

TENACIDAD DE FRACTURA DINÁMICA DE INICIACIÓN A DIFERENTES VELOCIDADES DE SOLICITACIÓN: TÉCNICAS EXPERIMENTALES

M.J. Pérez-Martín^{1*}, B. Erice², F. Gálvez¹

¹ Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid, España.

² Laboratoire de Mécanique des Solides, École Polytechnique, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France.

* Correo-e: mariajesus.perez@mater.upm.es

RESUMEN

En esta investigación se presentan diversos dispositivos experimentales diseñados para la realización de ensayos de tenacidad de fractura a diferentes velocidades de sollicitación. Se realizan ensayos de flexión en tres puntos de probetas normalizadas (ASTM E399) empleando una máquina servohidráulica, una torre de caída, una barra Hopkinson modificada y un dispositivo especialmente diseñado para trabajar con cargas explosivas. Para poder validar dichos dispositivos experimentales, se realizan estos ensayos sobre un material independiente de la velocidad de deformación; dicho material es la aleación de aluminio 7017-T73. Todos los ensayos realizados sobre dicha aleación dieron el mismo valor de tenacidad de fractura dinámica de iniciación; por lo tanto, los dispositivos experimentales diseñados se consideraron válidos para este fin. Una vez validada la técnica experimental, se llevan a cabo ensayos de flexión en tres puntos en un material dependiente de la velocidad de deformación. Por lo tanto, los dispositivos experimentales diseñados fueron utilizados para determinar la tenacidad de fractura dinámica de iniciación del acero Mars 240. Los resultados obtenidos muestran que, en el caso de este acero, la tenacidad de fractura dinámica de iniciación aumenta con la velocidad de sollicitación.

ABSTRACT

The design and development of different experimental devices for the purpose of performing fracture toughness tests at different loading-rates are presented. Three-point bending tests of pre-fatigued standard specimens (ASTM E399) were carried out employing a servo-hydraulic universal testing machine, a free-drop tower, a modified Split Hopkinson Pressure Bar and an explosive load transferring device. A rate-independent alloy, a 7017-T73 aluminium alloy, was selected in order to validate such devices. All of the 7017-T73 aluminium alloy experiments provided the same value of the dynamic fracture-initiation toughness. Therefore, the developed devices were validated and considered suitable for such a purpose. Fracture toughness test of a rate-dependent armour steel, a Mars240 steel, employing the developed devices, were performed in order to determine the evolution of the dynamic fracture-initiation toughness with the loading-rate. In this case, the dynamic fracture-initiation toughness values of the Mars 240 steel increased with the velocity of the application of the load.

PALABRAS CLAVE: Tenacidad de fractura dinámica de iniciación, Velocidad de sollicitación, Cargas explosivas.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es la continuación de la investigación llevada a cabo por Pérez-Martín *et al.* [1], por lo que a continuación se presenta una breve introducción que describe la motivación a dicho estudio.

Debido a que muchos materiales presentan propiedades mecánicas dependientes de la velocidad de deformación, se hace necesario evaluar dichas propiedades bajo condiciones lo más parecidas posibles a las reales de operación del material, o al menos, la evolución de éstas con la velocidad de sollicitación.

La tenacidad de fractura de un material es una propiedad que describe la resistencia que presenta dicho material a la fractura frágil ante la presencia de una grieta o fisura. En condiciones dinámicas, la tenacidad de fractura dinámica de iniciación es el parámetro que describe cuándo comenzará el crecimiento de la fisura. Bajo determinadas condiciones, dicho parámetro puede considerarse una propiedad del material, la cual es dependiente de la velocidad de deformación y de la temperatura.

La realización de ensayos de tenacidad de fractura dinámicos es una tarea complicada. En primer lugar, debido a que todavía no existe una normativa aplicable que regule la determinación de las propiedades de fractura; y en segundo lugar, ya que los ensayos experimentales se vuelven más complicados a medida que se aumenta la velocidad de sollicitación.

El objetivo principal de este estudio es el diseño y desarrollo de diferentes dispositivos experimentales que permitan determinar la evolución de la tenacidad de fractura dinámica de iniciación con la velocidad de sollicitación.

