

MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA DINÁMICA DE UN ACERO DE BLINDAJE DE ALTA RESISTENCIA

F. Gálvez, D. Cendón, A. Enfedaque y V. Sánchez-Gálvez

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
Tfno: 913 36 66 83 Fax: 913 36 66 80

RESUMEN

En el presente trabajo se resumen resultados preliminares de la investigación que se lleva a cabo para determinar el comportamiento a fractura en condiciones estáticas y dinámicas del acero de blindajes de alta resistencia Armox500T. Para el presente estudio se prepararon probetas de flexión en tres puntos entalladas, que se fisuraron a fatiga. Posteriormente, se ensayaron a flexión hasta rotura en una máquina de ensayos mecánicos para obtener la tenacidad de fractura estática K_{IC} . Para obtener la tenacidad de fractura en condiciones dinámicas, se empleó una barra Hopkinson modificada para poder realizar ensayos de flexión en tres puntos. En este dispositivo se obtuvieron los registros de desplazamiento y velocidad, así como el instante de rotura mediante sensores de detección de fisuras pegados sobre las probetas. A continuación se realizó una simulación numérica del ensayo, utilizando el código LS DYNA para analizar el estado de tensiones y deformaciones en torno a la fisura en función del tiempo. A partir de los resultados de la simulación numérica se obtuvo la historia del factor de intensidad de tensiones dinámico en función del tiempo. Utilizando el dato del tiempo de rotura del sensor, el valor de la tenacidad de fractura deducido era poco realista. En consecuencia, se decidió utilizar un método numérico para deducir el tiempo de propagación de la fisura, por comparación con los datos experimentales de velocidades en la barra transmisora. Así fue posible obtener la tenacidad de fractura dinámica K_{Id}^C . Se comprueba que para este acero de alta resistencia, los resultados de la tenacidad de fractura en condiciones estáticas y dinámicas obtenidos (K_{IC} y K_{Id}^C) son similares.

ABSTRACT

This paper summarizes the preliminary results of a research being carried out to determine fracture behaviour both in static and dynamic conditions of high strength armour steel Armox500T. For this investigation, notched specimens were cut to be tested in three-point bending test. Specimens were precracked by flexural fatigue. Thereafter some specimens were tested in bending up to rupture to determine the static fracture toughness K_{IC} . To obtain fracture toughness in dynamic conditions, a split Hopkinson bar modified to perform three-point bending tests was used. In this set up, displacements and velocities of the specimen were measured as well as the rupture time by means of fracture detection sensors, glued to the specimens. After that, a numerical simulation of the test was performed by using LS DYNA hydrocode, obtaining stresses and strains histories around the crack tip. From these results, the stress intensity factor history was derived. By using the rupture time, measured by the sensor, the value of the fracture toughness computed was unrealistic. Therefore, it was decided the use of a numerical procedure to obtain the rupture time, by comparing experimental results of velocities at the transmission bar with numerical results obtained with several rupture times. With this procedure, it was possible the computation of dynamic fracture toughness. It can be observed that fracture toughness of this steel under static and dynamic conditions is quite similar.

PALABRAS CLAVE: Alta velocidad de deformación, Tenacidad de Fractura Dinámica, Acero de Blindajes.

1. INTRODUCCIÓN

A la hora de elegir o estudiar el comportamiento mecánico de un material en aplicaciones en las que la velocidad de deformación es elevada, en ocasiones nos encontramos con que no están disponibles las propiedades mecánicas en ese régimen. Ése es el caso de los aceros de blindaje de alta resistencia, en los que su aplicación fundamental es la de proteger vehículos o instalaciones frente a proyectiles, fragmentos, u ondas de presión como resultado de explosiones. En este caso, es fundamental conocer el comportamiento del material

en esas condiciones de trabajo. Actualmente, cuando no se dispone de datos del comportamiento del material a alta velocidad de deformación suelen emplearse las propiedades medidas en régimen estático, lo cual es incorrecto y puede llevar a errores en el diseño. Es un hecho conocido que las ecuaciones constitutivas y el criterio de rotura dependen de la velocidad de deformación, y existen numerosos estudios experimentales que lo demuestran. Sin embargo, el estudio de la fractura a alta velocidad de deformación es un campo en el que aún falta mucho camino por recorrer.

