

## TENACIDAD DE FRACTURA DINÁMICA

V. Sánchez Gálvez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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: vsanchez@mater.upm.es

## RESUMEN

Los fenómenos de impacto son ejemplos claros de fractura de materiales. El análisis de estos fenómenos se lleva a cabo mediante simulación numérica. En los códigos numéricos de simulación, el comportamiento mecánico de los materiales se modeliza a través de ecuaciones constitutivas. Como criterio de rotura se utilizan expresiones basadas en la acumulación de daño, medido en función de la deformación plástica equivalente o de la energía plástica. El uso de estas ecuaciones, en algunas ocasiones proporciona resultados totalmente discrepantes con las pruebas reales en la simulación del daño producido por explosiones. El efecto de una explosión sobre un elemento, es una región extensa y puede alcanzar al elemento completo. En estas circunstancias, la fractura puede aparecer en puntos donde existan defectos o grietas naturales o artificiales. Así pues la simulación numérica de elementos sometidos a explosiones debe incluir el cálculo en fractura, en los que es preciso determinar la tenacidad de fractura dinámica. Esta comunicación presenta una metodología de medida de la tenacidad de fractura dinámica  $K_{I_d}^C$  numérico-experimental, útil y necesaria en la simulación del efecto de explosiones sobre elementos estructurales.

## ABSTRACT

Impact phenomena are examples of materials fracture. Their analysis is being performed by numerical simulation. Mechanical behaviour of materials is modelled in hydrocodes by constitutive equations. Rupture criteria used to be expressions based on damage amount, function of plastic strain or plastic energy. The utilization of those equations lead sometimes to results different to those obtained in experimental tests of blast damage. Blast effect on an element is a wide zone, that could be extended to the whole element. In such conditions, rupture may happen in areas with flaws or cracks. Therefore, numerical simulation of blast effect on elements ought to include fracture analysis, that require the knowledge of dynamic fracture toughness. This paper shows a methodology to measure dynamic fracture toughness numerical/experimental necessary for numerical simulation of blast effect on structural elements.

**PALABRAS CLAVE:** Tenacidad de fractura dinámica, metodología de ensayo, barra Hopkinson, flexión en tres puntos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de la Fractura busca la respuesta a la cuestión de determinar las acciones que ocasionan la rotura de un elemento o componente estructural. En condiciones estáticas, el criterio de rotura más simple establece que un componente fisurado se rompe cuando el factor de intensidad de tensiones  $K_I$  alcanza el valor de la tenacidad de fractura del material  $K_{Ic}$ .

Sin embargo, existen numerosas situaciones en las que los elementos estructurales se rompen bajo la acción de cargas impulsivas, desde el caso del choque de vehículos hasta el del impacto de objetos desprendidos por la acción de un tornado, pasando por los efectos del impacto de proyectiles o de explosiones.

En estos casos, la iniciación de la propagación de una fisura tiene lugar en condiciones transitorias de tensión,

de forma que el factor de intensidad de tensiones es dependiente del tiempo y de la velocidad de sollicitación,  $K_{I_d}(t)$  y la tenacidad de fractura que debe utilizarse como criterio de rotura es la tenacidad de fractura dinámica  $K_{I_d}^C$ .

Sin embargo, a pesar de la importancia práctica de este análisis, la iniciación dinámica de fisuras ha recibido poca atención de los investigadores y de hecho los tratados existentes sobre Fractura Dinámica tratan casi exclusivamente sobre aspectos relacionados con la velocidad de propagación de fisuras y muy raramente consideran la iniciación dinámica de fisuras [1,2]

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PROCESOS DE ROTURA DINÁMICA

El análisis del comportamiento de un elemento estructural sometido a cargas impulsivas, como es por

ejemplo el caso del impacto balístico, puede llevarse a cabo por métodos empíricos, analíticos o numéricos. [3]

Los métodos empíricos se basan en la realización de pruebas experimentales reales (pruebas de fuego), que proporcionan una información escasa del fenómeno y que generalmente son costosas en tiempo y dinero.

Los modelos analíticos utilizan expresiones simplificadas, de las fuerzas que actúan sobre los sólidos involucrados en el proceso y asimismo emplean criterios de rotura simples de los materiales para deducir expresiones sencillas de las velocidades de penetración, perforación, límite balístico, etc. Estos modelos son útiles para estudiar casos concretos con rapidez pero tienen escasa capacidad predictiva, pues solamente están validados para un determinado tipo de impacto.

