

DETERMINACION DE LA ENERGIA REAL DE FRACTURA EN ENSAYOS DE IMPACTO INSTRUMENTADO SOBRE ACEROS FRAGILES DE ALTO LIMITE ELASTICO.

J.J.del Coz*, A.Fdez.Canteli*, C.Betegón*, J.F.Kalthoff†

*E.T.S.Ingenieros Industriales. Depto.Construcción.
Ctra. de Castiello s/n. 33204-Gijón

†Ruhr-Universität Bochum. Experimentelle Mechanik IA 2/26
D-44780. Bochum, Alemania

Resumen.- En este trabajo se desarrollan técnicas experimentales y métodos numéricos para la determinación de la energía real de fractura en ensayos de impacto instrumentado. En los ensayos de impacto, realizados en un péndulo Charpy y una torre de caída de peso, se instalaron bandas extensométricas en las cuchillas y en las proximidades de la entalla de la probeta. La energía cinética se determinó mediante fotografía de alta velocidad con una cámara de Craz-Schardin. Por otra parte, se estudia numéricamente, mediante el método de los elementos finitos, el comportamiento de un modelo unidimensional de la probeta Charpy, constituido por elementos-viga de Timoshenko y un elemento *line-spring* que simula el comportamiento de la fisura, y se analiza dinámicamente. Los resultados obtenidos mediante los métodos numéricos y las técnicas experimentales se comparan entre sí y se aplican los procedimientos investigados a la determinación de la tenacidad a fractura dinámica bajo modo I, K_{Ic}^d , para el material de ensayo.

Abstract.- In this work, experimental techniques and numerical methods have been applied in order to assess the real fracture energy in instrumented impact tests. For the impact tests, carried out both in a Charpy pendulum and in a drop-weight device, strain gauges were placed at the striking edge of the hammer and nearby the specimen notch. The kinetic energy has been determined by means of a high speed camera Craz-Schardin. A numerical FEM one-dimensional model, makes up of Timoshenko beam-elements with a central line-spring element is used to simulate the crack behaviour. The experimental and numeric results for the material tested have been compared and applied in order to determine the dynamic fracture toughness for mode I, K_{Ic}^d .

1. INTRODUCCION.

La mayoría de las estructuras en ingeniería están sometidas a cargas dinámicas. En el caso de aceros de vía, estas solicitaciones se acentúan con la aparición de los trenes de alta velocidad, en los que se combinan elevadas presiones superficiales de rodadura con tensiones de flexión y tracción/compresión importantes. Ello obliga a la utilización, en la mayoría de los casos, de aceros de alto límite elástico (mayor de 600 N/mm²) y alta dureza superficial (mayor de 260 HB) [1].

Tales requisitos han de hacerse compatibles, igualmente, con una conveniente resistencia a la propagación de grietas en el material, por lo que resulta de interés el conocimiento del comportamiento del material agrietado bajo cargas de impacto.

En la actualidad existen ciertos procedimientos de ensayo, algunos de ellos normalizados sólo parcialmente, que permiten caracterizar dinámicamente los materiales metálicos [2],[3].

No obstante, se han apreciado discrepancias en los resultados obtenidos mediante diferentes normativas, en especial cuando se ensayan materiales frágiles con corto tiempo de fractura, en los que la energía cinética de la probeta parece jugar un papel importante [1],[4].

Por tal motivo se procedió a investigar, tanto numérica como experimentalmente, la contribución de la energía cinética en el proceso de fractura, al objeto de determinar la energía realmente consumida en la rotura de la pieza.

2. MATERIALES UTILIZADOS.

Se ha ensayado un acero de alto límite elástico, cuyas características mecánicas y composición química se muestran en las tablas 1 y 2. En la figura 1 se muestra el diagrama tensión-deformación idealizado para el mismo.

Denominación	σ_F	σ_R	HB	v	DIR
	N/mm ²	N/mm ²		%	
Carril AVE Aleado-50	700.0	1180.0	340-360	0.30	L-T

Tabla 1. Características mecánicas del acero ensayado.

