

# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN ENSAYO INTERMEDIO DE PARADA DE FISURA

C. Gallo<sup>1</sup>, S. Slater<sup>2</sup>, J. A. Álvarez<sup>1</sup>, F. Gutiérrez-Solana<sup>1</sup> y J. A. Polanco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> CORUS GROUP, Swinden Technology Centre. Moorgate, Rotherham, S60 3AR (England)

**Resumen.** Se considera que la filosofía de parada de fisura, que asegura la detención de una grieta que propaga de forma frágil en el interior de un componente, resulta especialmente útil para garantizar la fiabilidad de componentes que requieren gran seguridad frente a rotura. Los ensayos a gran escala son generalmente aceptados como la mejor forma de obtener parámetros aplicables al diseño como la temperatura de parada de fisura (CAT) y la tenacidad a fractura en parada de fisura ( $K_{Ia}$ ). Sin embargo, estos ensayos presentan un gran número de limitaciones.

En este trabajo se presenta un nuevo método de ensayo que emplea una probeta de dimensiones intermedias con el fin de evitar algunas de las limitaciones encontradas en los ensayos a gran escala. La descripción de este nuevo procedimiento se realiza mediante la aplicación a una serie de aceros, tanto estructurales como de altas especificaciones. El procedimiento ha sido validado a través de la comparación con resultados obtenidos del ensayo doble tracción en aceros de similares características, permitiendo evaluar la bondad de los resultados proporcionados por el ensayo intermedio.

**Abstract.** It is accepted that the crack arrest philosophy, which ensures the arrest of brittle crack propagation, is especially useful for improving the safety of high integrity components. Large-scale tests are the most accurate methods for obtaining design parameters such as the Crack Arrest Temperature (CAT) or the Crack Arrest Toughness ( $K_{Ia}$ ) for a given material but these large-scale tests have a number of limitations.

A new method has been developed that uses an intermediate scale specimen, avoiding some of the problems associated with large-scale tests. The new procedure is described using a range of different steels from structural and high integrity applications. The procedure has been validated by comparison with results obtained using the double tension test on the same steel grades, confirming the accuracy of the intermediate scale method.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se considera que la filosofía de parada de fisura, que asegura la detención de una fisura que propaga de forma frágil en el interior de un componente o estructura, resulta especialmente útil para garantizar la seguridad de componentes que requieren gran integridad frente a rotura.

Los ensayos a gran escala, sobre los que no hay una normativa desarrollada, son generalmente aceptados como la mejor forma de abordar el fenómeno de parada de fisura, permitiendo obtener la temperatura de parada de fisura (CAT) y la tenacidad a fractura en parada de fisura ( $K_{Ia}$ ) como parámetros aplicables al diseño [1]. Sin embargo, estos ensayos presentan un gran número de limitaciones, entre las que cabe destacar la dificultad de ejecución de los mismos, lo que limita el número de

laboratorios capacitados para llevar a cabo dichos ensayos.

En este trabajo se presenta un nuevo método de ensayo que emplea una probeta de dimensiones intermedias con el fin de evitar algunas de las limitaciones encontradas en los ensayos a gran escala. La descripción de este nuevo procedimiento se realiza mediante la aplicación a una serie de aceros, tanto estructurales como de altas especificaciones. En un principio este ensayo se ha llevado a cabo en dos laboratorios diferentes, diseñando cada cual una geometría de probeta definida a partir de la geometría del ensayo doble tracción.

El procedimiento de este ensayo ha sido validado a través de la comparación con resultados obtenidos del ensayo doble tracción en aceros de similares características, permitiendo evaluar la bondad de los resultados proporcionados por el ensayo intermedio, IT.

## 2. SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS DE ENSAYO

El ensayo intermedio ha sido diseñado con el objetivo de realizar una réplica a menor escala del ensayo doble tracción. De este modo se pretenden mejorar los aspectos desfavorables que presentan los procedimientos a gran escala pero manteniendo las mismas condiciones de operación, en cuanto a tensión aplicada y gradiente de temperatura.