Los métodos numéricos se basan en la utilización de programas de simulación (hidrocódigos) basados en el método de los elementos finitos o de las diferencias finitas. En este caso se discretiza el problema tanto en el espacio como en el tiempo y se simula el proceso utilizando potentes ordenadores. La capacidad predictiva de los hidrocódigos implica disponer de modelos fiables del comportamiento de los materiales involucrados. Un modelo completo requiere determinar la ecuación de estado (EOS) del material que relaciona la presión, el volumen específico y la energía interna; la ecuación constitutiva que relaciona las tensiones y deformaciones desviadoras en función de la velocidad de deformación y de la temperatura y finalmente el criterio de rotura del material, función asimismo de la velocidad de deformación y de la temperatura [4].

Los métodos numéricos proporcionan una gran cantidad de información del proceso (historias de tensión, deformación, temperatura, mapas de velocidades, aceleraciones, regiones dañadas, etc.) y son mucho menos costosos en tiempo y dinero que las pruebas de fuego reales. Por todo ello, y teniendo en cuenta los grandes avances en capacidad y rapidez de cálculo experimentados por los ordenadores en los últimos años, la simulación numérica se ha convertido en una herramienta casi imprescindible para el análisis del comportamiento de elementos estructurales sometidos a cargas impulsivas.

### 3. CRITERIOS DE ROTURA DINÁMICA DE MATERIALES

En los hidrocódigos existentes, el material es considerado un medio continuo homogéneo, ausente de defectos, es decir, se supone que las propiedades mecánicas son idénticas de un punto a otro del material. En estas condiciones, el material rompe en los puntos más solicitados y la rotura progresa a medida que en otros puntos del elemento se alcanzan las tensiones o deformaciones que especifica el criterio de rotura utilizado.

Las ecuaciones constitutivas más utilizadas para simular el comportamiento de los materiales a altas velocidades

de deformación son las de Johnson-Cook [5] y Zerilli-Armstrong [6.]

La ecuación de Johnson-Cook es una expresión empírica que relaciona la tensión efectiva (tensión de Von Mises)  $\sigma$  con la deformación efectiva  $\epsilon$ :

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

donde  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  es la velocidad de deformación adimensional con  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$  y  $T^*$  es un parámetro definido como

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_f - T_r} \quad (2)$$

Siendo  $T$  la temperatura actual del punto considerado,  $T_r$  la temperatura ambiente y  $T_f$  la temperatura de fusión del material. Finalmente  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  y  $m$  son constantes empíricas.

El modelo de Zerilli-Armstrong es una relación entre tensiones y deformaciones efectivas deducido a partir de las ecuaciones de la dinámica de dislocaciones. Tiene por tanto un mayor fundamento físico. Para materiales cúbicos centrados en las caras (FCC) la expresión es

$$\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^n \left[ \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) \right] \quad (3)$$

mientras que para materiales cúbicos centrados (BCC) la expresión resulta

$$\sigma = C_0 + C_1 \left[ \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) \right] + C_5 \epsilon^n \quad (4)$$

Como en el caso anterior,  $\sigma$  es la tensión efectiva,  $\epsilon$  es la deformación efectiva,  $\dot{\epsilon}$  la velocidad de deformación,  $T$  la temperatura absoluta y  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  y  $n$ , constantes experimentales.

Algunos autores han encontrado una mayor concordancia con el comportamiento experimental cuando utilizan la ecuación de Zerilli-Armstrong que con la expresión de Johnson-Cook, mientras que otros autores han encontrado lo contrario. La ventaja del modelo de Johnson-Cook es que muchos hidrocódigos comerciales incluyen sus ecuaciones en el programa y existen datos experimentales de las constantes del modelo para un gran número de materiales de interés en ingeniería.

Además de las expresiones referidas, se han propuesto numerosas ecuaciones constitutivas para simular el comportamiento de los materiales a altas velocidades de deformación. No obstante, las distintas expresiones propuestas, aunque más ajustadas al comportamiento real para algunos materiales concretos, no han llegado a utilizarse fuera del ámbito de los propios autores de las mismas.

