

OBTENCIÓN DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES EN PARADA DE FISURA (K_{Ia}) PARA ACEROS ESTRUCTURALES POR MEDIO DE ENSAYOS CHARPY INSTRUMENTADO Y CRACK ARREST COMPACTO

C. Gallo, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana y A. Saiz

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Av. de los Castros s/n, 39005, Santander. Tfno. 942-201837

Resumen. La capacidad que tiene un material para detener una fisura que inicia una propagación frágil en el interior de un componente puede conocerse mediante el factor de intensidad de tensiones en parada de fisura (K_{Ia}). Este resultado se obtiene de forma normalizada por medio del ensayo Crack Arrest Compacto (CCA), aunque su realización resulta complicada. Sin embargo, su desarrollo se ha llevado a cabo en dos tipos de aceros estructurales empleados en la construcción de cascos de buques.

Un ensayo más sencillo como es el Charpy Instrumentado permite determinar a través de la carga de parada de fisura (F_A) el valor del factor K_{Ia} del material. En este trabajo se han obtenido resultados de K_{Ia} a partir de este ensayo para los dos aceros estudiados, comparándolos posteriormente con los obtenidos por medio del ensayo CCA.

Abstract. The capacity of a material to arrest a crack that initiates a brittle propagation into a component can be determined by means of plane strain crack arrest fracture toughness (K_{Ia}). A normalised way to obtain this result is through the Compact Crack Arrest (CCA) test. Although this test has a complicated set-up, it has been carried out with two types of structural steels used in the construction of ship hulls.

The Instrumented Charpy test, which is easier than CCA test, allows the materials parameter K_{Ia} to be determined through the crack arrest load (F_A). K_{Ia} results on two studied steels have been obtained by means of this test and compared with CCA results in the present work.

1. INTRODUCCIÓN

El factor de intensidad de tensiones en parada de fisura (K_{Ia}) de un material se caracteriza por ser, junto con la temperatura de parada de fisura (CAT), una de las propiedades que determinan la capacidad del material para detener una fisura que inicia una propagación de tipo frágil en el interior de una estructura o componente. Este parámetro K_{Ia} se obtiene mediante el ensayo Crack Arrest Compacto (CCA), especificado por la norma americana ASTM E 1221 / 96 [1].

La realización de este ensayo es costosa porque requiere gran cantidad de material, un complejo sistema de montaje y en ocasiones (dependiendo de la temperatura de ensayo) no se alcanza un resultado satisfactorio. Por este motivo se acude a ensayos más sencillos, como pueden ser los ensayos Charpy Instrumentados. Por su instrumentalización es posible obtener para cada temperatura de ensayo la carga de parada de fisura (P_A) a partir del análisis del diagrama carga-desplazamiento, y con ella el valor de K_{Ia} .

El estudio de las condiciones de parada de fisura se ha llevado a cabo en este trabajo con dos aceros estructurales empleados en la construcción de los cascos de buques (Grade A y AH32). Para ello se han realizado ensayos en diferentes condiciones de baja temperatura similares a situaciones reales de trabajo.

Los resultados del factor K_{Ia} obtenidos por medio del ensayo Charpy Instrumentado se comparan con los obtenidos en los ensayos Crack Arrest Compacto para determinar su grado de veracidad.

2. APLICACIÓN: MATERIALES ANALIZADOS

Los ensayos CCA y Charpy Instrumentado han sido realizados con dos tipos de aceros estructurales que se emplean habitualmente en la industria naval para la construcción de cascos de buques. Estos aceros son el Grade A resultante de un proceso de laminación y el AH32 normalizado y tratado termomecánicamente.

El acero Grade A procede de chapa de espesor 15 mm, mientras que para el acero AH32 es de 25 mm. Los valores principales de composición química están indicados en la Tabla 1 y sus propiedades mecánicas están incluidas en la Tabla 2 [2].

Tabla 1. Composición química.

Elemento	Composición Química	
	Grade A	AH32
C	0.13	0.099
Si	0.24	0.26
Mn	0.66	1.30
P	0.015	0.019
S	0.016	0.004
Cr	< 0.02	0.020
Ni	< 0.02	0.020
Ceq.	0.243	0.321

Tabla 2. Propiedades mecánicas.