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ti	V	Mo	Ni	Sn	Cu	As
770	240	1210	024	011	003	487	002	000	167	000	001	000	000

Tabla 2. Composición química del acero ensayado.

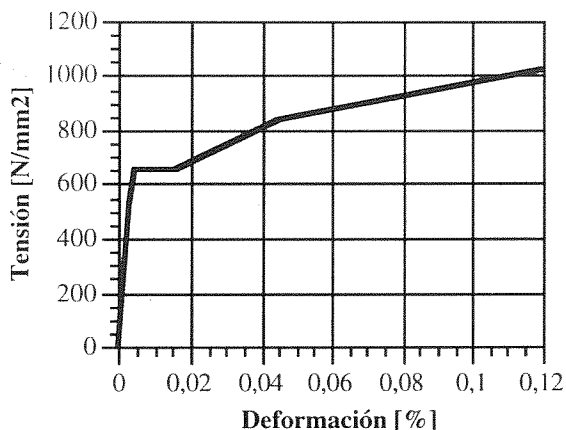


Fig. 1. Diagrama tensión-deformación del material.

3.EQUIPOS UTILIZADOS

Como unidades de impacto dinámicas se han utilizado las siguientes :

- Péndulo Charpy marca IBERTEST, PIB-30, 300 J., velocidad de impacto máxima 5.42 m/s, dotado de un prototipo *low-blow*, que permite regular la altura de caída entre 0.0 y 0.9 m.
- Péndulo Charpy marca WOLPERT-Probat, PW 30/15, 300 J., velocidad de impacto máxima 5.5 m/s, con enclavamiento automático y regulable entre 0.013 y 1.54 m.
- Torre de caída de peso marca Dynatup, GRC 8210, 100 J., de altura es regulable entre 0.0 y 2.0 m.

junto a los siguientes equipos :

- Cuchillas instrumentadas según normativa DVMS, elaboradas en Titanio y en Acero X210 CrMo 12.
- Equipos de amplificación y filtrado de la señal de las cuchillas instrumentadas, y de la señal de la banda extensométrica ubicada en la probeta a ensayar, de una frecuencia de hasta 1MHz.
- Tarjetas de recogida de datos analógico-digitales, marca Keithley-Metrabite, DAS-50, frecuencia de hasta 1 Mmuestra/s, 1MB de memoria RAM, 12 bits.
- Ordenador personal, encargado de la lectura y procesado de los datos adquiridos por las TAD, mediante el programa OSCILOS-3 V.2.2 ©OFS-JJCD(ETSII), bajo Windows® 3.1.
- Cámara de alta velocidad Crazz-Schardin, marca DRELLO, modelo BAL 1501, de 24 lentes, con generador para flash regulable entre 100 ns y 99.999 ms.

4.PREPARACION Y REALIZACION DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO.

El proceso seguido fué el siguiente :

- 1.- Mecanización de las probetas Charpy, tanto entalladas como prefisuradas.
- 2.- Cálculo de la flexibilidad de los apoyos y de la máquina.
- 3.- Instrumentación y calibración de las probetas.
- 4.- Realización de los ensayos de impacto.
- 5.- Clasificación de los resultados experimentales.

4.1.Mecanización de probetas.

Con el material indicado en el apartado 2 se mecanizaron veinte probetas Charpy (10x10x55 mm), todas ellas extraídas en dirección longitudinal, efectuándose las entallas en dirección L-T.

El proceso de prefisuración se llevó a cabo mediante electroerosión, con electrodos de cobre de 0.4 mm de espesor. La regulación de las variables del proceso permitió conseguir radios de entalla de 0.25 mm, con una rugosidad de 16 μ .

4.2.-Cálculo de la flexibilidad de los apoyos y de la máquina.

Para el cálculo de la flexibilidad de los apoyos, C_A , y de la máquina, C_M , se utilizaron los siguientes métodos [1]:

- 1.- Determinación de la pendiente inicial del diagrama Fuerza-desplazamiento.
- 2.- Conservación de la energía del impacto.
- 3.- A partir del periodo de oscilación de la probeta.

