [8] I. I. Cuesta, J. M. Alegre, P.M. Bravo, *Evaluación de la tenacidad a fractura mediante la combinación del diagrama FAD y de ensayos SPT sobre probetas fisuradas*, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II (2009), 382-387.
- [9] ASME, *API 579-1/ASME FFS-1, in Fitness-For-Service*, American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [10] MSC.Marc Volume A, *Theory and User Information*, Chapter 5, Fracture Mechanics.
- [11] Ramberg W. y Osgood W. R., *Description of stress-strain curves by three parameters*, Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics (1943), Washington DC.
- [12] Khuri A. I. y Cornell J. A., *Response surfaces. Design and analyses*, Statistics: Textbooks and monographs. 81, Marcel Dekker (1987). New York.
- [13] Kuehl R. O., *Diseño de experimentos*, International Thomson (2001).
- [14] Montgomery D. C., *Diseño y análisis de experimentos*, Grupo Editorial Iberoamérica (1991).
- [15] Mathieu D. et al., NEMRODW, LPRAI, Marsella. <http://www.nemrodw.com>.