Acero	Grade A		AH32	
	LT	TL	LT	TL
Límite Elástico (MPa)	272.5	274.0	388.5	398.5
Tensión Última (MPa)	450.0	455.2	504.0	509.1
Deformación en Rotura	16.3 %	17.2 %	15.7 %	15.6 %

3. ENSAYOS CRACK ARREST COMPACTOS

El ensayo Crack Arrest Compacto (CCA) se encuentra incluido en los ensayos basados en el Factor de Intensidad de Tensiones [3]. En este trabajo se han realizado ensayos CCA con los dos aceros estudiados siguiendo los criterios establecidos por la norma ASTM E1221-96 [1].

La geometría de la probeta es similar a una CT y sus dimensiones se definen en función del espesor de la chapa. En el caso del acero Grade A la sección es de 144 x 144 mm, mientras que para el acero AH32 se han mecanizado probetas con la misma sección y otras con 200 x 200 mm. La Fig. 1 (a) muestra una probeta mecanizada del acero Grade A, donde puede verse la ranura lateral.

La probeta se diseña con una zona de material soldado de tipo frágil en el inicio de la fisura y una entalla mecanizada por electroerosión para favorecer la propagación de la fisura. En la Fig. 1 (b) se presenta un detalle de la pieza donde puede verse la zona de soldadura.

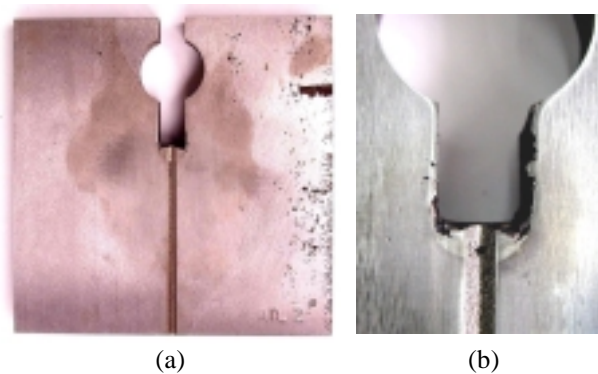


Fig. 1. (a) Probeta CCA. (b) Detalle de soldadura.

El ensayo CCA consiste en aplicar sucesivos ciclos de carga y descarga por medio de una cuña con pasadores que actúan en el agujero de la probeta. Cada ciclo de carga se mantiene hasta que se alcanza una deformación (desplazamiento) prevista medida por el extensómetro o hasta que la fisura inicia la propagación [1].

La Fig. 2 muestra el montaje de la pieza con la cuña, los pasadores y el extensómetro situado en su punto de medida.

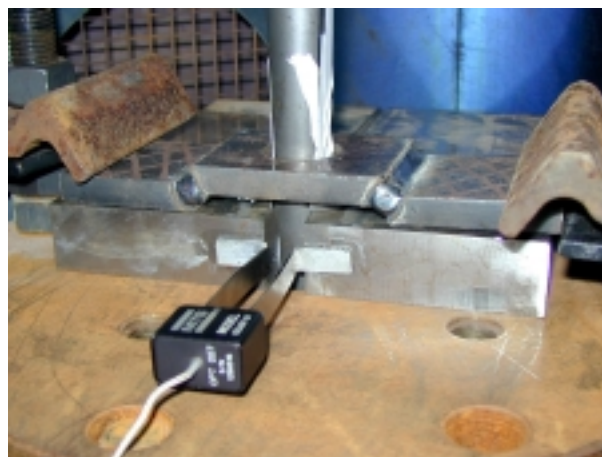


Fig. 2. Montaje de probeta CCA para ensayo.

La probeta se sitúa sobre una pieza soporte con un agujero que permite el paso de la cuña durante los ciclos de carga y descarga. Mediante dos sujeciones laterales se fija la probeta a la base de apoyo para evitar desplazamientos indeseados.

El conjunto formado por la probeta, sistema de carga y extensómetro se introduce en una cámara de enfriamiento para realizar los ensayos a bajas temperaturas. La cámara está conectada a una botella de nitrógeno líquido por medio de latiguillos, permitiendo para estos ensayos trabajar en un rango de temperatura entre -20 y -100 °C.