Los valores de la flexibilidad de la máquina, C_M , se obtuvieron a partir de ensayos de impacto a baja velocidad, sobre probetas 10x10x55 mm sin entalla, elaboradas en un acero de alto límite elástico y dureza superficial. Análogamente, los correspondientes valores de la flexibilidad de los apoyos, C_A , se determinaron mediante ensayos de impacto a baja velocidad sobre el material objeto de ensayo.

En la tabla 3 se resumen los resultados numéricos, deducidos a partir del valor medio de cada uno de los métodos utilizados, para cada tipo de cuchilla.

Cuchilla	C_M [$\times 10^{-9} \text{m/N}$]	C_A [$\times 10^{-9} \text{m/N}$]	C [$\times 10^{-9} \text{m/N}$]
Acero	8,941	3,199	12,140
Titanio	12,008	3,210	15,218

Tabla 3. Flexibilidades obtenidas en los ensayos de impacto a baja velocidad.

4.3. Instrumentación y calibración de las probetas.

Para la instrumentación de las probetas se utilizaron bandas extensométricas marca HBM, LY 11, 0.6/120 y 1.5/120, colocadas en las proximidades del fondo de la entalla, sobre una cara de la probeta.

La calibración se realizó a partir de la regresión lineal de la curva fuerza-voltaje de un ensayo estático, obteniéndose diferentes coeficientes, en el rango de 25.000 \pm 2.500 KN/V

4.4. Realización de los ensayos de impacto.

Los ensayos de impacto se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones de operación :

- Velocidad de impacto = 1.2 m/s
- Temperatura = 18°C
- Frecuencia de muestreo = 1 a 0.5 MHz
- Número de puntos almacenados \geq 2000
- Puntos antes del trigger = 200
- Rango de voltaje = \pm 2.50 V
- Tipo de cuchillas= Forma y dimensiones según DIN-DVM, elaboradas en acero aleado y titanio.

En los ensayos se registraron las señales procedentes de las bandas extensométricas ubicadas en la cuchilla y en la probeta, tal y como puede apreciarse en la figura 2. Obteniéndose los valores de los parámetros de resistencia dinámica del material, tales como la fuerza máxima de impacto, F_m , y la energía de fractura, E_I , a partir de los cuales se determinó la tenacidad a fractura dinámica bajo modo I, K_{Ic}^d [1],[2],[3].

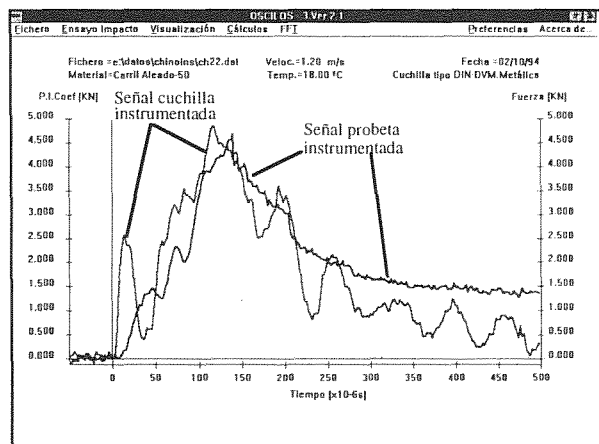


Fig. 2. Señales captadas en los ensayos de impacto instrumentado.

Por otra parte, al objeto de estudiar la influencia de la energía cinética de la probeta en el proceso de fractura, se efectuaron ensayos en una torre de impacto instrumentada, captando el movimiento de la probeta mediante una cámara de alta velocidad Crazz-Schardin. Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Velocidad de impacto = 2.4; 3.7 y 5.0m/s
- Energía de impacto = 15.0; 35.6 y 65 J.
- Intervalo de tiempo entre fotos= 0.040; 0.128; 0.160; 0.200; 0.320; 1.000 ms.
- Tipo de cuchilla= Din-DVM, elaborada en acero aleado.