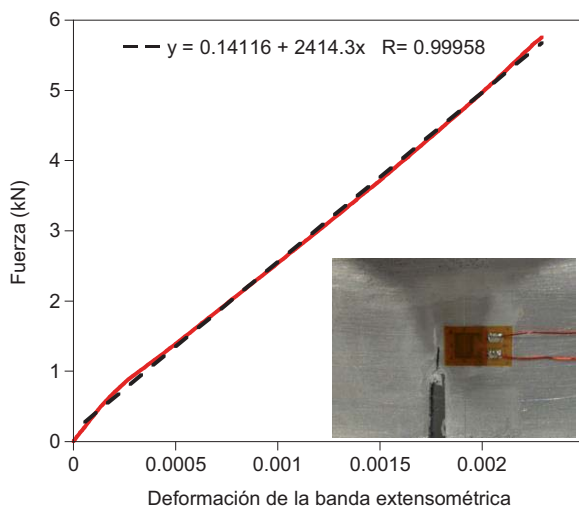


Figura 1. Relación lineal entre la deformación de la banda extensométrica y la carga a la que es sometida la probeta. Detalle de la banda adherida junto al extremo de la fisura.

2. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los dispositivos experimentales diseñados específicamente para la realización de ensayos de tenacidad de fractura a diferentes velocidades de sollicitación. Se realizan ensayos de flexión en tres puntos de probetas normalizadas (ASTM E399 [2]) empleando una máquina servohidráulica, una torre de caída, una barra Hopkinson modificada y un dispositivo especialmente diseñado para trabajar con cargas explosivas. El diseño inicial de los tres primeros fue descrito por Pérez-Martín *et al.* [1], por lo que en este trabajo se describen brevemente remarcando los cambios realizados hasta la obtención del diseño final.

Cabe destacar que debido a que en los ensayos a alta velocidad no hay disponible una célula de carga que permita medir la carga aplicada en cada momento, se hace necesaria la utilización de un sistema de medida indirecto de la misma. Para ello, una vez fisuradas todas las probetas y previo a la realización del ensayo de tenacidad de fractura, se adhiere una banda extensométrica junto al extremo de la fisura. A continuación, se aplica un ciclo de carga y descarga sin llegar a rotura ni propagar la fisura. De esta forma se obtiene una relación entre la deformación medida por la banda y la carga a la que es sometida la probeta. Esta relación entre la carga aplicada y la deformación medida por la banda extensométrica es lineal y diferente para cada probeta (ver Figura 1).

A su vez, los ensayos de flexión en tres puntos realizados con los tres primeros dispositivos son filmados y analizados mediante un sistema de correlación de imágenes digital. De esta forma se compara la medida de videoextensometría con la medida proporcionada por la banda extensométrica, y se comprueba que ambos registros coinciden.

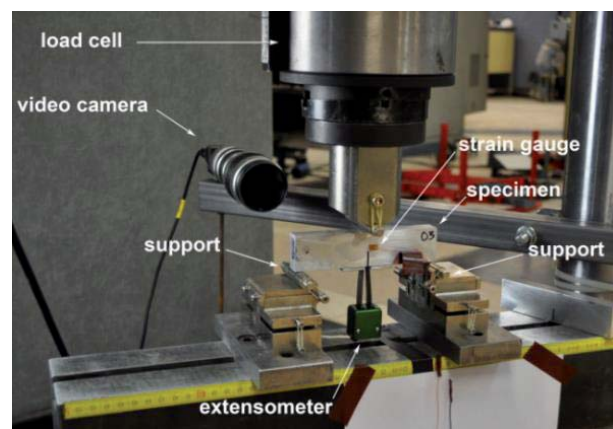


Figura 2. Dispositivo experimental de los ensayos cuasi-estáticos

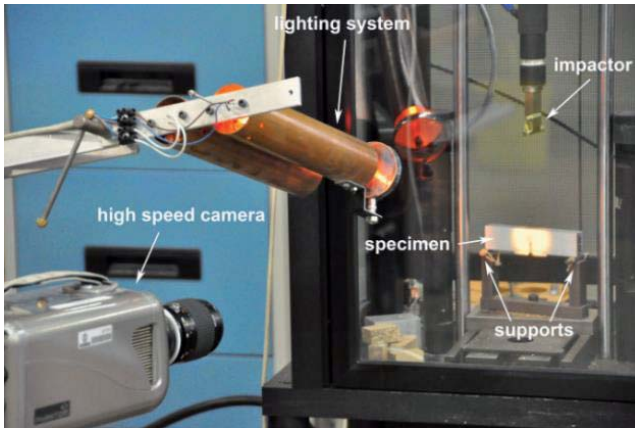


Figura 3. Dispositivo experimental de los ensayos en torre de caída.