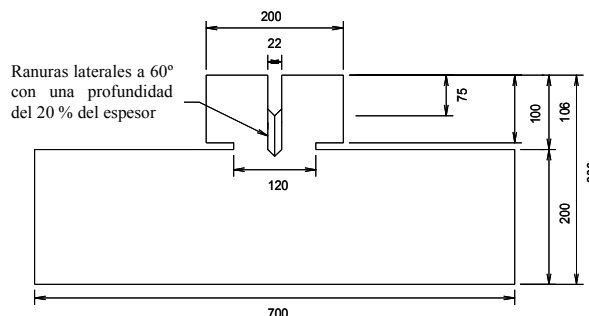
Las principales diferencias previstas de este procedimiento con respecto al ensayo DT son la reducción en las dimensiones de la probeta (tanto en anchura como en longitud), la utilización de máquinas hidráulicas de ensayos convencionales con capacidad de carga en torno a 1000 kN frente a máquinas especiales capaces de ensayar grandes piezas con posibilidad de alcanzar cargas de 40000 kN, un sistema de sujeción de la probeta mediante mordazas en contra de la soldadura utilizada en el ensayo DT, o el uso de un gato hidráulico para iniciar la fisura frente a grandes cabezales hidráulicos.

Para lograr el objetivo de reducción de la geometría de probeta se han investigado numerosas soluciones [2], tanto en el laboratorio del Swinden Technology Centre del Reino Unido perteneciente a la empresa CORUS, como en el laboratorio LADICIM de la Universidad de Cantabria. La selección de estos diseños se ha realizado mediante ensayos con prototipos y a través del análisis por el método de elementos finitos (FEM). Todas las soluciones propuestas se basan en un cuerpo de probeta principal y unas alas auxiliares cuya función es soportar una carga externa capaz de generar la propagación de la fisura fuera del cuerpo principal de la probeta IT. Aspectos a tener en cuenta en todos los diseños realizados han consistido en obtener la solución más favorable para mecanizar la zona de iniciación de la fisura incluida la geometría de las alas laterales y el tamaño final del cuerpo principal de la probeta IT.

La primera solución, elegida entre las diferentes opciones estudiadas, ha sido realizada por CORUS y presenta una zona de iniciación de la fisura que contiene ranuras laterales para guiar la propagación y alas que favorecen la aplicación de la carga secundaria. La premisa para esta geometría consiste en enfriar la zona de iniciación hasta una temperatura en la que el material se comporta totalmente frágil. En la Fig. 1 puede verse la geometría de esta pieza.

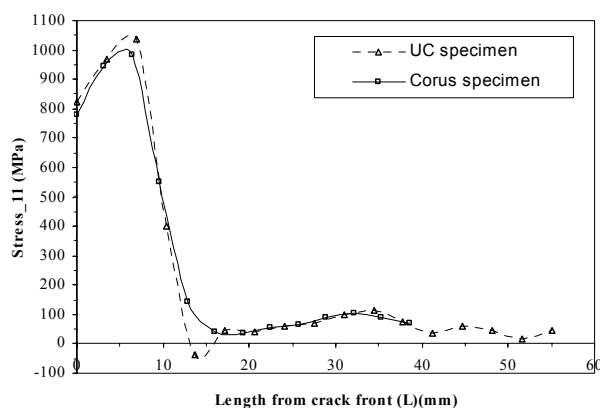
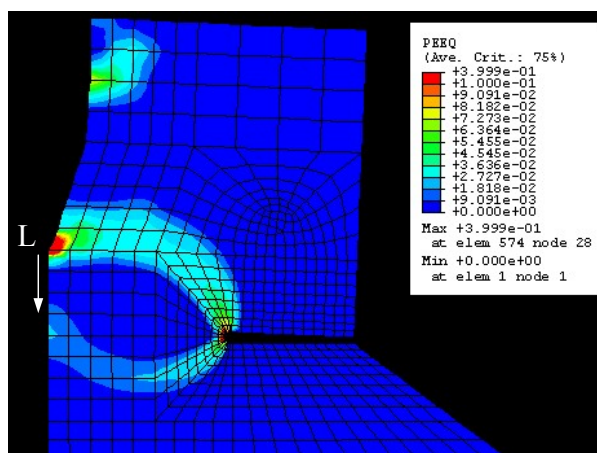
Con posterioridad al diseño de CORUS se ha llevado a cabo la definición de la geometría UC en el LADICIM. Su diseño presenta cambios en la geometría para adaptarla a la máquina de ensayos convencionales y una zona de iniciación de propagación novedosa consistente en una soldadura frágil con entalla por electroerosión que favorezca la iniciación de la fisura. Se han realizado diferentes diseños que han sido verificados por medio

de elementos finitos, eligiéndose como solución final aquel que presentaba una distribución de tensiones más favorable de cara a la iniciación de la propagación.