A partir de las fotografías del ensayo (ver figuras 3 y 4), se midieron las coordenadas de cada una de las esquinas de la probeta, calculándose la velocidad traslacional y rotacional (v_t y ω_r) mediante diferencias finitas. Los valores de la energía cinética traslacional, E_{tras} , rotacional, E_{rot} , y total, E_{cin} , se dedujeron, entonces, a partir de las expresiones (ver figura 5) :

$$E_{tras} = \frac{1}{2} m_p \cdot v_t^2 \quad (1)$$

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I_p \cdot \omega_r^2 \quad (2)$$

$$E_{cin} = E_{tras} + E_{rot} \quad (3)$$

siendo m_p la masa de la probeta e I_p su inercia polar

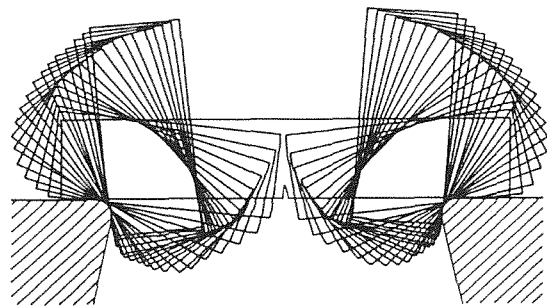


Fig. 4. Posiciones que adopta la probeta en el impacto.

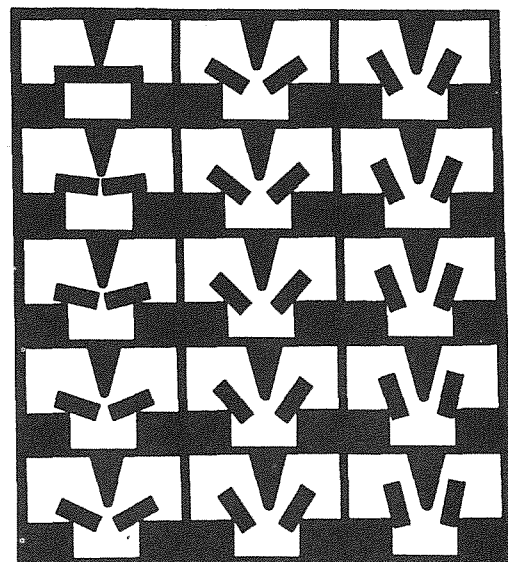


Fig. 4. Fotografías de la probeta realizadas mediante la Cámara de alta velocidad.

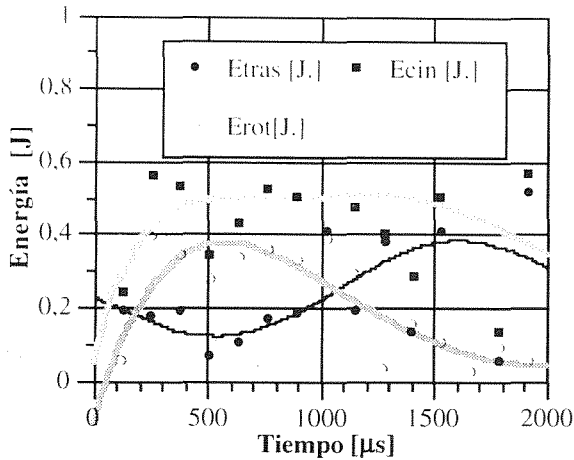


Fig. 5. Evolución de la energía cinética rotacional, traslacional y total en un ensayo, con $v=2.4$ m/s.

4.5. Clasificación de los resultados experimentales.

En la figura 6 se representan los valores de la tenacidad a fractura dinámica, K_{Ic}^d , en base a la normativa ASTM E992 [3], E24.03.03 [2] y E992 con corrección de la energía cinética de la probeta [1].