2.1. Ensayos cuasi-estáticos

En una máquina universal de ensayos y siguiendo las recomendaciones de la norma [2], se realizan ensayos estáticos de medida de tenacidad de fractura sobre probetas de flexión normalizadas. En la Figura 2 puede observarse el dispositivo experimental utilizado. En estos ensayos la velocidad del punto de aplicación de la carga es de $3 \cdot 10^{-6}$ m/s.

2.2. Ensayos en torre de caída

Para la realización de los ensayos de tenacidad de fractura en torre de caída, se utiliza la misma disposición que la utilizada en los ensayos en máquina servohidráulica, como puede observarse en la Figura 3. La aplicación de la carga se realiza dejando caer un peso, colocado a cierta altura, sobre el material de ensayo. La velocidad del punto de aplicación de la carga en estos ensayos es de 4 m/s.

2.3. Ensayos en barra Hopkinson

El ensayo de flexión en tres puntos en barra Hopkinson consiste en impactar a alta velocidad una barra sobre el material a ensayar. Para la realización de dichos ensayos sobre la misma geometría de probeta que la utilizada con los anteriores dispositivos se hace necesaria una modificación de dicha barra. Para ello, el extremo que impacta sobre el material es un extremo con forma cilíndrica. La velocidad del punto de aplicación de la carga en estos ensayos es de 10 m/s.

En el diseño inicial no se utilizan los apoyos de la probeta ya que algunos estudios como el llevado a cabo por Chunhuan *et. al* [3] demuestran que en ensayos a elevada velocidad de sollicitación, en la fase inicial de carga existe una pérdida de contacto de la probeta con los apoyos, no influyendo estos en la rotura de la probeta. Al diseño final (ver Figura 4) se incorporan dos barras de salida, cada una con un cilindro acoplado, que actúan de apoyos de la probeta. Los resultados obtenidos demuestran que no existe diferencia entre

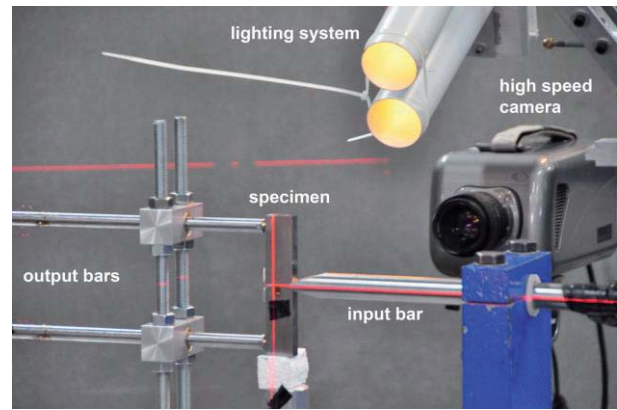


Figura 4. Dispositivo experimental de los ensayos en barra Hopkinson con apoyos en la probeta.

ambos diseños a la hora de obtener un valor de tenacidad de fractura dinámica de iniciación, al menos, a la velocidad de sollicitación ensayada.

2.4. Ensayos con carga explosiva

Para poder realizar ensayos de tenacidad de fractura a mayor velocidad de sollicitación de la que una barra Hopkinson puede alcanzar, se recurre al uso de cargas impulsivas. Para ello se diseña un dispositivo experimental [4] que permite realizar ensayos de flexión en tres puntos utilizando explosivos.

