

METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA DINÁMICA. APLICACIÓN A UN ACERO ESTRUCTURAL

N. García, D. Cendón, F. Gálvez, V. Sánchez-Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,
28040 Madrid, España.
E-mail: fgalvez@mater.upm.es

RESUMEN

Este trabajo propone una nueva metodología para la obtención de la tenacidad de fractura dinámica en materiales cuyo comportamiento en fractura dinámica se puede asimilar al elástico y lineal. La metodología se basa en el ensayo de flexión en tres puntos en barra Hopkinson. Consiste en obtener la historia del factor de intensidad de tensiones y determinar el tiempo en el que se inicia la propagación de la fisura. Para ello es necesario medir la deformación en un lugar próximo a la punta de la fisura mediante cualquier técnica de extensometría aplicable a alta velocidad de deformación. La nueva metodología se basa en la proporcionalidad entre la deformación de la probeta y el factor de intensidad de tensiones en condiciones dinámicas en puntos cercanos a la punta de la fisura. Para determinar con precisión el instante de rotura, se empleó una técnica mixta contraponiendo la medida de COD con la deformación de la probeta en un lugar determinado. La metodología se ha aplicado con éxito al acero estructural ArmoX 500T, obteniéndose unos valores de tenacidad de fractura dinámica muy similares a los valores de tenacidad de fractura estática de este material, en línea con lo esperable para un acero de alta resistencia.

ABSTRACT

This work proposes a new methodology to obtain the dynamic toughness of materials that behave linear elastic. The methodology is based on the three point bending test on a Hopkinson bar. It consists in obtaining the history of the stress intensity factor and measure the instant when the crack starts to propagate. To reach this, it is necessary to measure the strains near the crack tip using any technique applicable at high strain rate. The methodology is based on the proportionality between the strains and the stress intensity factor near the crack tip. To measure with enough precision the failure time a mixed technique was used, representing the COD against strains near the crack tip. This methodology has been successfully applied to the steel ArmoX500, and similar values of the dynamic toughness have been obtained when compared to static. This result was as expected, since this is a very high strength steel with a negligible strain rate effect.

PALABRAS CLAVES: Alta velocidad de deformación, Tenacidad de Fractura Dinámica, Acero de Blindajes, Correlación digital de imágenes, Barra Hopkinson.

1. INTRODUCCIÓN

Resulta de gran importancia conocer las propiedades mecánicas de materiales estructurales a alta velocidad de deformación a la hora de estudiar fenómenos tales como explosiones, impactos de proyectiles, ondas de presión, etc. En especial, la tenacidad de fractura en régimen dinámico (K_{Icd}) debe tenerse en cuenta en el diseño de elementos estructurales con una extensa superficie de material expuesta al daño, como sucede por ejemplo en blindajes de protección de vehículos o instalaciones frente a explosiones. En este caso, los defectos o grietas presentes en el material pueden reducir su resistencia, la cual no puede ya ser estimada simplemente en base a los parámetros de resistencia a tracción, sino que debe estar caracterizada también por la tenacidad de fractura dinámica. A pesar de su gran relevancia, la fractura en régimen dinámico no ha sido muy estudiada hasta el momento. Así como en régimen estático, la metodología de obtención de la tenacidad de fractura está recogida en una serie de normas ampliamente utilizadas, en régimen dinámico no existe

todavía ningún procedimiento comúnmente aceptado y validado. Esto se debe a que la obtención de K_{Icd} presenta dificultades tales como el carácter de pulso de onda de la tensión aplicada y la falta de equilibrio en la probeta. El problema ha sido abordado por parte de algunos investigadores, entre los cuales puede citarse a Weisbrod y Rittel [1], mediante metodologías mixtas experimental-numéricas. Éstas proponen elaborar numéricamente la historia del factor de intensidad de tensiones $K_I(t)$ por un lado y determinar de manera experimental el instante de rotura por otro. El valor del factor de intensidad de tensiones en el instante justo de rotura proporcionaría la tenacidad de fractura dinámica $K_{Icd} = K_I(t_R)$. Sin embargo, los autores de este trabajo intentaron aplicar este método sobre el acero ArmoX 500T en anteriores estudios [2] sin obtener resultados satisfactorios [3]. Siguiendo en esta línea de trabajo, se identificó un factor crítico principal: las simulaciones numéricas del ensayo no eran lo suficientemente representativas en cuanto a los tiempos de propagación de las ondas. En efecto, medir experimentalmente el tiempo de rotura requiere una gran precisión, tanto en