La medida de la tenacidad de fractura en régimen estático (K_{IC}), está bien establecida mediante diversas normas y recomendaciones, sin embargo cuando se trata de la medida de la tenacidad de fractura en régimen dinámico (K_{II}^C) el caso es totalmente opuesto.

La medida del factor de intensidad de tensiones en régimen dinámico es bastante compleja, pues han de incluirse los efectos de inercia y el tiempo, ya que la probeta no se encuentra en equilibrio. En la actualidad se han propuesto diversos métodos [1,2], la mayoría basados en la medida del factor de intensidad de tensiones con el tiempo, junto con la determinación del instante de rotura, para obtener así la tenacidad de fractura en régimen dinámico. Prácticamente todos ellos se basan en obtener la historia del factor de intensidad de tensiones mediante simulaciones numéricas, junto con la medida experimental del instante de rotura. En la práctica se demuestra que obtener el instante de rotura es crítico para la correcta medida de la tenacidad de fractura dinámica.

En este trabajo se analiza uno de estos métodos y su viabilidad a la hora de emplear este procedimiento de medida de la tenacidad de fractura dinámica para el caso de aceros de blindaje de alta resistencia.

2. MATERIAL DE ENSAYO Y PROBETAS

El material seleccionado ha sido el acero ARMOX 500T fabricado por la empresa sueca SSAB Oxelösund AB. Se ha elegido este acero para la investigación por ser ampliamente utilizado para el blindaje de vehículos, aplicación en la que debe soportar cargas a altas velocidades de deformación y por tanto el conocimiento de la tenacidad de fractura dinámica es de gran importancia. Las propiedades mecánicas suministradas por el fabricante [3] se muestran en la Tabla 1, y sus ecuaciones constitutivas y criterio de rotura se han obtenido recientemente [4].

Para la realización de los ensayos, se eligió la configuración de flexión en tres puntos con probetas tipo Charpy. Las dimensiones se muestran en la Figura 1. Todas las probetas se prefisuraron por fatiga. Para ello se siguieron las recomendaciones fijadas en la norma ASTM E399 [5]. El proceso de fatiga se llevó a cabo en una máquina servohidráulica INSTRON 1275. Para monitorizar el crecimiento de la fisura se empleó un telescopio Questar y una cámara de video enfocada sobre la probeta. Todas las probetas se fatigaron hasta que la fisura tuvo al menos 1.5mm de profundidad.

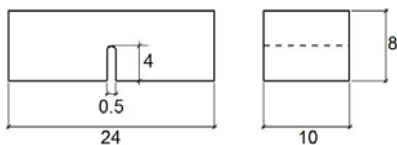


Figura 1. Geometría de las probetas (en mm).

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero Armox500T

Módulo de Elasticidad E	207 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad	7850 Kg/m3
Límite elástico	1250 MPa
Tensión de rotura	1450 - 1750 MPa
Elongación	8% - 10%
Dureza	480 – 540 HB
Velocidad del sonido	5135 m/s