El dispositivo consiste en una caja de acero cuya tapa se encuentra expuesta directamente al explosivo. Dicha tapa es de material compuesto de fibra de vidrio y fibra de carbono. El dispositivo permite ensayar dos probetas a la vez. Cada probeta se sitúa sobre dos cilindros adheridos al fondo de la caja y otro cilindro adherido a la tapa de material compuesto es el encargado de aplicar la carga. Se utilizan dos muelles que aseguran el contacto inicial entre los cilindros que aplican la carga y las probetas. (ver Figura 5a). La caja con las probetas en su interior se coloca sobre uno de los lados de una estructura cuadrada de acero diseñada por Morales-Alonso *et al.* [5,6]. El explosivo se cuelga a cierta distancia de la caja de forma que ambos se encuentran en el mismo plano horizontal sobre el suelo, siendo la altura a la que están situados mayor que la distancia entre ambos. De esta forma la onda de choque provocada en la explosión alcanza directamente al dispositivo, golpeando cada punto de la superficie expuesta de la tapa de material compuesto al mismo tiempo. Por lo tanto, cuando la onda de choque alcanza el material compuesto, éste se mueve hacia el interior de la caja aplicando la carga a las probetas. La Figura 5b muestra una vista esquemática del conjunto experimental. Todos los sistemas de adquisición de datos se encuentran en un bunker situado a 20 m de distancia del punto de detonación.

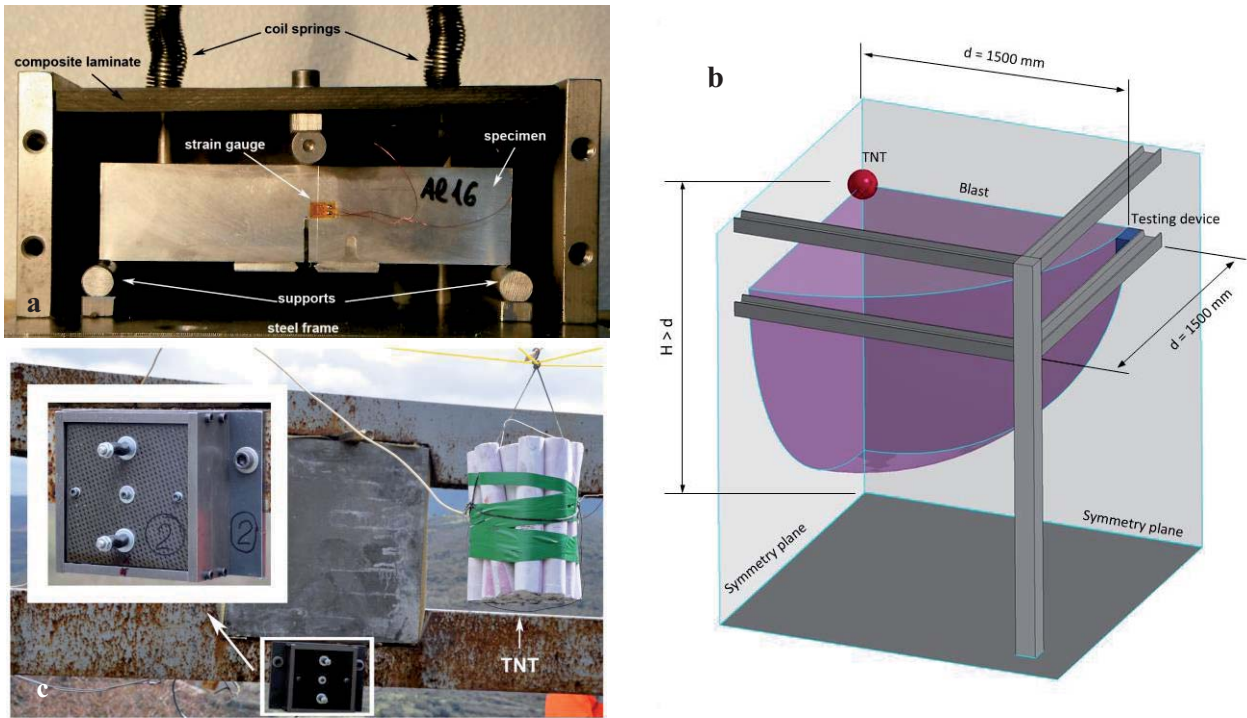


Figure 5. (a) Caja de acero con tapa de material compuesto en cuyo interior se encuentra posicionada la probeta de ensayo. (b) Esquema del conjunto experimental de los ensayos con carga explosiva. (c) Detalle de la caja montada sobre la estructura de acero y el explosivo colgado de ésta.