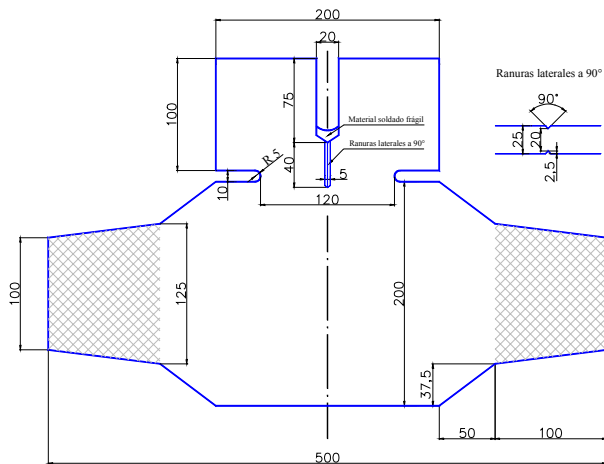
**Fig. 1.** Diseño de probeta para ensayo intermedio realizado por CORUS (cotas en mm).

La Fig. 2 muestra la distribución de tensiones en la parte de inicio de propagación obtenida por la simulación para la probeta UC y su comparación con la probeta de geometría definida por CORUS.



**Fig. 2.** FEA de geometrías de ensayo intermedio.

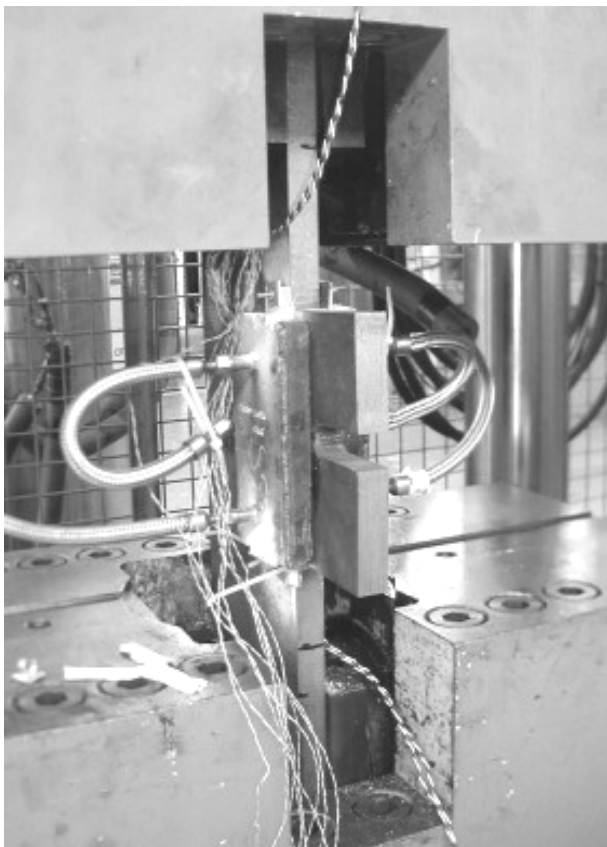
La Fig. 3 presenta el diseño definitivo de la geometría definido por LADICIM, que presenta ranuras laterales con profundidad dependiente del espesor.



**Fig. 3.** Diseño de probeta UC para ensayo intermedio realizado por el LADICIM (cotas en mm).

### 3. DESARROLLO DEL ENSAYO

Las dos geometrías definidas se adaptan a las características de máquinas de ensayos convencionales y permiten la distribución de un gradiente térmico entre la zona de iniciación y el extremo opuesto de la pieza. Para llevar a cabo este ensayo se han diseñado probetas con espesores comprendidos entre 15 y 40 mm.