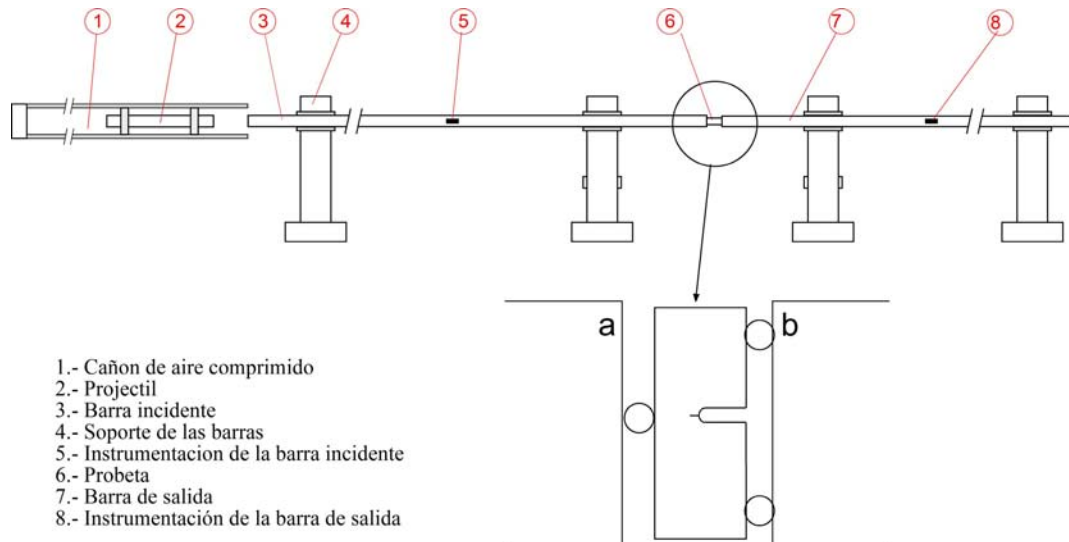
3. ENSAYOS DE FRACTURA ESTÁTICA.

Se llevaron a cabo ensayos estáticos de fractura en flexión en tres puntos según la norma ASTM E399 [5]. Los ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica INSTRON 1275 con control de desplazamiento a una velocidad de 0.1 mm/min. La carga aplicada se midió con una célula de carga de 25kN con un error menor de 25N. Se realizaron varios ensayos en las mismas condiciones para tener valores medios. La tenacidad de fractura estática medida fue de 85 MPa·m^{1/2}.

4. ENSAYOS DE FRACTURA DINÁMICA

Los ensayos a altas velocidades de deformación se llevaron a cabo mediante la técnica experimental de la barra de Hopkinson, mostrada en la Figura 2. Su funcionamiento se basa en dos barras largas entre las que se coloca la probeta a ensayar. La carga se introduce sobre una de las barras haciendo impactar una tercera barra a modo de proyectil, propulsada por un cañón de aire comprimido. Esta técnica, ampliamente extendida, permite determinar la historia de cargas y desplazamientos aplicados a ambos extremos de la probeta mediante la información proporcionada por las deformaciones en las barras. Las dos barras están instrumentadas en su punto medio mediante bandas extensométricas que son las encargadas de medir las deformaciones que sufren. Estas deformaciones en las barras corresponden a la onda incidente ϵ_I y la onda reflejada, ϵ_R sobre la primera barra y a la onda transmitida ϵ_T sobre la segunda.

En el presente trabajo, la probeta empleada fue de flexión en tres puntos, colocada según se muestra en la Figura 2. Para ajustarla a la geometría de las barras del dispositivo experimental fue necesario fabricar unos soportes que permitieran alojar tres rodillos de acero de alta resistencia de 4 mm de diámetro. En la Figura 3 se muestra un detalle del montaje de la probeta en la barra Hopkinson, en la que se aprecian las barras, los soportes para los rodillos, los rodillos y la probeta. La probeta fue instrumentada con un sensor de detección de propagación de fisuras “Vishay CDA-02-10A” para tratar de determinar el instante de propagación de la fisura y el tiempo de rotura.



- 1.- Cañon de aire comprimido
- 2.- Projectil
- 3.- Barra incidente
- 4.- Soporte de las barras
- 5.- Instrumentacion de la barra incidente
- 6.- Probeta
- 7.- Barra de salida
- 8.- Instrumentación de la barra de salida

Figura 2. Esquema del ensayo en la barra Hopkinson.