En cuanto a criterios de rotura, Hancock y Mackenzie [7] propusieron el siguiente criterio:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_n + A \exp\left\{-1,5 \frac{\sigma_m}{\sigma}\right\} \quad (5)$$

donde  $\varepsilon_f$  es la deformación de rotura,  $\varepsilon_n$  es la deformación para nucleación de cavidades,  $\sigma$  la tensión efectiva,  $\sigma_m$  la tensión hidrostática y  $A$  una constante empírica.

Johnson-Cook [8] generalizaron el criterio de Hancock y Mckenzie para considerar la influencia de la velocidad de deformación y de la temperatura. La expresión que proponen es:

$$\varepsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma}\right) \right] \left(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*\right) \left(1 + D_5 T^*\right) \quad (6)$$

donde  $\dot{\varepsilon}^*$  y  $T^*$  tienen el mismo significado que en la ecuación (1) y  $D_1, D_2, D_3, D_4$  y  $D_5$  son constantes experimentales.

En la simulación numérica, cada punto del elemento se caracteriza por un nivel de daño definido como

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (7)$$

donde  $\Delta \varepsilon$  es el incremento de deformación plástica equivalente y se supone que la rotura del punto considerado tiene lugar cuando el parámetro de daño  $D$  es igual a la unidad.

Las simulaciones numéricas de problemas de impacto utilizando las ecuaciones constitutivas y el criterio de rotura de Johnson-Cook proporcionan en general resultados aproximados al comportamiento real de los materiales, si bien como ya se indicó anteriormente numerosos investigadores proponen para casos concretos ecuaciones alternativas o criterios de rotura diferentes que proporcionan resultados más ajustados a los resultados experimentales.

#### 4. FRACTURA DINÁMICA

El problema de la simulación numérica de la acción de cargas impulsivas sobre elementos estructurales surge cuando se trata de modelizar problemas en los que la acción es extensa, como es por ejemplo el caso del efecto de explosiones.

En efecto, los problemas de impacto suelen ser muy localizados, afectando a una región muy pequeña en torno al punto de contacto. En estos casos la modelización de los materiales como medios continuos ausentes de defectos proporciona resultados razonablemente aceptables. Por el contrario la acción de una

explosión sobre un elemento estructural afecta en mayor o menor medida a todo el elemento, provocando roturas por propagación de grietas en puntos donde existían defectos previos aunque no fuesen los puntos más solicitados. De esta manera, la simulación numérica suponiendo medios homogéneos puede conducir a resultados totalmente erróneos.

Este efecto ha sido observado recientemente en el análisis del efecto de la explosión de minas bajo las ruedas de un vehículo [9, 10]. Aunque la simulación numérica sólo daba como resultado deformaciones plásticas del vehículo y rotura del neumático, las pruebas experimentales mostraban roturas en uniones soldadas y entrada de gases dentro del vehículo, con el consiguiente daño para los ocupantes.

La simulación numérica comenzó a proporcionar resultados aproximados a la realidad cuando se introdujeron defectos en las uniones soldadas. Estos defectos no suelen tener trascendencia, si el vehículo sufre un impacto, ya que la probabilidad de que el impacto suceda sobre la zona en la que se encuentra el defecto es muy baja, pero son críticos en el caso de que el vehículo sufra los efectos de una explosión. (ver figura 1).

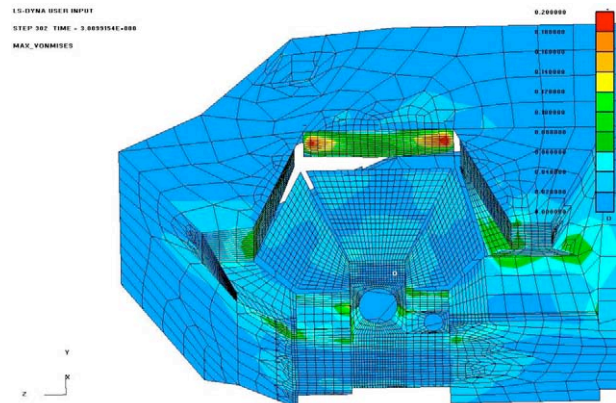


Figura 1. Simulación numérica con LS-DYNA de la explosión de una mina bajo la rueda delantera de un vehículo militar. Tiempo 3 ms. El material del cordón de soldadura se ha supuesto con una resistencia inferior a la del resto del vehículo.