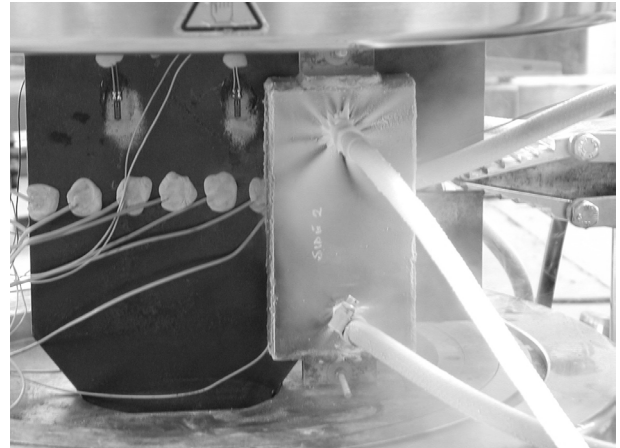


**Fig. 4.** Montaje del ensayo intermedio (CORUS).

Los ensayos han sido llevados a cabo en diferentes máquinas, siendo de 2000 kN de capacidad para el caso del laboratorio de CORUS y de 1200 kN para el LADICIM.

En la Fig. 4 puede verse el montaje del ensayo realizado por la empresa CORUS a excepción del gato hidráulico.

La Fig. 5 muestra el montaje de este ensayo diseñado por el LADICIM, que incluye el gato hidráulico entre las alas de la pieza.



**Fig. 5.** Montaje del ensayo intermedio (UC).

El sistema de enfriamiento diseñado para los dos casos consiste en la colocación de unos paneles a ambos lados de la zona de iniciación de la pieza por los que circula nitrógeno líquido. Mediante este sistema se consigue que esta zona sea la que menor temperatura alcanza, así como una distribución gradual de la temperatura.

Las probetas son instrumentadas mediante una serie de termopares que permiten conocer la distribución de temperaturas a través de la pieza, pudiendo determinar el valor de CAT en función del punto de parada de fisura para las condiciones de tensión impuestas. Asimismo, se distribuyen en la pieza unas galgas extensométricas para determinar la tensión aplicada sobre la probeta. Durante los ensayos también se recogen los datos de carga y desplazamiento registrados por la máquina de ensayos [3].

### 4. APLICACIÓN: MATERIALES

Los ensayos intermedios han sido llevados a cabo con aceros utilizados en construcciones de componentes o estructuras que requieren gran seguridad frente a fractura como los sistemas de tuberías o las vasijas a presión, en los cuales tiene una importante aplicación el criterio de parada de fisura como mecanismo de control sobre el comportamiento de grietas que propagan.

Los aceros Grade A (resultante de un proceso de laminación) y AH32 (normalizado y tratado termomecánicamente) se emplean habitualmente en la industria naval para la construcción de cascos de buques y han sido suministrados en forma de chapas con espesores de 15 y 25 mm respectivamente. El acero X80, empleado en sistemas de tuberías para transporte de gas y petróleo, se obtiene mediante proceso de laminación controlada y es suministrado procedente de tubería de 56" de diámetro y 26 mm de espesor. Por último, el acero SE500, especificado según la norma francesa AFNOR, posee propiedades mecánicas de nivel alto y se utiliza para trabajos a bajas temperaturas. Es un acero templado y revenido procedente de chapa de 40 mm de espesor. Por sus características es empleado para condiciones de trabajo en medio NACE, como por ejemplo estructuras Offshore o vasijas a presión.

Los valores más significativos de estos aceros en cuanto a composición química y sus propiedades mecánicas en la dirección longitudinal de laminación se presentan en las Tablas 1 y 2 respectivamente [2].

**Tabla 1.** Composición química.

Elemento	Composición Química			
	Grade A	AH32	X80	SE500
C	0.13	0.10	0.07	0.07
Si	0.24	0.26	0.18	0.23
Mn	0.66	1.30	1.83	1.76
P	0.015	0.019	< 0.005	0.004
S	0.016	0.004	< 0.005	< 0.005
Cr	< 0.02	0.020	-	0.18
Ni	< 0.02	0.020	0.03	0.97
Ceq.	0.243	0.321	0.43	0.53

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas en la dirección LT.