los procedimientos experimentales como en las simulaciones numéricas. Sin embargo, el tiempo en la simulación obtenido en nuestro estudio, presentaba un adelanto con respecto al tiempo medido en el ensayo real, lo cual invalidaba las medidas encontradas. La dificultad radicaba esencialmente en simular numéricamente los contactos entre la probeta ensayada y el dispositivo experimental, factores clave a la hora de reproducir tiempos, como se comprobó posteriormente [4]. A la vista de esto, se ha desarrollado una nueva metodología que no presenta los problemas encontrados en las metodologías experimental-numéricas y que es, en principio, aplicable a cualquier material elástico y lineal. Dicha metodología se presenta a continuación.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y METODOLOGÍA PROPUESTA

En régimen estático, existe proporcionalidad entre la carga aplicada y el factor de intensidad de tensiones [5], según:

$$K_I = G(\text{geom})P\sqrt{a} \quad (1)$$

Siendo G una función que depende de la geometría, a el tamaño de fisura y P la carga aplicada.

Particularizando esto para una probeta con un tamaño inicial de fisura y una geometría dados, se tiene:

$$K_I = \beta \cdot P \quad (2)$$

Siendo β el factor de proporcionalidad entre la carga aplicada P y el factor de intensidad de tensiones K_I para esa probeta. Por otra parte, por estar en régimen elástico y lineal, existe proporcionalidad entre la carga aplicada P y la deformación ε medida en cualquier punto de la probeta. Es decir:

$$P = \alpha \cdot \varepsilon \quad (3)$$

De las expresiones (2) y (3), se puede obtener la proporcionalidad entre el factor de intensidad de tensiones y la deformación de la probeta medida en cualquier punto, según:

$$K_I = \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Sin embargo en régimen dinámico esta relación deja de ser válida debido a varios factores. Por una parte, tiene que transcurrir un cierto tiempo desde que se aplica la carga hasta que las tensiones alcanzan la punta de la fisura. Por otra parte, las fuerzas de inercia no son despreciables. Sólo parte de la carga aplicada se invierte en inducir un campo tensional en la punta de la fisura, ya que el resto se requiere para poner en movimiento la probeta.

No obstante, en puntos muy cercanos a la punta de fisura, sí puede verificarse la proporcionalidad descrita en (4). Esto se debe a que la menor distancia entre el punto de medida de la deformación y la punta de fisura anula prácticamente el efecto de retardo en la propagación de las ondas, a la vez que reduce drásticamente la masa a movilizar, lo cual establece unas condiciones muy similares al caso estático.

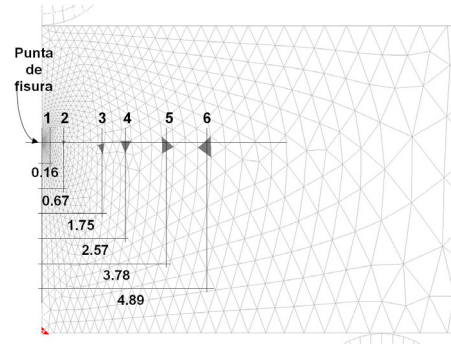


Figura 1. Puntos correspondientes a seis elementos de la malla de la probeta y sus respectivas distancias (en mm) a la punta de fisura

Todo esto se ha comprobado en el presente trabajo mediante simulaciones numéricas del ensayo, tanto en régimen estático como en dinámico. Así, se sometió la probeta a un desplazamiento del punto de aplicación de carga similar al que experimenta la probeta en el ensayo real y se extrajo la historia del factor de intensidad de tensiones y la historia de deformaciones, en una serie de elementos cada vez más alejados de la punta de fisura, como puede verse en la Figura 1.

Representando K_I frente a la deformación en cada elemento, se obtuvo su coeficiente de proporcionalidad, tanto en estático y en dinámico, como puede verse en la Figura 2. Así en régimen estático, se apreció una linealidad a cualquier distancia de la punta de fisura, mientras que en dinámico esta proporcionalidad sólo se cumplió a pequeñas distancias de la punta de fisura. Para el material utilizado, esta distancia límite en el punto de medición de la deformación se estableció en 2mm aproximadamente.