La Fig. 3 muestra la probeta colocada en la pieza soporte en el interior de la cámara de enfriamiento en el instante previo a la realización del ensayo.



Fig. 3 Montaje del ensayo durante el enfriamiento.

En este ensayo se obtiene la variación de carga aplicada por la cuña frente a la abertura de la pieza medida por el extensómetro. Los valores de abertura en los instantes de propagación y parada junto con los valores residuales de cada ciclo permiten determinar los factores K_0 y K_{Ia} .

La Fig. 4 presenta un ejemplo de los ciclos de carga de una probeta con propagación y parada de fisura en el tercer ciclo.

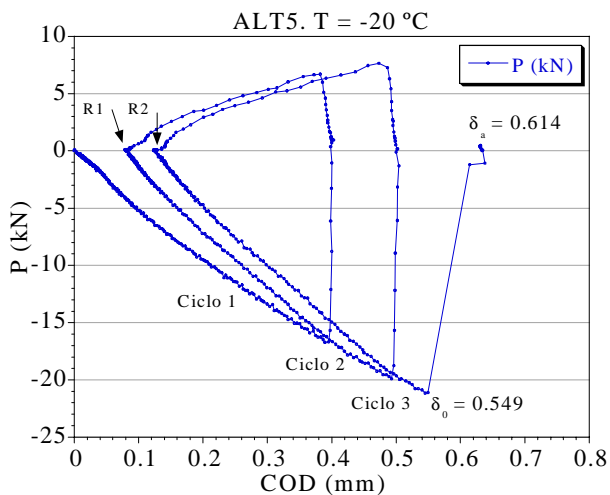


Fig. 4 Curva carga-desplazamiento. Acero Grade A.

El cálculo de los factores de intensidad de tensiones requiere conocer las longitudes de fisura inicial y final, por lo que, una vez finalizado el ensayo es necesario romper la probeta para examinar la superficie propagada, tal como muestra la Fig. 5.

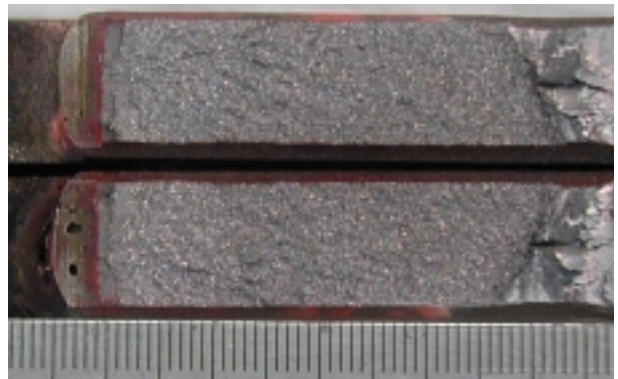


Fig. 5 Sección de rotura. Acero Grade A, probeta ALT5.

La Tabla 3 contiene los resultados de los factores de intensidad de tensiones del acero Grade A en sus dos direcciones para cada temperatura de ensayo [4].

Tabla 3. Resultados del ensayo CCA. Acero Grade A.

T (°C)	Código	K_0 (Mpa*m ^{1/2})	K_{Ia} (Mpa*m ^{1/2})
TL			
20	ATL4	---	---
-20	ATL1	82.97	61.03
	ATL2	> 152.30	---
	ATL3	87.92	65.61
-70	ATL5	> 162.75	---
	ATL6	77.33	56.61
LT			
-20	ALT5	104.08	52.80
-50	ALT1	> 105.08	---
	ALT4	> 116.51	---
-70	ALT3	66.85	41.66
	ALT6	78.94	47.74

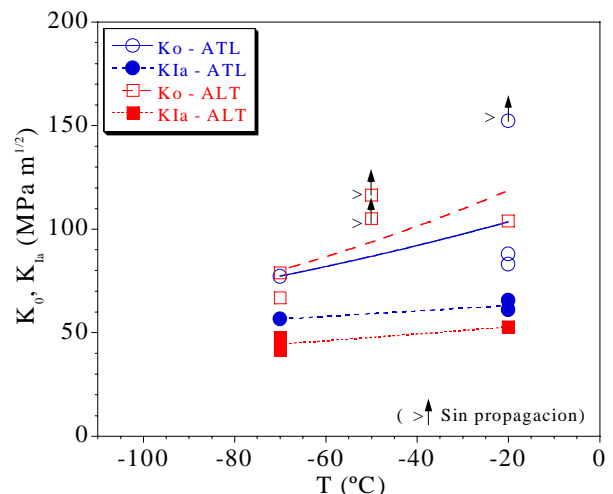


Fig. 6 Resultados del ensayo CCA. Acero Grade A.