Así pues, la simulación numérica de este tipo de acciones requiere determinar la posición, forma y tamaño de los defectos o fisuras existentes en el componente estudiado, así como determinar la tenacidad de fractura dinámica,  $K_{Ia}^c$ , del material. La implementación de estos datos en el hircódigo permite simular correctamente la eventualidad de la propagación de grietas y la rotura en su caso del elemento considerado.

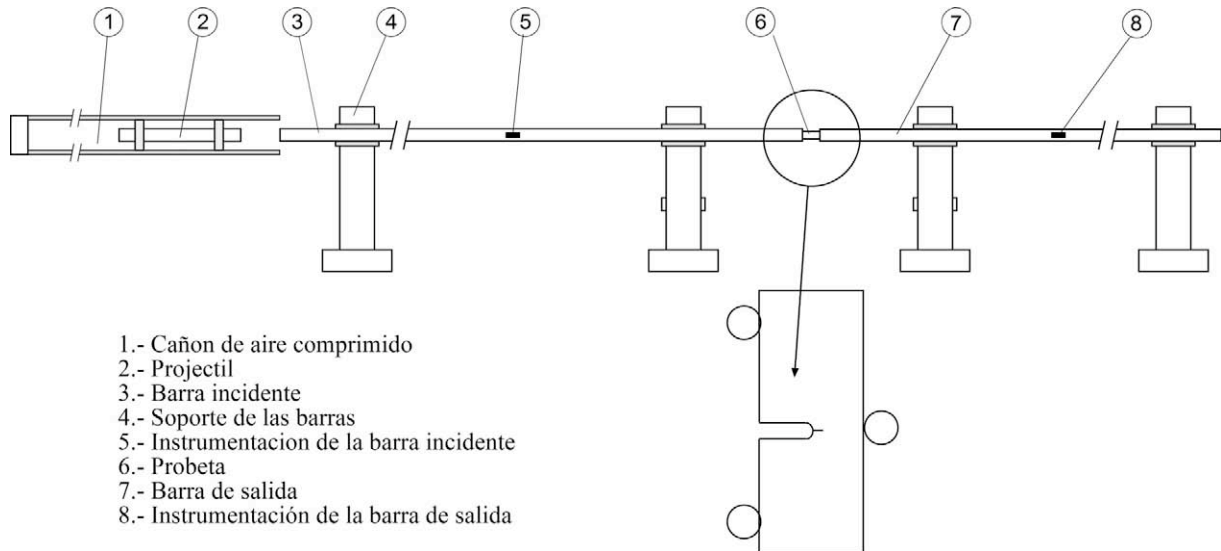


Figura 2. Esquema de la barra Hopkinson y de la probeta de flexión en tres puntos para el ensayo de tenacidad de fractura dinámica.

### 5. MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA DINÁMICA

El procedimiento de medida de la tenacidad de fractura dinámica fue propuesto por Bui, Maigre y Rittel [11, 12]. Es un método mixto experimental-numérico.

El análisis experimental se basa en la utilización de una barra Hopkinson en la que la tradicional probeta cilíndrica ha sido sustituida por una probeta de flexión en tres puntos prefisurada por fatiga (ver figura 2). Durante el ensayo, se obtiene el registro de las ondas incidente, reflejada y transmitida y asimismo mediante un procedimiento óptico de fotografía de alta velocidad o eléctrico (rotura de un hilo de contacto fijado a ambos lados de la punta de la fisura) se determina el instante de propagación de la fisura.

El análisis numérico permite definir el factor de intensidad de tensiones  $K_{Ia}(t)$  en función de la historia de cargas aplicada a la probeta. Finalmente, la combinación de ambos análisis proporciona el valor de la tenacidad de fractura dinámica  $K_{Ia}^c$  como el valor de  $K_{Ia}(t)$  para el tiempo  $t$  en que se inicia la propagación de la fisura.

El cálculo puede simplificarse notablemente considerando la linealidad del problema, lo que permite utilizar el método de convolución [13].