El fundamento teórico expuesto permite por tanto obtener un valor proporcional a K_I mediante la medida de la deformación en un punto situado a una distancia máxima de 2mm de la punta de fisura, en el caso de nuestro material. Teniendo en cuenta que el factor de proporcionalidad es el mismo en estático y en dinámico (Figura 2), basta obtener dicho factor de proporcionalidad, es decir, el producto $\alpha \cdot \beta$, en condiciones estáticas, para cada probeta. Para ello se registra la relación entre la carga aplicada y la deformación en el punto de medición mediante un ensayo estático a baja carga, sin llegar a propagar la fisura, obteniendo así el factor α . La relación entre la carga aplicada en régimen estático y el factor de intensidad de tensiones (factor β) se puede obtener mediante simulación numérica o en manuales. Multiplicando estos dos factores por la deformación de la probeta en condiciones dinámicas registrada durante el ensayo en el punto de medición, se obtiene la historia del factor de intensidad de tensiones dinámico. Identificando el instante de rotura en el ensayo dinámico de la manera que se describe a continuación, se puede conocer el valor de la tenacidad de fractura dinámica.

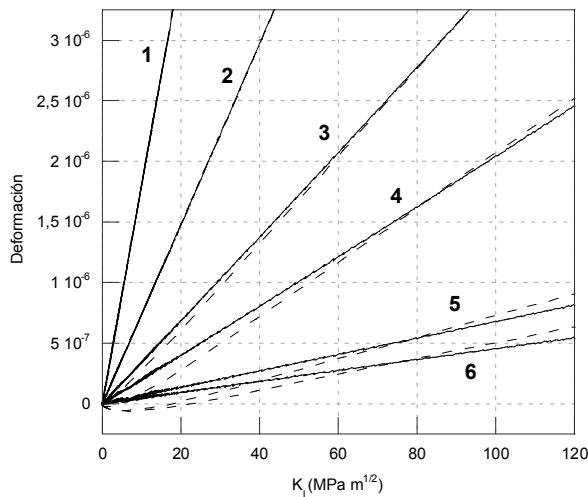


Figura 2. Deformaciones normales al plano de fisura de los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en función de K_I , en el caso estático (líneas continuas) y dinámico (líneas de puntos)

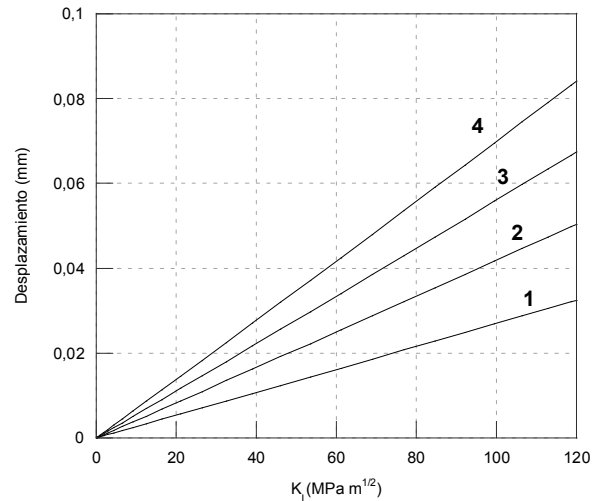


Figura 3. Desplazamientos normales al plano de fisura de los puntos 1, 2, 3 y 4 en función de K_I , en simulación dinámica.

2.1. Medición del tiempo de rotura

El tiempo de rotura ha sido siempre un punto crítico en el estudio de la fractura dinámica. En la nueva metodología elaborada este problema se resolvió mediante la sencilla confrontación de dos registros experimentales: la deformación en un punto cercano a la punta de fisura y la abertura de los labios de la entalla o COD. En efecto, ambos son proporcionales al factor de intensidad de tensiones y por tanto entre sí, hasta el momento de rotura. La proporcionalidad del COD con el factor de intensidad de tensiones se comprobó mediante simulación numérica como puede verse en la Figura 3, donde se representan los desplazamientos horizontales de varios puntos tomados a diferentes distancias a lo largo de la entalla, frente al factor de intensidad de tensiones en régimen dinámico.