La Fig. 6 muestra la representación gráfica de los resultados del factor de intensidad de tensiones inicial y de parada de fisura a cada temperatura para el acero

Grade A. Como puede verse en la figura K_{Ia} aumenta con la temperatura de forma ligera, siendo la curva utilizada para su ajuste de tipo exponencial. Igual tipo de ajuste se ha utilizado para aproximar el factor K_0 aunque en este caso su pendiente es mucho mayor debido a que la fisura no ha propagado para ciertas temperaturas.

Los resultados del acero AH32 se incluyen en la Tabla 4 y su representación gráfica se muestra en la Fig. 7.

Tabla 4. Resultados del ensayo CCA. Acero AH32.

T (°C)	Código	K_0 (Mpa*m ^{1/2})	K_{Ia} (Mpa*m ^{1/2})
TL			
-20	HTL5	> 178.97	---
-50	HTLB	> 187.52	---
	HTLC	> 181.13	---
-60	HTL3	146.71	*
	HTL4	> 168.30	---
-70	HTLA	113.41	73.35
	HTL1	128.03	84.68
	HTL2	94.20	59.87
-80	HTL6	132.81	*
LT			
-70	HLT1	66.35	48.94
-80	HLT5	81.84	62.59
	HLT3	> 162.30	---
-90	HLT4	108.63	56.26
-100	HLT2	72.92	56.87

HTLA, HTLB y HTLC: 144 x 144 mm
* Sin parada de fisura

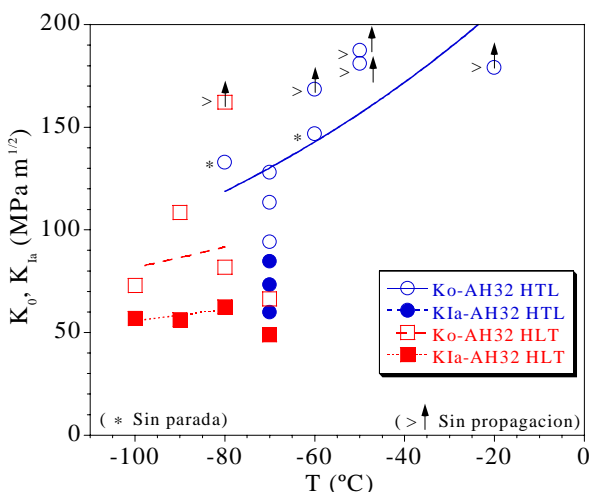


Fig. 7 Resultados del ensayo CCA. Acero AH 32.

En esta figura se observa que los factores de intensidad de tensiones, tanto inicial como de parada de fisura, presentan una progresión casi constante en la dirección de laminación LT mientras que en el caso de la dirección transversal el factor K_0 aumenta con la temperatura hasta no propagar.

A pesar de los numerosos ensayos realizados se han obtenido pocos resultados del factor de intensidad de tensiones de parada de fisura. La dificultad estriba en conseguir que la fisura propague previamente a los seis ciclos que se estiman máximos para obtener un estado de deformación plana, y en el caso de que propague conseguir que se detenga.

Los ensayos realizados con el acero AH32 han sido en general a menores temperaturas, llegando por ejemplo hasta una temperatura de -100 °C. Esta diferencia en el criterio de definición de las temperaturas de ensayo frente al acero Grade A tiene justificación en la relación existente entre la curva de energía de rotura del ensayo Charpy Instrumentado y los resultados del ensayo Crack Arrest Compacto [5].

Comparando el factor de intensidad de tensiones de parada de fisura en ambos aceros se observa que para una misma temperatura este factor es menor en el acero Grade A.