En este procedimiento se determina por métodos numéricos el  $COD(t)$  (o bien, el desplazamiento de un punto de la fisura  $\hat{v}(t)$  en dirección normal, igual a la mitad del  $COD(t)$ ) para un impulso unitario. Este cálculo permite determinar  $v(t)$  para cualquier historia de cargas  $F(t)$  sobre la probeta aplicando sencillamente la expresión.

$$v(t) = F(t) * \hat{v}(t) \quad (8)$$

Sin necesidad de repetir el cálculo por elementos finitos para cada valor de  $F(t)$ . A partir de  $v(t)$  se obtiene el factor de intensidad de tensiones en todo instante para deformación plana con la expresión

$$K_{Ia}(t) = \frac{v(t) E}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \quad (9)$$

donde  $E$  y  $\nu$  son el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del material y  $r$  es la distancia a la punta de la fisura del punto en el que se ha determinado  $v(t)$ .

### 6. CONCLUSIONES

La tenacidad de fractura dinámica es una propiedad de los materiales que no ha recibido gran atención de los investigadores en comparación con la tenacidad de fractura estática. De hecho, los tratados de Fractura Dinámica se centran casi exclusivamente en el análisis de la propagación de fisuras.

Sin embargo, la tenacidad de fractura dinámica es un parámetro de gran utilidad para determinar la seguridad de elementos estructurales sometidos a cargas impulsivas, especialmente en el caso de explosiones.

En esta comunicación se resume un procedimiento mixto numérico/experimental para determinar la tenacidad de fractura dinámica, utilizando una variante de la barra Hopkinson con probetas de flexión en tres puntos prefisuradas y el cálculo numérico con el método de los elementos finitos del factor de intensidad de tensiones dinámico. La única dificultad del método reside en obtener con precisión el instante en el que comienza la propagación de la fisura. Este tiempo puede obtenerse experimentalmente por fotografía ultrarrápida o mediante la fijación a la punta de la fisura de un hilo ultrafino que se rompe cuando la fisura inicia su propagación.

### AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación del proyecto a través del programa CONSOLIDER INGENIO 2010.

### REFERENCIAS

- [1] Rittel, D., "Dynamic crack initiation toughness", *Dynamic Fracture Mechanics*, Shukla, A. (Ed.), *World Scientific Publishing Co.*, pag. 69-103, 2006.
- [2] Freund, L. B., "Dynamic Fracture Mechanics", *Cambridge University Press*, pag. 1-162, 1990.
- [3] Sánchez Gálvez, V., "Analytical and numerical simulations of ballistic impact on composite light weight armours" in *Computational Ballistics II*, Sánchez Gálvez et al (Eds.) Wit Press, Southampton, pag. 3-10, 2005.
- [4] Zukas, J. A. "Numerical simulation of high rate behavior" in *Shock and Impact on Structures*. Brebbia, C. and Sánchez Gálvez, V. (Eds.) *Computational Mechanics Publications*, Southampton, pag. 1-26, 1994.
- [5] Johnson, G. R., Cook, W. H. "Constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures". *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*, The Hague, pag. 541-547, 1983.
- [6] Zerilli, F. J., Armstrong, R. W. "Dislocation-mechanics- based constitutive relations for material dynamics calculations". *Journal of Applied Physics*, 61, pag. 1816-1825, 1987.
- [7] Hancock. S. W., Mackenzie, A. C., *Journal of Mechanics and Physics of solids*, 24, pag. 147-169, 1976.
- [8] Johnson, G. R., Cook, W. H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", *Engineering Fracture Mechanics*, 21, pag. 31-48, 1985.
- [9] Gálvez, F., Cendón, D., Sánchez Gálvez, V., "Fracture strength of welded aluminum joints in commercial road vehicles", *Engineering Failure Analysis*, 13, pag. 260-270, 2006.
- [10] Cendón, D., Gálvez, F.; Rosselló, C., "Tuning of the Computer Model", *WS 2.E Report. EUCLID RTP 3.27*, Marzo 2003.
- [11] Rittel, D., Maigre, H., Bui, H. D., "A new method for dynamic fracture toughness testing", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 26, pag. 1593-1598, 1992.
- [12] Bui, H. D., Maigre, H., Rittel, D. "A new approach to the experimental determination of the dynamic stress intensity factor", *International Journal of Solids and Structures*, 29, pag. 2881-2895, 1992.
- [13] Weisbrod, G., Rittel, D., "A method for dynamic fracture toughness determination using short beams", *international Journal of Fracture*, 104, pag. 89-103, 2000.