Cuando la grieta se empieza a propagar, dicha proporcionalidad deja de existir. La deformación en el punto de medición tiende a disminuir, mientras que el COD tiende a aumentar, lo cual hace todavía más patente la pérdida de proporcionalidad entre ambos y la consiguiente identificación del instante de rotura. Para poder medir correctamente el COD, se decidió emplear un sistema de Correlación Digital de Imágenes (CDI en lo sucesivo) y una cámara de alta velocidad. La CDI es un método de extensometría sin contacto que correlaciona, mediante algoritmos, sucesivas imágenes tomadas en el ensayo, de manera a obtener mapas de desplazamientos y deformaciones en una zona seleccionada de la imagen. Para ello, se necesita pintar previamente la superficie de la probeta para que el programa pueda identificar con facilidad puntos de referencia.

Representando la deformación de la banda frente al COD, y aplicando a esta gráfica un criterio de pendientes al 95% similar al que indica la norma ASTM

para hallar la fuerza crítica en el gráfico Fuerza-abertura de fisura, se obtuvo la deformación a rotura, que nos reveló a su vez el instante de rotura.

En base a las ideas anteriores y a los dispositivos experimentales disponibles, la secuencia metodológica para obtener la tenacidad de fractura dinámica se establece del siguiente modo:

1. Preparación de las probetas. En una cara lateral, se pegó una banda extensométrica y en la otra se pintó según un patrón reconocible por el CDI.
2. Ensayo estático de calibración, sin llegar a rotura, para cada probeta, y obtención del factor α , que relaciona la carga estática aplicada y la deformación estática de la banda.
3. Ensayo dinámico de la probeta, grabando la cara pintada con cámara de video de alta velocidad y registrando la historia de la deformación dinámica de la banda frente al tiempo $\varepsilon(t)$.
4. Procesamiento con el CDI de las imágenes tomadas por la cámara y obtención del COD frente al tiempo. Determinación de la deformación y tiempo de rotura ε_r por comparación del COD frente a la deformación de la banda.
5. Medida del tamaño de fisura sobre la probeta rota, siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM E399.
6. Obtención del factor β , que relaciona la carga estática frente al factor de intensidad de tensiones, mediante simulación numérica estática, utilizando como input el tamaño de fisura medido y el desplazamiento de los apoyos registrado en el ensayo.
7. Determinación de la tenacidad de fractura dinámica multiplicando los tres factores obtenidos mediante la expresión:

$$K_{Icd} = \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_r \quad (5)$$

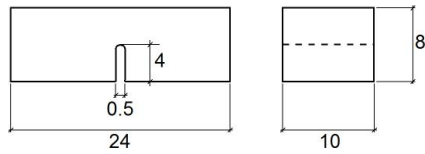


Figura 4. Geometría de las probetas (en mm)

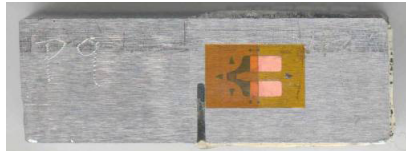


Figura 5. Probeta instrumentada

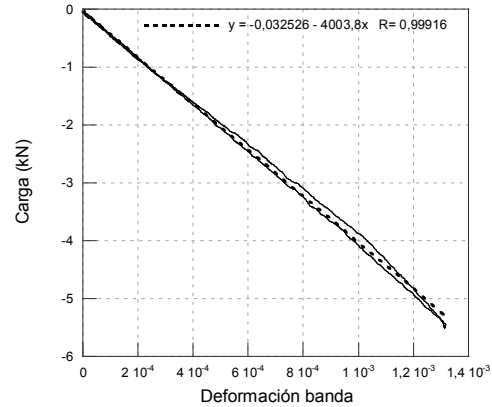


Figura 6. Obtención de α en la calibración estática

3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1. Material y probetas

La nueva metodología se aplicó sobre el acero de alta resistencia ArmoX 500T fabricado por la empresa sueca SSAB. Sus propiedades mecánicas, suministradas por el fabricante [6], se recogen en la Tabla 1 y sus ecuaciones constitutivas y criterio de rotura pueden encontrarse en [4]. Este material se utiliza como blindaje de vehículos, mostradores de bancos, protecciones contra robo, etc, y se eligió precisamente por la gran importancia de la tenacidad de fractura en sus aplicaciones.