El explosivo utilizado en las detonaciones es el compuesto comercial Goma 2 ECO. Este explosivo se presenta en barras de 200 mm de longitud y 8 mm de diámetro, las cuales se atan formando un cilindro. Para que la onda de choque formada sea lo más simétrica posible, el paquete cilíndrico explosivo se cuelga en posición vertical de la estructura de acero (Figura 5c). La cantidad de explosivo a utilizar, expresada en equivalente de TNT, viene restringida por motivos de contaminación acústica a un máximo de 5 kg. En los ensayos realizados se utilizan entre 3.325 kg y 4.921 kg de equivalente de TNT.

Para poder determinar la velocidad del punto de aplicación de la carga, se acopla un acelerómetro a la tapa de material compuesto. La historia de presiones se obtiene gracias a un transductor de presión situado en el mismo plano vertical que la caja y a la misma distancia del explosivo. La historia de presiones depende principalmente de la cantidad de explosivo utilizado y de la distancia entre el dispositivo y el explosivo. Pero cabe destacar que ésta también se ve influenciada en cierta medida por la situación meteorológica existente en el momento de la detonación. La velocidad de aplicación de la carga en los ensayos de tenacidad de fractura así realizados varía entre 12 m/s y 60 m/s.

3. MATERIALES

Los materiales utilizados en este estudio son dos, la aleación de aluminio 7017-T73 y el acero Mars 240.

Inicialmente, la aleación de aluminio 7017-T73 es seleccionada debido a que su comportamiento mecánico es prácticamente independiente de la velocidad de deformación [7]. Esta característica lo convierte en un material excepcional para validar las técnicas experimentales diseñadas, ya que todos los ensayos flexión en tres puntos realizados a diferentes velocidades de sollicitación obtendrán el mismo valor de tenacidad de fractura dinámica de iniciación. La composición química de la aleación Al 7017-T73 y sus principales propiedades mecánicas pueden observarse en la tabla 1.

Una vez que las técnicas experimentales son validadas como procedimientos de ensayo para la obtención de la tenacidad de fractura dinámica de iniciación con suficiente grado de precisión, dichas técnicas son utilizadas para el ensayo de un material susceptible a la velocidad de deformación. En este caso el material utilizado es el acero Mars 240. Su composición química y principales propiedades mecánicas se encuentran resumidas en la tabla 2.

Tabla 1. Composición química certificada y propiedades mecánicas principales de la aleación Al7017-T73.

Composición química en % en peso.								Propiedades mecánicas			
Zn	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	Cr	Zr	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_f (%)
5.1	2.4	0.3	0.16	0.12	0.22	0.16	0.12	71	450	499	12

Tabla 2. Composición química certificada y propiedades mecánicas principales del acero Mars 240.

Composición química en % en peso.								Propiedades mecánicas			
C	Cr	Ni	Mo	Mn	S	P	Si	H (HB)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_f (%)
0.30	1.6	1.8	0.6	1.00	0.002	0.010	0.4	495	1300	1700	12

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En los ensayos cuasi-estáticos, la carga aplicada al material es obtenida de dos maneras diferentes: de la célula de carga y a través de la relación lineal entre la carga aplicada y la deformación medida por la banda extensométrica, calibrada específicamente para cada probeta. Ambos métodos proporcionan la misma historia de carga durante el ensayo. Además, se comprueba que la historia de deformaciones medida por la banda extensométrica coincide con la obtenida por videoextensometría con el sistema de correlación de imágenes digital. Esta misma comprobación se realiza en los ensayos llevados a cabo en la torre de caída y en la barra Hopkinson. En los ensayos con carga explosiva, debido a la configuración del dispositivo experimental y al uso de explosivos, únicamente la historia de deformaciones medida por la banda extensométrica es la que proporciona la medida de carga aplicada.