El ensayo en la barra Hopkinson se basa en la teoría de la propagación unidimensional de ondas elásticas en barras. Mediante dicha teoría y a través de las tres señales medidas en las barras es posible determinar cargas y desplazamientos aplicados a la probeta. Los registros obtenidos en un ensayo se muestran en la Figura 4. Las medidas de la primera barra (ch1) permiten obtener las ondas incidente y reflejada, las de la segunda barra (ch2) la onda transmitida, y se empleó un tercer canal (ch3) para tratar de medir el instante de rotura de la probeta. Es importante hacer notar que la probeta durante el ensayo no necesariamente se encuentra en equilibrio. Sin embargo es fácil determinar las fuerzas aplicadas a la probeta en sus extremos mediante las siguientes expresiones [6]:

$$F_a = AE(\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (1)$$

$$F_b = AE\varepsilon_T \quad (2)$$

donde A y E son la sección y el módulo de elasticidad de las barras y las variables ε_I , ε_R y ε_T son las historias de las deformaciones correspondientes a la onda incidente, reflejada y transmitida. Las señales recogidas permiten además obtener las velocidades con las que se mueven los extremos de las barras en contacto con la probeta (ecuaciones 3 y 4):

$$v_a = c(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (3)$$

$$v_b = c\varepsilon_T \quad (4)$$

donde c representa la velocidad de propagación de las ondas en las barras. En la Figura 5 se muestran las velocidades de los extremos de las barras y el instante de propagación de la fisura medido mediante el sensor de rotura. En ella se aprecia que es necesario un tiempo de unos 30 microsegundos desde que comienza a cargarse el primer apoyo de la probeta hasta que el otro extremo de ésta comienza a moverse, por lo que se concluye que no existe equilibrio en la probeta.

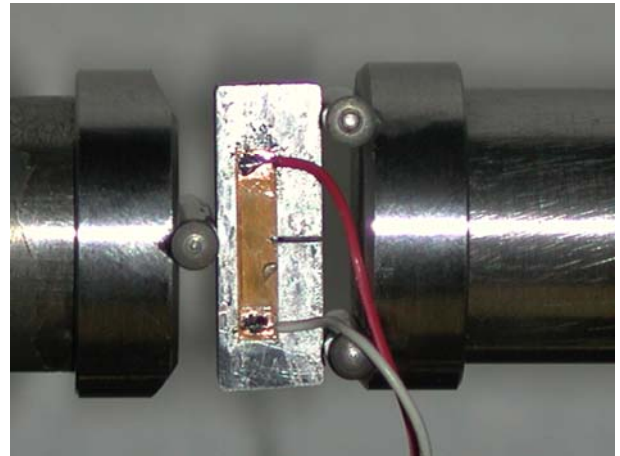


Figura 3. Montaje de la probeta en la barra Hopkinson.

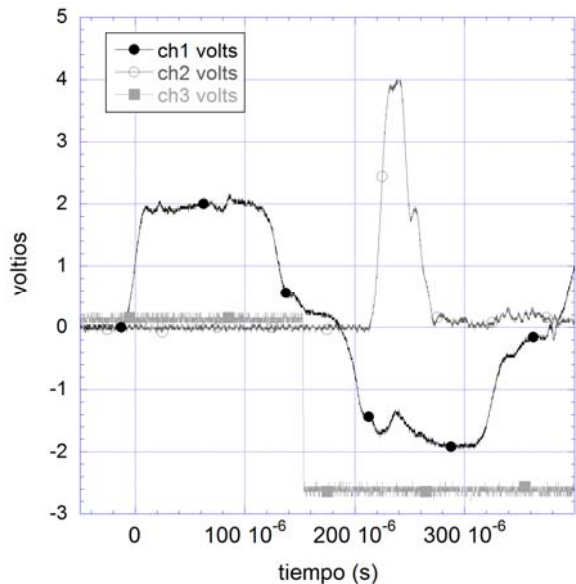


Figura 4. Registros obtenidos en la barra Hopkinson.