En la figura 7 se representa la evolución de la relación existente entre la energía cinética de la probeta y la energía de fractura, E_{cin}/E_I , en función de la velocidad de impacto, así como la ecuación obtenida por ajuste mediante mínimos cuadrados :

$$\frac{E_{cin}}{E_I}(v) = c_0 \cdot e^{c_1 \cdot v} \quad (4)$$

siendo : $c_0 = 0.07031566$ y $c_1 = 0.2146255$

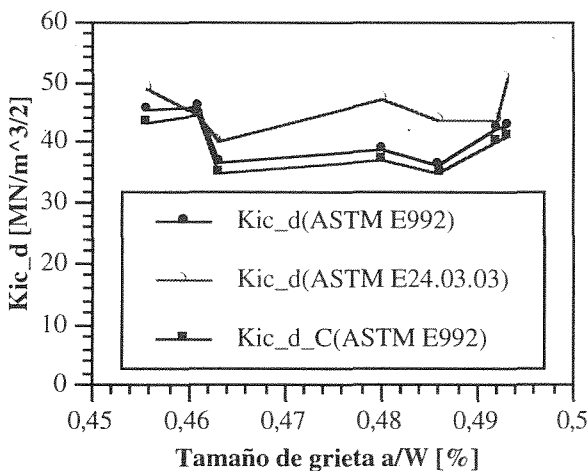


Fig. 6. Tenacidad a fractura dinámica, K_{Ic}^d .

5.METODOS NUMERICOS

Mediante el programa ABAQUS se ha investigado el comportamiento dinámico de un modelo unidimensional de elementos finitos (figura 9), constituido por :

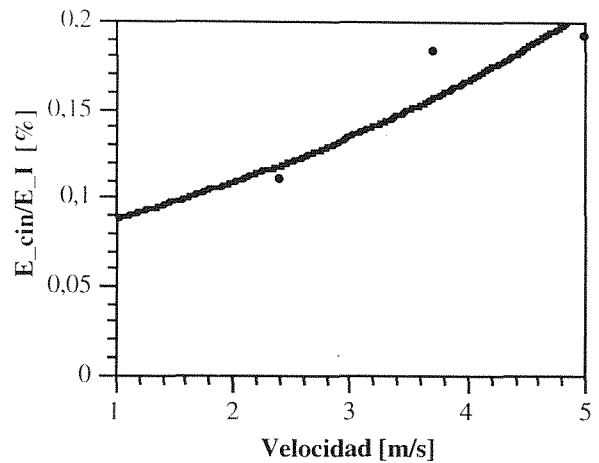


Fig. 7. Evolución de la relación E_{cin}/E_I con la velocidad de impacto.

- Elementos viga de Timoshenko, para la modelización de las partes prismáticas de la probeta Charpy.
- Elemento *line-spring*, que simula el comportamiento, en el dominio de la Mecánica de Fractura elástico-lineal, de una fisura con radio finito de entalla [5].
- Muelles no lineales, para la modelización del comportamiento de los apoyos y la cuchilla, permitiendo la separación entre éstos y la probeta.

Las propiedades elasto-plásticas del material se definieron a partir de los oportunos valores del diagrama tensión-deformación mostrado en la figura 1. La sollicitación de la probeta se realizó introduciendo los valores de la fuerza obtenidos en el ensayo de impacto, a partir de la señal de la cuchilla instrumentada, entre el instante inicial del impacto y el de rotura (figura 9).

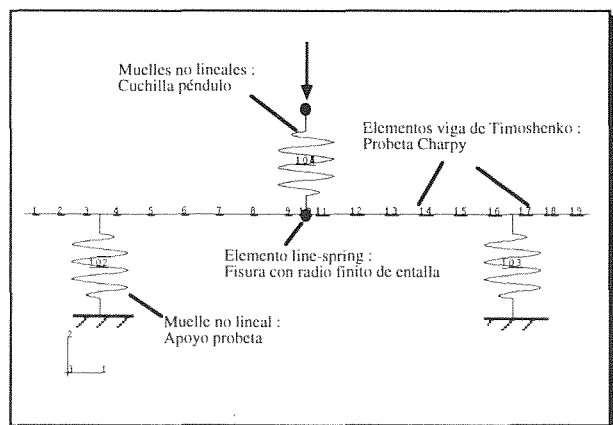


Fig.8. Modelo de elementos finitos.

Para el análisis dinámico se eligió un método de integración implícito, cuyo incremento de tiempo queda seleccionado automáticamente a partir del valor residual de medio paso (*half-step residual*). Asimismo, para evitar el ruido de altas frecuencias en las zonas en las que el incremento de tiempo varía rápidamente, se introdujo un amortiguamiento numérico en la resolución de las ecuaciones dinámicas, mediante la adopción de un valor del parámetro $\alpha = -0,10$.