4. ENSAYOS CHARPY INSTRUMENTADOS

El factor K_{Ia} de un material en función de la temperatura de trabajo también se puede determinar por medio de los ensayos Charpy Instrumentados. Para ello es necesario obtener en el diagrama carga-desplazamiento del ensayo la carga de parada de fisura (F_a).

La Fig. 8 presenta un ejemplo de diagrama carga-desplazamiento obtenido con este ensayo. En ella pueden verse marcados los puntos más significativos del proceso de rotura, que determinan las componentes de la energía de rotura [6].

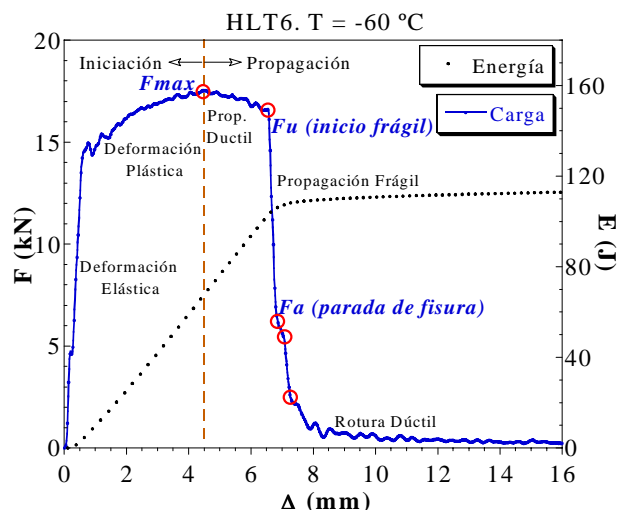


Fig. 8. Diagrama típico. Ensayo Charpy Instrumentado.

Representando cada carga de parada frente a la temperatura y aproximando los resultados mediante una función exponencial se obtiene la temperatura correspondiente al valor de 4 kN ($T_{Fa=4kN}$).

La ecuación exponencial que ajusta los valores de carga de parada (F_a) frente a la temperatura de ensayo tiene la siguiente expresión [7]:

$$F_a = 4 \cdot e^{\left\{ \frac{(T - T_{Fa = 4kN})}{A} \right\}} \quad (1)$$

donde A es un parámetro de ajuste del material (°C). Los valores de T vienen en °C y de F_a en kN.

Los resultados de carga de parada de fisura para el acero Grade A en sus dos direcciones de laminación se presentan en la Fig. 9. Asimismo, los resultados de este parámetro para el acero AH32 en ambas direcciones se muestran en la Fig. 10.

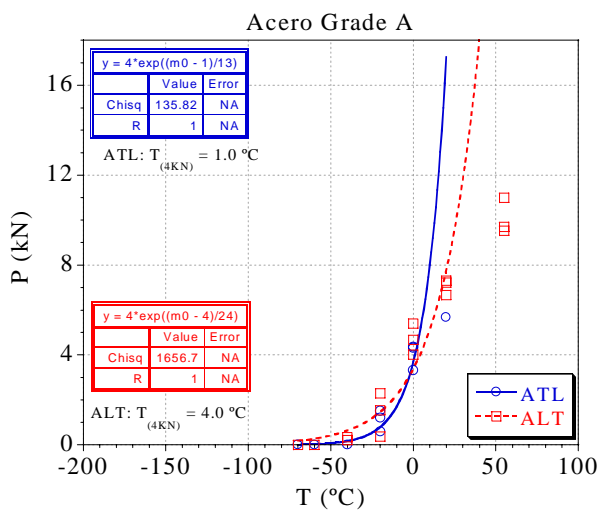


Fig. 9. Carga de parada de fisura. Acero Grade A.

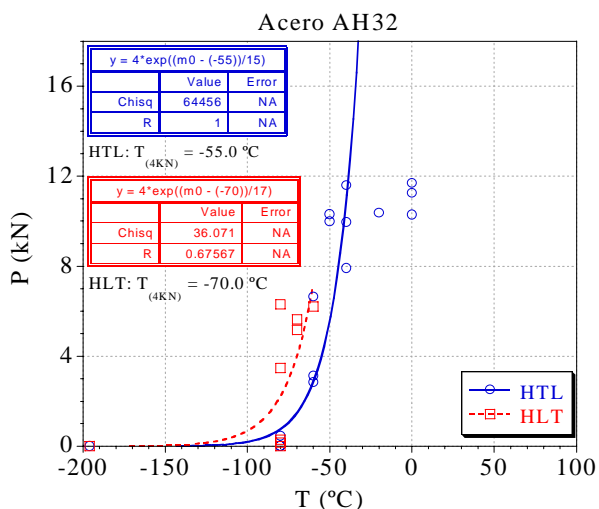


Fig. 10. Carga de parada de fisura. Acero AH32.