El ensayo en barra Hopkinson se complementó con una cámara de fotografía ultrarrápida para fotografiar el instante de rotura. La señal de disparo se tomó directamente de la señal procedente del sensor de detección de propagación de la fisura, activándose las cámaras en ese preciso instante, y proporcionando la imagen del estado de la probeta que corresponde con el instante en el cual el sensor de detección de fisuras se rompe. Dicha imagen se muestra en la Figura 6, y en ella se observa que la fisura ya está bastante abierta. Esto hizo sospechar que pudiera haber un cierto retraso entre el instante de propagación de la fisura y el instante de rotura del sensor, lo que invalidaría la medida del sensor como el instante en el que la probeta se fisura. Además, el examen de los sensores tras la realización del ensayo mostraba que el punto de rotura del sensor no coincide exactamente con la posición de la fisura. Estas observaciones ponen en duda la validez de la medida procedente del sensor.

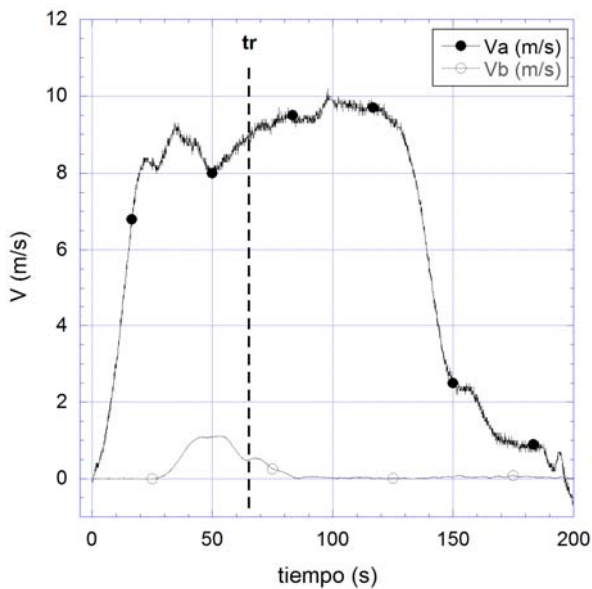


Figura 5. Velocidades de los extremos de las barras en contacto con la probeta e instante de rotura del sensor.

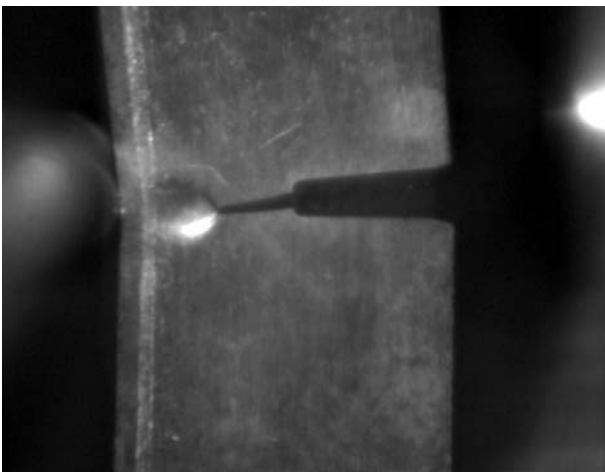


Figura 6. Imagen del instante de rotura del sensor.

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS. MEDIDA DE LA TENACIDAD

A diferencia de lo que ocurre en un ensayo en régimen estático, puesto que la probeta no se encuentra en equilibrio durante el ensayo, no existe una relación directa entre los desplazamientos aplicados en los apoyos de la probeta y el factor de intensidad de tensiones, ya que el tiempo juega un papel fundamental. Así, para conocer la relación entre la historia de desplazamientos aplicados en los apoyos de la probeta y el factor de intensidad de tensiones en la punta de la fisura, se realizaron simulaciones explícitas mediante el programa LS-DYNA [7].