De este modo, se aprecia un ligero amortiguamiento, con eliminación de las frecuencias altas, mientras que en las frecuencias bajas presenta un efecto insignificante.

El valor de la tenacidad a fractura dinámica (figura 13) se obtuvo a partir del momento flector en la sección central de la probeta (figura 10), en el instante de rotura, según

ASTM E.24.03.03 [2]; y a partir del trabajo realizado por las fuerzas exteriores, o energía de fractura, E_I (figura 12), según ASTM E992 [3]. Asimismo se tuvo en consideración el valor de la energía cinética (figura 11) en la determinación de la energía real de fractura, obteniéndose un tercer valor de la tenacidad [1].

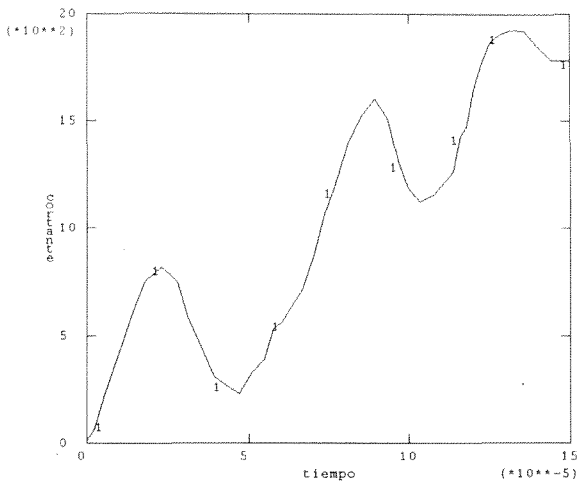


Fig. 9. Evolución del esfuerzo cortante.

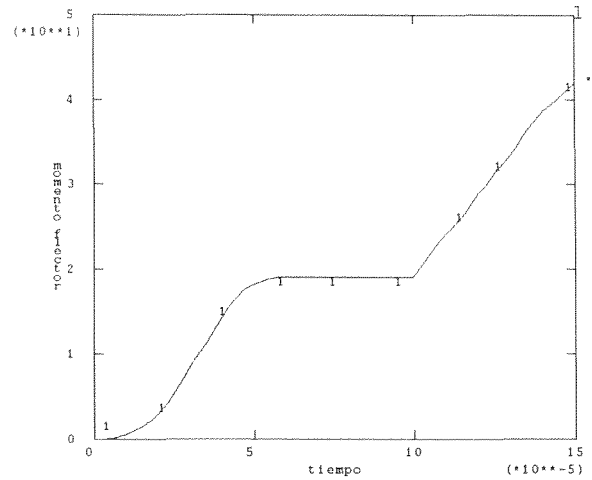


Fig. 10. Evolución del momento flector.

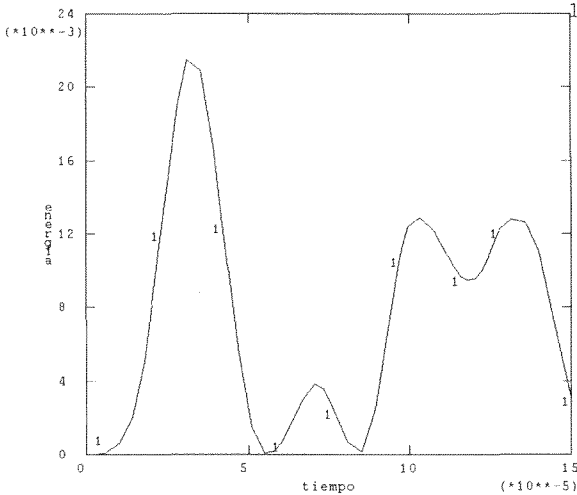


Fig. 11. Energía cinética de la probeta.