Se utilizaron probetas de flexión en tres puntos de tipo Charpy, prefisuradas por fatiga según la norma ASTM E399 [7], con las dimensiones mostradas en la Figura 4 y fisuras propagadas al menos 1.5mm de profundidad.

Las probetas se prefisuraron utilizando una máquina servohidráulica y un sistema de monitorización de la fisura consistente en un telescopio y una cámara de video enfocada sobre la probeta.

Las probetas fueron instrumentadas por una cara (Figura 5), con una banda de pequeño tamaño de rejilla, colocada a 2mm de la fisura en horizontal, y a la altura de la punta de fisura en vertical.

El otro lado de la probeta se pintó de blanco con puntos negros, por ser éste el patrón que ofrecía mejores resultados en la CDI.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero ArmoX 500T

Módulo de elasticidad E	207 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad	7850 kg/m ³
Límite elástico	1250 MPa
Tensión de rotura	1450-1750MPa
Elongación	8%-10%
Dureza	480-540 HB
Velocidad de propagación de las ondas	5135 m/s

3.2. Calibración estática de la probeta: obtención de α

Los ensayos estáticos de calibración de flexión en tres puntos se llevaron a cabo en una máquina servohidráulica con una célula de carga de 25kN con un error menor de 25N. Se realizaron en control en desplazamiento con una velocidad de 0.1mm/min. Se alcanzó una carga de 6kN (equivalente a un factor de intensidad de tensiones de unos 50 MPa·m^{1/2}, un 60% aproximadamente de la tenacidad de fractura medida en régimen estático), y a continuación se descargó a la misma velocidad.

Con estos ensayos, se obtuvo la relación entre la carga aplicada y la deformación de la banda extensométrica, es decir, el factor α . La Figura 6 muestra un ejemplo de la relación carga-deformación medida mediante la banda extensométrica en una de las probetas ensayadas. El factor α es la pendiente de la recta de ajuste obtenida.

3.3. Ensayo dinámico: obtención de la deformación a rotura de la banda ϵ_r

Una vez calibradas en estático, las probetas se sometieron a ensayos dinámicos a rotura de flexión en tres puntos, mediante la técnica experimental de la barra Hopkinson, representada en la Figura 7.

Con estos ensayos se obtuvo: por un lado, la historia de deformación dinámica de la banda, y por otro, la historia del COD mediante el sistema de CDI. La adquisición de imágenes en el ensayo dinámico se hizo mediante una cámara de alta velocidad, capaz de obtener hasta un millón de imágenes por segundo.

Las imágenes de la cámara, unas 300 para cada probeta, se trataron con el software Vic 2D [8]. Se configuró un extensómetro digital seleccionando sobre la imagen dos puntos a un lado y otro de la entalla, a una distancia media entre la punta de fisura y el borde de la probeta. (Figura 8)

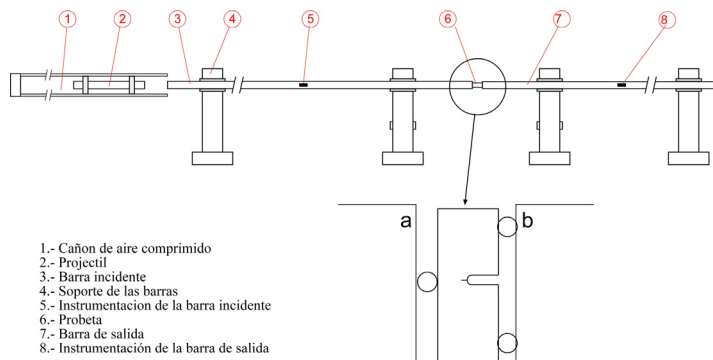


Figura 7. Esquema de los ensayos a alta velocidad de deformación en la barra Hopkinson.