Las simulaciones se realizaron en 2D, mallando media probeta (Figura 7) y asumiendo condiciones de deformación plana. Para conseguir la mayor precisión posible, también se incluyeron los rodillos de apoyo en las simulaciones. Como condición de contorno se impuso en la velocidad de la barra incidente medida experimentalmente en cada ensayo en la barra Hopkinson (v_a en la Figura 5). Para calcular el factor de intensidad de tensiones, se utilizó el método de los desplazamientos nodales alrededor de la punta de la fisura [8], empleando para ello una malla altamente refinada en la punta de la fisura (Figura 8), con un tamaño medio de elemento en la punta de fisura de $a/1000$, siendo a el tamaño de la fisura. También se midió la velocidad de los apoyos en contacto con la segunda barra o barra de salida.

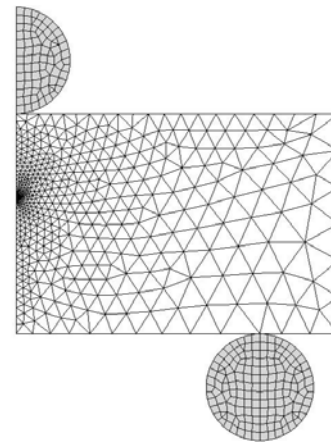


Figura 7. Malla para la simulación numérica

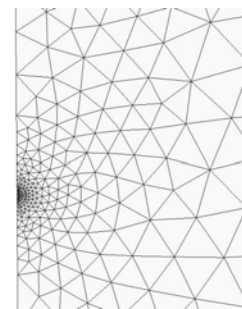


Figura 8. Malla refinada en la punta de fisura.

Mediante el citado método de los desplazamientos nodales [8], la historia del factor de intensidad de tensiones puede obtenerse a partir de las historias de desplazamientos normales al plano de fisura de dos nodos a y b situados en la región próxima a la punta, mediante la ecuación 5:

$$K_I(t) = \frac{E\sqrt{2\pi}}{(1+\nu)(\kappa+1)} \frac{u_a(t)\sqrt{r_b^3} - u_b(t)\sqrt{r_a^3}}{\sqrt{r_b^3 r_a} - \sqrt{r_a^3 r_b}} \quad [5]$$

Siendo $K_I(t)$ la historia del factor de intensidad de tensiones, E el módulo de elasticidad, ν el coeficiente de Poisson, $u_a(t)$ y $u_b(t)$ las historias de desplazamientos normales a la fisura de los nodos a y b respectivamente, y r_a y r_b sus respectivas distancias a la punta de la fisura. El parámetro elástico κ vale $(3-4\nu)$ en caso de deformación plana, y $(3-\nu)/(1+\nu)$ en caso de tensión plana.

La Figura 9 muestra un ejemplo de los resultados proporcionados por la simulación numérica, mostrándose la curva del factor de intensidad de tensiones en función del tiempo $K_{Id}(t)$. Empleando el dato experimental del tiempo en el que se inicia la propagación de la fisura, sería posible determinar la tenacidad de fractura dinámica K_{Id}^C .

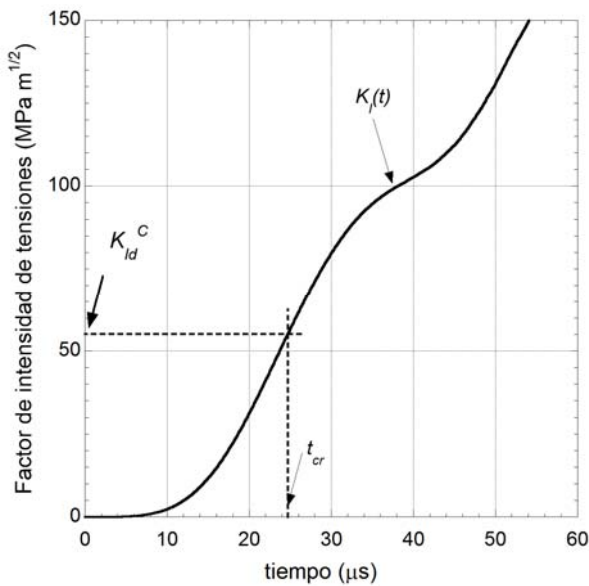


Figura 9. Historia del factor de intensidad de tensiones.