Los resultados de F_a en el acero Grade A, para las dos direcciones de laminación, son muy similares mientras que en el acero AH 32 la curva está desplazada hacia mayores valores de temperatura en la dirección transversal que en la dirección longitudinal.

Comparando los dos aceros entre sí se observa que el acero Grade A presenta las curvas de carga de parada a mayores valores de temperatura que el acero AH32, siendo la diferencia entre ellos superior a 50 °C.

A partir de esta temperatura correspondiente a 4 kN se determina la Temperatura de Referencia del factor K_{Ia} (T_{KIa}) mediante la siguiente expresión:

$$T_{KIa} = T_{Fa = 4kN} + 12 \text{ (°C)} \quad (2)$$

En la Tabla 5 se recogen los valores de $T_{Fa=4kN}$ y T_{KIa} para ambos aceros y direcciones de laminación.

Tabla 5. Temperatura de referencia del factor K_{Ia} .

Acero		$T_{Fa=4kN}$ (°C)	T_{KIa} (°C)
Grade A	TL	1.0	13.0
	LT	4.0	16.0
AH 32	TL	-55.0	-43.0
	LT	-70.0	-58.0

El factor de intensidad de tensiones en parada de fisura se determina por medio de otra función exponencial a partir de la temperatura de ensayo y el valor de T_{KIa} . Su expresión es la siguiente:

$$K_{Ia} = 30 + 70 \cdot e^{[0.019 \cdot (T - T_{KIa})]} \quad (3)$$

Los resultados del factor K_{Ia} a partir de esta ecuación se presentan en la Fig. 11 para ambos aceros y direcciones.

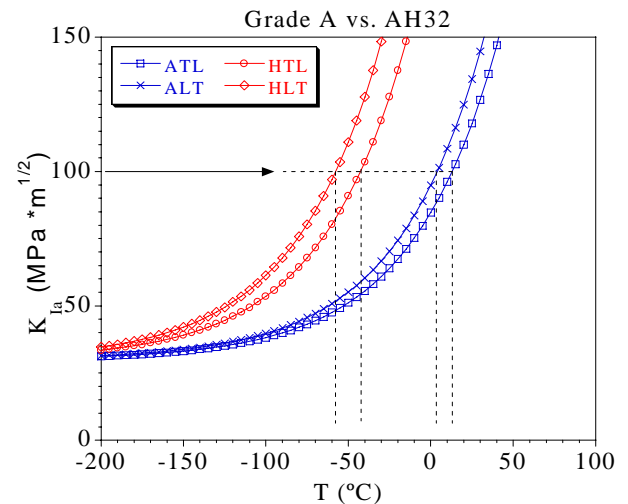


Fig. 11. Factor K_{Ia} vs. Temperatura.

La figura muestra cómo un mismo valor del factor K_{Ia} se presenta a diferentes temperaturas para cada acero estudiado. Tomando como ejemplo el valor $K_{Ia}=100 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, la temperatura del acero Grade A es del orden de 5 °C mientras que para el acero AH32 es del orden de -50 °C.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos Charpy Instrumentados dan unas previsiones del factor de intensidad de tensiones que deben ser contrastadas. En la Fig. 12 se comparan estas previsiones con los resultados de los ensayos CCA, observando que los resultados de ambos ensayos son muy próximos para cada acero en cada dirección de laminación.