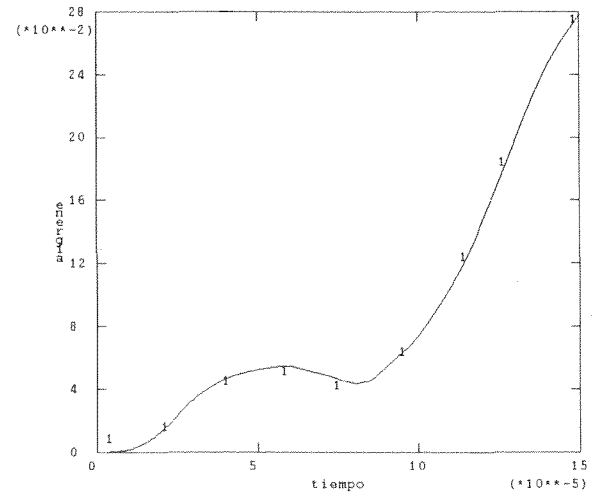


Fig. 12. Trabajo realizado por las fuerzas exteriores.

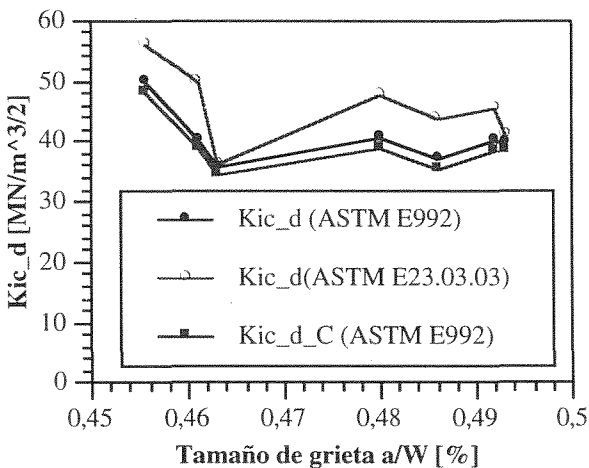


Fig. 13. Tenacidad a fractura dinámica, K_{Ic}^d .

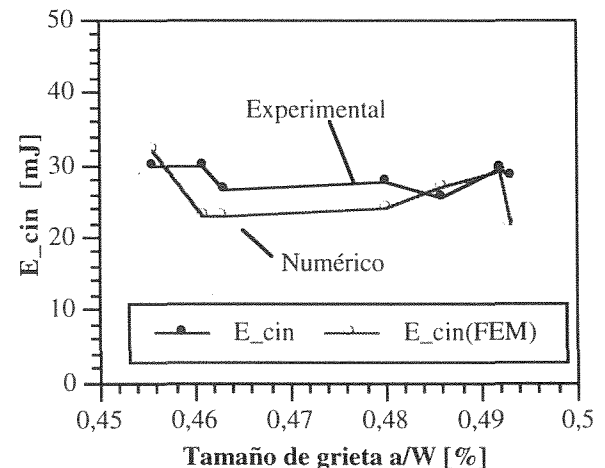


Fig. 14. Energía cinética de la probeta.

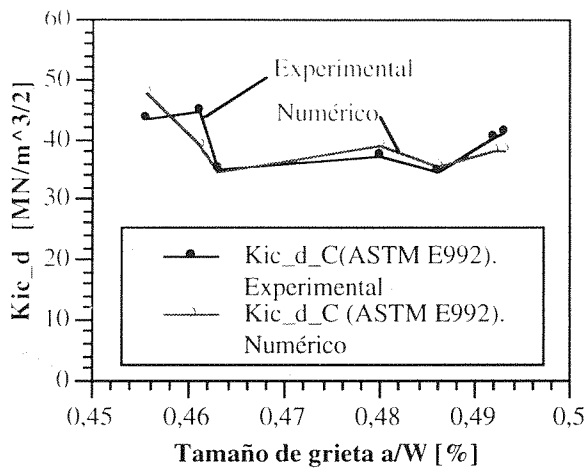


Fig. 15. Tenacidad a fractura dinámica, K_{Ic}^d , en función del tamaño de grieta.

6. COMPARACION DE RESULTADOS.

Los valores medios de la energía cinética obtenidos numéricamente, en los instantes próximos al de rotura, son similares o ligeramente inferiores a los deducidos experimentalmente, tal y como puede apreciarse en el gráfico de la figura 14.