Tabla 2. Tenacidades dinámicas e instantes de rotura medidos a partir de la rotura del filamento.

Probeta	K_{Id}^C (MPa m ^{1/2})	t_{rot} (μs)
P4	198,4	65
P6	138,6	68
P7	177,5	64

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mediante la técnica mixta experimental-numérica descrita, se obtuvieron las medidas de la tenacidad de fractura dinámica K_{Id}^C para tres probetas a partir de los tiempos de rotura medidos con el sensor de propagación de fisuras. Los valores de tenacidad de fractura dinámica K_{Id}^C obtenidos, así como los tiempos de rotura, figuran en la Tabla 2.

Evidentemente, se trata de valores de la tenacidad de fractura excesivamente altos si tenemos en cuenta que en condiciones estáticas la tenacidad de fractura del acero ArmoX500T es de 85 MPa m^{1/2}. Habida cuenta del procedimiento de medida descrito, se llegó a la conclusión que el motivo de valores tan altos puede deberse a que la señal del sensor no se produce en el instante de fisuración de la probeta, sino bastante más tarde. Por ello se descartó la señal del sensor como medida válida del instante de propagación de la grieta.

Para obtener una medida más realista, se realizó un análisis en profundidad de las curvas de velocidad de los apoyos de la probeta obtenidos en la barra Hopkinson (Figura 5). En dichas curvas, la velocidad de los apoyos de la probeta en contacto con la barra de salida (v_b) viene determinada por la forma en que se propagan las tensiones a través de la propia probeta. Suponiendo por un momento que la probeta fuese infinitamente rígida, la velocidad v_b debería alcanzar los mismos valores máximos que la velocidad incidente v_a . Por el contrario, si no existiese probeta, la velocidad v_b se mantendría nula independientemente del valor máximo de v_a . Es fácil comprender que la velocidad v_b depende del comportamiento y modo de rotura de la probeta. Cuando el factor de intensidad de tensiones se hace crítico, la fisura se propaga y la probeta se rompe, limitando esta rotura la capacidad de la misma para transmitir la velocidad de v_a hacia v_b , por lo que el valor máximo de la velocidad registrado en v_b (Figura 5) vendrá determinado por el instante de propagación de la fisura.

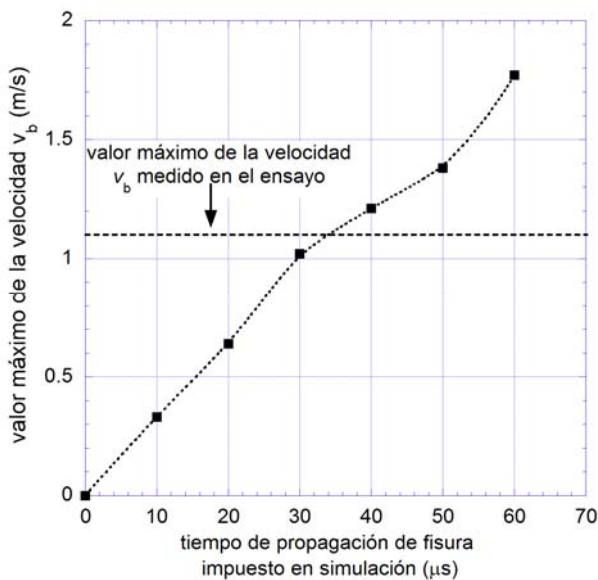
Para comprobar este razonamiento y obtener de paso el tiempo de propagación de fisura, se repitieron las simulaciones, pero introduciendo la propagación de la fisura en distintos instantes de tiempo, barriendo un intervalo desde 10 hasta 50 microsegundos. La propagación de la fisura se introdujo de forma simplificada, liberando la condición de simetría en los nodos del ligamento en éste instante de tiempo t_{cr} . En las simulaciones se introdujeron las velocidades del punto de aplicación de carga v_a medidas en los ensayos, obteniendo las velocidades v_b como resultado de la simulación. La Figura 10 muestra los máximos de las velocidades transmitidas v_b simulados para distintos instantes de propagación t_{cr} . En dicha figura también se muestra el máximo de la velocidad v_b que se registró experimentalmente. Mediante este método se obtuvo el tiempo de propagación de fisura como aquel valor de t_{cr}