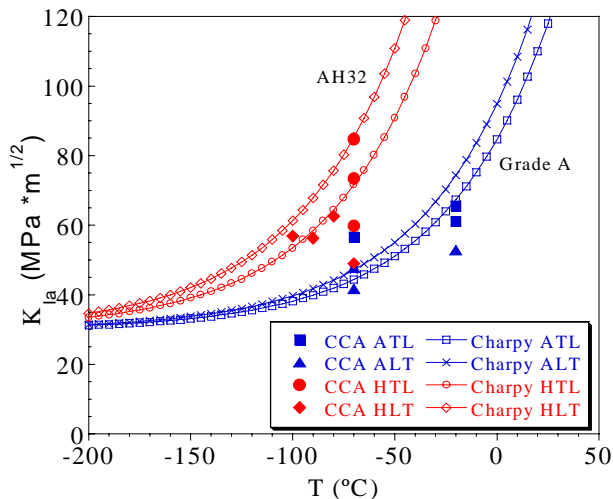


Fig. 12. Factor K_{Ia} vs. Temperatura. Ensayos CCA y Charpy Instrumentado.

En otro trabajo paralelo se han realizado ensayos Charpy Instrumentados utilizando probetas modificadas con material soldado frágil con el fin de reproducir mejor el proceso de propagación real de un componente. Los resultados obtenidos con la modificación son semejantes a los representados en esta figura aunque llegan a mejorar las previsiones del factor de intensidad de tensiones en parada de fisura [8].

6. CONCLUSIONES

El factor de intensidad de tensiones de parada de fisura es un parámetro necesario para conocer la capacidad de un material para detener una fisura que propaga de forma frágil. Para determinar este factor se realizan los ensayos normalizados Crack Arrest Compactos.

A pesar de que la realización del ensayo CCA es complicada y costosa, los resultados obtenidos en dos aceros estructurales empleados en la construcción de cascos de buques, clasificados como Grade A y AH32, han sido satisfactorios.

Debido a la dificultad del ensayo CCA se recurre a un ensayo más sencillo como es el ensayo Charpy Instrumentado. Este ensayo se ha realizado para ambos aceros en un rango de bajas temperaturas con el fin de simular situaciones reales de trabajo.

La instrumentación del ensayo permite determinar la carga de parada de fisura (F_A) para cada temperatura de trabajo y mediante una serie de funciones obtener el valor del factor de intensidad de tensiones de parada de fisura (K_{Ia}).

Los resultados del factor K_{Ia} obtenidos por medio del ensayo Charpy Instrumentado se han comparado con los obtenidos en los ensayos Crack Arrest Compacto. Debido a la semejanza de resultados entre ambos métodos se ha demostrado la validez de las predicciones obtenidas mediante el ensayo Charpy.

7. REFERENCIAS

[1] "Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} of Ferritic Steels", ASTM E 1221-96 (1996).

[2] Gallo C., Álvarez J. A., Gutiérrez-Solana F. y Polanco J. A., "Determinación de las Propiedades de Crack Arrest en Aceros Estructurales Basándose en Ensayos a Pequeña Escala", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol 18 pp 115 – 123, (2001).

[3] Wiesner C. S. y Hayes B., "A review of crack arrest tests, models and applications", Crack arrest concepts for failure prevention and life extension. Abington publishing (1999).

[4] Gallo C., Álvarez J.A., Gutiérrez-Solana F. y Polanco J. A., "An Energy Balance Approach For Crack Arrest", 5º Informe Técnico CECA, (2001).

[5] Gallo C., Álvarez J. A., Gutiérrez-Solana F. y Polanco J. A., "Predicting Crack Arrest Behaviour of Structural Steels Using Small-Scale Material Characterisation Tests", From Charpy to Present Impact Testing. Ed. Elsevier (2002).

[6] Barralis J., Maeder G., "Précis de Métallurgie. Élaboration, Structures-Propriété set Normalisation". AFNOR, NATHAN (1991).

[7] Müller K., Pusch G., "Use Of Charpy Impact Testing To Evaluate Crack-Arrest Fracture Toughness". From Charpy to Present Impact Testing. Ed. Elsevier (2002).

[8] Gallo C., Álvarez J.A., Gutiérrez – Solana F. y Polanco J.A., "Validación mediante ensayos estructurales de las predicciones de temperatura de parada de fisura (CAT) con ensayos charpy instrumentados", Anales de Mecánica de la Fractura Vol. 20 (2003).

8. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se extrae del trabajo realizado hasta la fecha en el proyecto europeo "An Energy Balance Approach For Crack Arrest". ECSC nº 7210/PR/182.