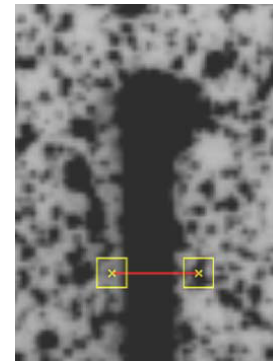


Figura 8. Extensómetro digital del Software Vic 2D

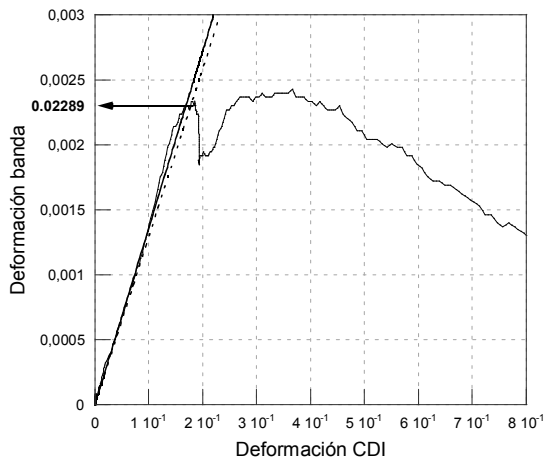


Figura 9. Obtención de la deformación a rotura mediante los registros experimentales

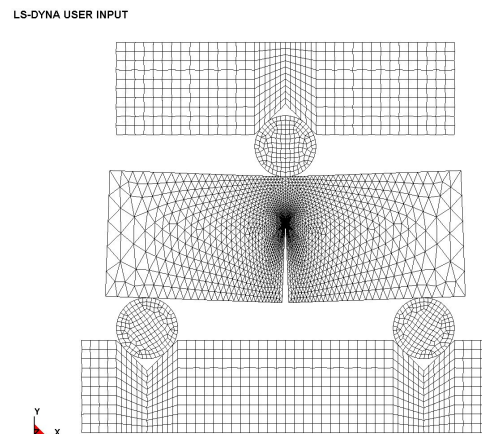


Figura 10. Mallado del ensayo de flexión en tres puntos

Representando en un mismo gráfico la deformación de la banda en dinámico y la medida con el extensómetro digital, se obtuvieron curvas como la representada en la Figura 9. Se identificó sobre estas curvas la deformación a rotura, es decir, la deformación correspondiente a la pérdida de linealidad de la curva, según lo explicado en el apartado anterior.

3.4. Simulación numérica: obtención de β .

Para conocer la relación entre la carga aplicada y el factor de intensidad de tensiones, es decir, el factor β , se realizaron simulaciones del ensayo estático mediante el programa LS-DYNA [9]. Las simulaciones, en configuración de dos dimensiones (Figura 10), incluyeron la probeta, los soportes y los rodillos de apoyo. Se malló sólo la mitad del dispositivo experimental por ser simétrico y se asumieron condiciones de deformación plana. Se impuso un desplazamiento creciente en el borde del apoyo superior y desplazamientos impedidos en la base del soporte inferior.

La malla se afinó especialmente en la punta de fisura, con un tamaño medio de elemento en esta zona de

$a/1000$ siendo a el tamaño de la fisura. Para conseguir el mayor realismo posible en la simulación, se impuso el tamaño de fisura medido sobre la probeta ensayada. El factor de intensidad de tensiones para un valor unitario de carga se obtuvo mediante el método de los desplazamientos nodales [10], según la expresión:

$$K_I = \frac{E\sqrt{2\pi}}{(1+\nu)(\kappa+1)} \frac{u_1\sqrt{r_2^3} - u_2\sqrt{r_1^3}}{\sqrt{r_2^3 r_1} - \sqrt{r_1^3 r_2}} \quad (6)$$

Siendo u_1 y u_2 las historias de los desplazamientos normales al plano de fisura de los nodos 1 y 2, r_1 y r_2 sus respectivas distancias a la punta de fisura, E el módulo de elasticidad y ν el coeficiente de Poisson del material. El parámetro elástico κ vale $3-4\nu$ en caso de deformación plana, y $(3-\nu)/(1+\nu)$ en caso de tensión plana. El factor β se obtuvo como la relación entre el valor de K_I obtenido y la carga unitaria.

3.5. Obtención de K_{ICd}

A partir de los parámetros α , β y ε_r hallados en los epígrafes anteriores, se utilizó (5) para hallar K_{ICd} .

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para las seis probetas ensayadas están recogidos en la Tabla 2.

Estos valores proporcionaron una K_{ICd} promedio para el acero ArmoX 500T de $87.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ con una desviación típica de $8,9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Los valores de K_{ICd} encontrados son prácticamente idénticos a los hallados en régimen estático [2]. Esto es lo esperable para un acero de alta resistencia, por lo que los resultados pueden considerarse fiables y la presente metodología desarrollada para este material validada.