que iguala la velocidad de salida obtenida en la simulación con la medida experimentalmente.

Utilizando este procedimiento en lugar del tiempo proporcionado por la rotura del sensor, se obtuvieron los tiempos de propagación de fisura y por tanto de rotura. Con este valor y empleando la historia del factor de intensidad de tensiones (Figura 9) se obtuvo el valor de la tenacidad de fractura dinámica K_{Ic}^C , cuyos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tenacidades dinámicas e instantes de rotura medidos a partir de las simulaciones numéricas.

Probeta	K_{Ic}^C (MPa m ^{1/2})	t_{rot} (μs)
P4	80,3	30
P6	74,0	38
P7	92,4	34



7. CONCLUSIONES

De esta forma, las conclusiones principales son las que se señalan a continuación:

- La técnica mixta experimental-numérica descrita para medir la tenacidad dinámica de fractura K_{Ic}^C , constituye un método muy prometedor. No obstante, algunos aspectos deben ser analizados con cautela.
- El uso de sensores de propagación de fisuras adheridos a la probeta como método para obtener el instante de propagación de fisura, no resulta fiable tal y como se ha demostrado en este trabajo.
- El análisis de la onda transmitida en la barra Hopkinson junto con el análisis numérico,

proporcionan tiempos más fiables de propagación de fisura.

- Sería de gran ayuda el empleo de algún otro método capaz de medir el tiempo de propagación de la fisura con mayor precisión. Un método para registrar el instante de propagación de fisura con mayor precisión es el empleo de un sistema de adquisición de imágenes a alta velocidad mediante cámaras de fotografía o video. Dicha técnica está siendo estudiada por estos mismos autores en la actualidad.
- Se ha comprobado que para este acero de alta resistencia, los resultados de la tenacidad de fractura en condiciones estáticas y dinámicas obtenidos (K_{Ic} y K_{Ic}^C) son similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación del proyecto a través del programa CONSOLIDER INGENIO 2010.

REFERENCIAS

- [1] Rittel, D., Maigre, H., Bui, H. D., "A new method for dynamic fracture toughness testing", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 26, 1593-1598, 1992.
- [2] Weisbrod, G. and Rittel, D. "A method for dynamic fracture toughness determination using short beams", *International Journal of Fracture*, 104, 89-103, 2000.
- [3] ArmoX 500T Datasheet, SSAB Oxelösund AB, 2007.
- [4] Skoglund, Nilsson, M. and Tjernberg, A. "Fracture modelling of a high performance armour steel", *J. of Phys. IV France*, 134, 197-202, 2006.
- [5] ASTM E399, 1993.
- [6] J.A. Zukas, T. Nicholas, N.F. Shift, L.B. Gresczuk, D.R. Curran. *Impact Dynamics*. Ed. John Willey and Sons, 1982.
- [7] LS-DYNA 760. Livermore Software Technology Corporation (2003).
- [8] Guinea, G.V., Planas, J. y Elices, M. "KI evaluation by the displacement extrapolation technique" *Engineering Fracture Mechanics* 66. Pp 243-255. (2000)