4.1. Aleación de aluminio 7017-T73

A los resultados previos obtenidos por Pérez-Martín *et al.* [1,8] de tenacidad de fractura dinámica de iniciación del Al 7017-T73 empleando las técnicas cuasi-estática, torre de caída y barra Hopkinson, se añaden los resultados obtenidos en barra Hopkinson con apoyos en la probeta y los obtenidos en los ensayos con carga explosiva. Todos estos resultados están resumidos en la figura 6. Como puede observarse en dicha figura, el valor medio de tenacidad de fractura dinámica de iniciación de la aleación Al 7017-T73 empleando las cuatro técnicas experimentales es de 33 MPam^{1/2}. La dispersión de valores obtenida en los ensayos de barra Hopkinson es mayor que la encontrada en los ensayos cuasi-estáticos y los realizados en torre de caída. La existencia de una pequeña desalineación entre las barras y la probeta es la principal causa de esta mayor dispersión en los resultados. En cuanto a la dispersión de resultados encontrada en los ensayos realizados con carga explosiva, hay que tener en cuenta que estos ensayos se realizan al aire libre y no en un laboratorio donde las condiciones de ensayos son siempre las mismas. Además, es importante destacar que la propia explosión depende de las condiciones atmosféricas. Prueba de ello es la diferencia encontrada en los registros de las historias de presión, bajo mismas condiciones de carga de explosivo y distancia entre el dispositivo experimental y el explosivo.

En cualquier caso, la dispersión de resultados obtenida es muy pequeña y por lo tanto, una de las conclusiones principales de esta investigación es que las técnicas experimentales diseñadas se consideran procedimientos válidos de ensayo para la obtención de la tenacidad de

fractura dinámica de iniciación con suficiente grado de precisión.

4.2. Acero Mars 240

En el caso del acero Mars 240, no se realizan ensayos en torre de caída ya que se prefiere enfocar la investigación a ensayos realizados a mayor velocidad de sollicitación. Los resultados obtenidos de tenacidad de fractura dinámica de iniciación de todos los ensayos realizados se encuentran recogidos en la gráfica de la figura 7.

El valor medio de tenacidad de fractura obtenido en los ensayos cuasi-estáticos, los cuales están realizados a una velocidad del punto de aplicación de la carga de $3 \cdot 10^{-6}$ m/s, es de 42 MPam^{1/2}. Además, la dispersión de resultados es muy pequeña.

En el caso de los ensayos realizados en barra Hopkinson, la velocidad del punto de aplicación de la carga es de 10 m/s, tanto para los ensayos realizados con como sin apoyos. El valor medio de tenacidad de fractura dinámica de iniciación obtenido es de 57 MPam^{1/2}. En este caso, la dispersión de resultados encontrada es mayor que la obtenida en los ensayos cuasi-estáticos. Esta dispersión puede ser debida a la existencia de una pequeña desalineación entre las barras y la probeta.

En los ensayos con cargas explosivas, no se puede hablar de un valor medio de tenacidad de fractura dinámica de iniciación ya que las historias de presiones obtenidas son diferentes en cada detonación, variando la presión en el momento del ensayo entre 70 bar y casi 140 bar. Esto es debido a que la cantidad de explosivo y la distancia entre el dispositivo y el explosivo se fueron variando para obtener distintas velocidades del punto de aplicación de la carga. La cantidad de explosivo utilizada está comprendida entre 3.325 kg y 4.921 kg de equivalente de TNT, mientras que la distancia entre el explosivo y el dispositivo varía entre 1.50 m y 1.10 m; obteniéndose velocidades del punto de aplicación de la carga comprendidas entre 12 m/s y 60 m/s. Los valores de tenacidad de fractura dinámica de iniciación del acero Mars 240 obtenidos varían entre los 53 MPam^{1/2} hasta los 135 MPam^{1/2}.

La principal conclusión que se obtienen de los ensayos de flexión en tres puntos realizados empleando las diferentes técnicas experimentales diseñadas es que la tenacidad de fractura dinámica de iniciación del acero Mars 240 aumenta al aumentar la velocidad de sollicitación.