En el gráfico de la figura 15 se han representado los resultados de la tenacidad a fractura dinámica calculados teniendo en cuenta la energía cinética de la probeta, observándose una buena aproximación entre los métodos numéricos y las técnicas experimentales.

Finalmente, en la figura 16 se muestran los valores de la energía de fractura y la energía cinética, las cuales permanecen casi constantes para los tamaños de grieta analizados. Siendo esta última del orden de un 10% de la energía de fractura.

7. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se apuntan las siguientes conclusiones :

- Los valores de tenacidad a fractura obtenidos a partir de la normativa ASTM E24.03.03 [2] proporcionan resultados mayores que los deducidos en base a ASTM E992 [3], dado que acusan en mayor medida las oscilaciones en las fuerzas, debidas a los efectos inerciales. Por tanto, parece más recomendable efectuar la caracterización dinámica en base a los criterios energéticos expuestos en la norma ASTM E992.

- La corrección de la energía cinética de la probeta se hace necesaria en el caso de materiales con bajas energías de fractura, menores de 0.5 J., como es aquí el caso. El valor de la energía cinética es del orden de un 10% de la energía de fractura, para bajas velocidades de impacto.

- El modelo de elementos finitos analizado reproduce con razonable exactitud el comportamiento real de una probeta Charpy sometida a un ensayo de impacto.

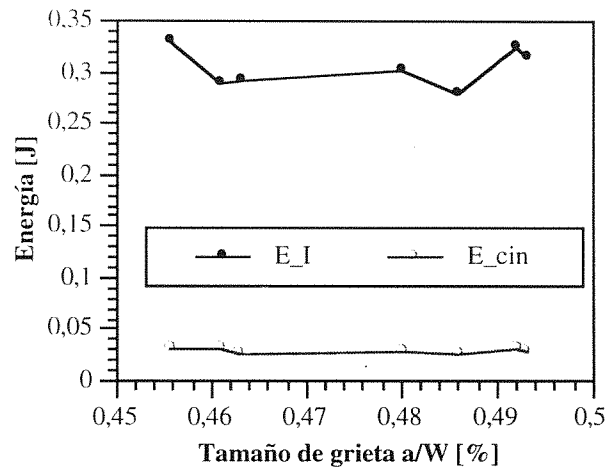


Fig.16. Energía de fractura y energía cinética de la probeta.

- Los correspondientes valores de la energía cinética de la probeta, en los instantes previos a la rotura, obtenidos numéricamente, son similares a los deducidos en base a ensayos experimentales, con un costo sensiblemente inferior.

8. AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación "Técnicas para la determinación de la tenacidad a fractura dinámica en aceros industriales"(Ref. PA-MAT92-03) financiado a través del Plan Regional de Investigación del Principado de Asturias, y con participación de FICYT, ENSIDESA y la Univ. de Oviedo. Asimismo agradecemos al Grupo de Mecánica experimental de la Universidad de Bóchum y, en especial, al Dr. J.F.Kalthoff, el uso de sus Laboratorios y la atención prestada.

10. REFERENCIAS

[1] COZ DIAZ, J., "Técnicas experimentales y métodos numéricos aplicados a la determinación de los parámetros de fractura dinámica". Tesis Doctoral. (1994).

[2] ASTM E24.03.03, "Proposed Standard method of test for instrumental impact testing of precracked Charpy specimens of metallic materials." Draft 2d, (1981).

[3] ASTM E992, "Standard Practice for Determination of Fracture Toughness of Steels Using Equivalent Energy Methodology ". (1989).

[4] KALTHOFF, J.F. y TAKAHASHI, S., "On the measurement of the true Impact Energy of Polimeric and Ceramic Specimens in Instrumented Impact Tests", Int.Symp. on Impact Eng., Japan, pp538-545 (1992).

[5] COZ DIAZ J., BETEGON C., FERNANDEZ. C., A., "Análisis de probetas Charpy prefisuradas mediante un modelo *line-spring*". SEMNI, II Congreso de Métodos Numéricos. Vol. I, pp 390-398 (1993).