Tabla 2. Valores obtenidos de K_{ICd} , factor α , factor β y deformación dinámica a rotura ϵ_r .

probeta	Factor α (kN)	Factor β ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}} / \text{kN}$)	ϵ_r	K_{ICd} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
A7	2693	7.610	0.00439	90.0
A12	4071	7.248	0.00335	99.0
A20	4055	7.985	0.00265	85,9
A21	4004	9.392	0.00228	86,1
A27	4657	9.910	0.00193	89,2
P9	3581	9.151	0.00224	73,2

5. CONCLUSIONES

Se ha puesto a punto y validado una nueva metodología para la obtención de K_{ICd} en aceros estructurales. Esta metodología está basada en la proporcionalidad en régimen dinámico entre K_{ICd} y la deformación en puntos cercanos a la punta de la fisura. Consiste en hallar K_{ICd} como el producto de tres factores α , β y ϵ_r . Los factores α y β se obtienen de calibraciones estáticas (experimental y numérica, respectivamente) de cada probeta; y el factor ϵ_r , deformación a rotura dinámica, se obtiene del ensayo dinámico, a partir del registro de una banda extensométrica colocada cerca de la punta de fisura. La metodología sería en principio aplicable a cualquier material que tenga un comportamiento en fractura elástico y lineal.

La metodología desarrollada no presenta las complicaciones encontradas en las metodologías mixtas experimental-numéricas. Se basa en datos tomados principalmente de los ensayos experimentales, prescindiendo de simulaciones numéricas que pueden no ser suficientemente representativas del ensayo dinámico, como se vio en estudios anteriores.

Se ha ideado un sistema para la determinación fiable del instante de rotura en el ensayo dinámico. Este sistema consiste en contrastar el registro de deformación que proporciona la banda en el ensayo dinámico, en un punto cercano a la punta de fisura, con un registro de COD del mismo ensayo. El instante en

que ambos registros dejan de ser proporcionales es el instante en que la fisura comienza a propagarse.

Se ha probado y validado el sistema de Correlación Digital de Imágenes para la medida de COD en ensayos dinámicos. El sistema consta del software Vic-2D y de una cámara de alta velocidad, con una frecuencia de toma de imágenes de $3 \mu\text{s}^{-1}$.

Aplicando la nueva metodología a seis probetas de acero ArmoX 500T, se ha obtenido un valor promedio de tenacidad de fractura dinámica de $87.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Este valor es muy similar a la tenacidad de fractura en condiciones estáticas, tal y como se espera de un acero de alta resistencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ciencia e Innovación la financiación del proyecto a través de el programa CONSOLIDER INGENIO 2010 y el proyecto BIA2008-06705-C02-01 "SEGACEX"

REFERENCIAS

- [1] G. Weisbrod and D. Rittel, *A method for dynamic fracture toughness determination using short beams*, International Journal of Fracture 104, (2000) 89-103
- [2] F. Gálvez, D.A. Cendón, A. Enfedaque, y V. Sánchez-Gálvez, *Medida de la tenacidad de fractura dinámica de un acero de blindaje de alta resistencia*, Anales de la Mecánica de la Fractura 25, (2008) 695-700
- [3] N. García. *Desarrollo de una nueva metodología para la obtención de K_{ICd} en un acero estructural*. Proyecto fin de Carrera. Ingeniero de Materiales, UPM. (2009)
- [4] F. Gálvez, D.A. Cendón, N. García, A. Enfedaque. and V. Sánchez-Gálvez. *Dynamic fracture toughness of a high strength armor steel*. Engineering Failure Analysis 16 (2009) 2567-2575
- [5] Broek D. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Kluwer Springer (1982)
- [6] ArmoX 500T Datasheet. SSAB AB (2007)
- [7] ASTM E399-08. *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{ICd} of Metallic Materials*. (1993).
- [8] Vic-2D/3D. Correlated Solutions, Inc. (2005)
- [9] LS-DYNA 970. Livermore Software Technology Corporation. (2003)
- [10] G.V. Guinea, J. Planas, and M. Elices, *K_I evaluation by the displacement extrapolation technique*, Engineering Fracture Mechanics 66, (2000) 243-255