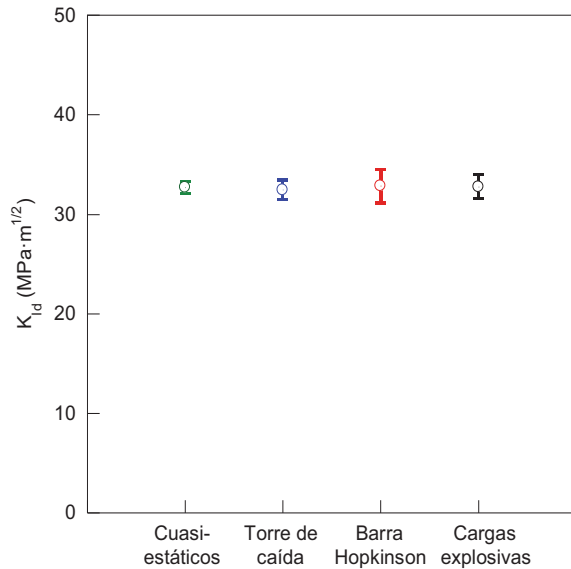


Figura 6. Valores medios de tenacidad de fractura dinámica de iniciación de la aleación Al7017-T73.

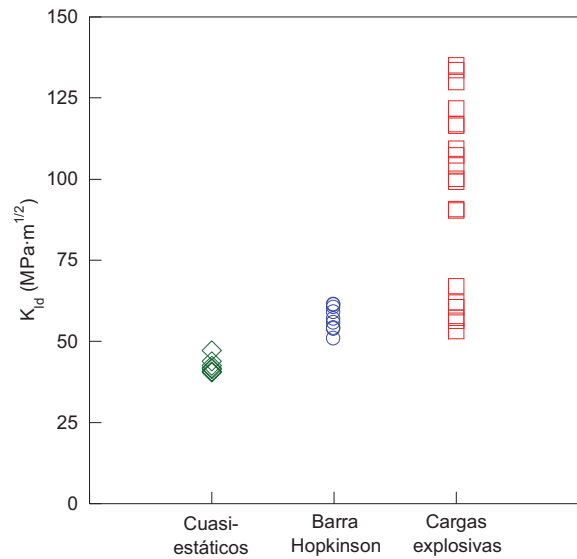


Figura 7. Valores de tenacidad de fractura dinámica de iniciación del acero Mars 240.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad la financiación del proyecto a través de la ayuda BIA2011-24445.

REFERENCIAS

[1] M.J. Pérez-Martín, B. Erice, D.A. Cendón, F. Gálvez y V. Sánchez-Gálvez. Medida de la tenacidad de fractura de la aleación Al 7017 a diferentes velocidades de deformación. *Anales de Mecánica de la Fractura* 30, Vol. II, pp. 267-272, 2013.

[2] ASTM E399-12e3. Standard Test Method for Linear Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. *Book of ASTM Standards* Volume 03.01.

[3] G. Chunhuan, J. Fengchun, L. Ruitang and Y. Yang. Size effect on the contact state between fracture specimen and supports in Hopkinson bar loaded fracture test. *International Journal of Fracture* 169, pp. 77-84, 2011.

[4] M.J. Pérez-Martín, B. Erice, D.A. Cendón and F. Gálvez. A novel method for measuring the dynamic fracture-initiation toughness under impulsive loadings. *Proceedings of the 28th International Symposium on Ballistics*, pp. 211-219, Atlanta, USA, 2014.

[5] G. Morales-Alonso, D.A. Cendón, F. Gálvez, B. Erice and V. Sánchez-Gálvez. Blast response analysis of reinforced concrete slabs: experimental procedure and numerical simulation. *Journal of Applied Mechanics* 78, pp. 051010-1-051010-12, 2011.

[6] G. Morales-Alonso. Experimental and numerical analysis of reinforced concrete elements subjected to blast loading. *PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid*, 2013.

[7] J. Rodríguez, C. Navarro and V. Sánchez-Gálvez. Some corrections to the data analysis of the dynamic tensile tests in the Hopkinson bar. *Journal de Physique* IV, 4(8), pp. 83-88, 1994.

[8] M.J. Pérez-Martín, B. Erice and F. Gálvez. On the loading-rate dependence of the Al 7017-T73 fracture-initiation toughness. *Procedia Materials Science* 3C, pp. 1026-1031, 2014.