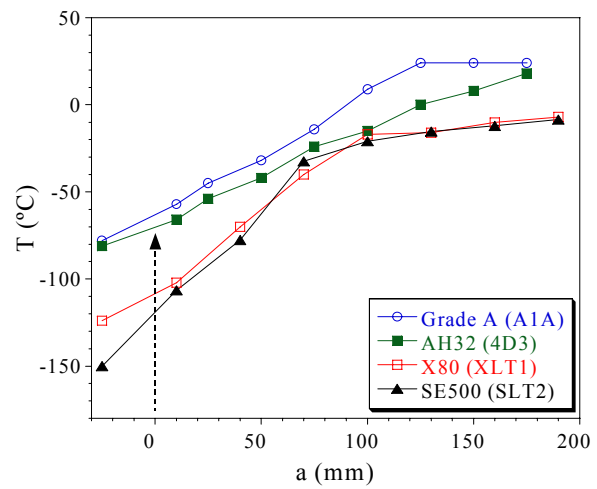
Acero	Grade A	AH32	X80	SE500
$\sigma_Y$ (MPa)	272.5	388.5	589.0	603.0
$\sigma_u$ (MPa)	450.0	504.0	666.9	679.0
$\varepsilon_{\max}$ (%)	16.3 %	15.7 %	6.0 %	8.08 %

## 5. RESULTADOS DEL ENSAYO INTERMEDIO

Se han llevado a cabo con los aceros seleccionados once ensayos en la dirección longitudinal de laminación, obteniendo resultados satisfactorios. Los parámetros necesarios para determinar los resultados de temperatura de parada de fisura CAT y tenacidad en parada de fisura  $K_{Ia}$  son la tensión aplicada sobre la probeta y la de parada de fisura (obtenida a partir de la carga de parada

de fisura), la distribución de temperaturas en el camino de propagación y la longitud de fisura propagada.

La selección de los rangos de temperatura aplicados se ha realizado en función del comportamiento que presenta cada acero frente a fractura. En la zona de iniciación de la fisura se aplica una temperatura correspondiente a un comportamiento frágil, mientras que en la zona opuesta se opta por una temperatura correspondiente a comportamiento dúctil. A modo de ejemplo, en la Fig. 6 se representan los gradientes térmicos de varios ensayos correspondientes a cada uno de los aceros.



**Fig. 6.** Distribución de temperaturas.

Los resultados de tenacidad en parada de fisura se obtienen a partir de la carga de parada mediante la siguiente expresión [4]:

$$K_{Ia} = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

en la que:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.99 - \left(0.41 \cdot \frac{a}{W}\right) + \left[18.7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2\right] - \left[38.48 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3\right] + \left[53.8 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right] \quad (2)$$

Los resultados obtenidos de cada ensayo, incluyendo los de tenacidad en parada de fisura, se muestran en la Tabla 3 de resultados [2].

**Tabla 3.** Resultados del ensayo Intermedio.

Código	$\sigma$ (MPa)	$a_a$ (mm)	CAT (°C)	$\sigma_a$ (MPa)	$K_{Ia}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Grade A (LT) (B = 15 mm)					
(ALT1) <sub>UC</sub>	140	130	5	49	153
(ALT2) <sub>UC</sub>	122	25	-32	106	36
(ALT3) <sub>UC</sub>	134	150	3	33	166
(A1A) <sub>CORUS</sub>	156	106	15	82	148
(3AA) <sub>CORUS</sub>	120	76	-22	96.7	95
(3B1) <sub>CORUS</sub>	106	122	6	50	129
AH32 (LT) (B = 25 mm)					
(4D2) <sub>CORUS</sub>	328	152	10	59.6	315
(4D3) <sub>CORUS</sub>	183	136	5	97.8	352
X80 (LT) (B = 25 mm)					
(XLT1) <sub>UC</sub>	165	60	-42	150	108
SE500 (LT) (B = 32 mm)					
(SLT3) <sub>UC</sub>	156	120	-20	102.3	253
(SLT2) <sub>UC</sub>	147	30	-87	-	-

## 6. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del ensayo intermedio deben ser comparados con el objetivo de validar este ensayo como procedimiento para determinar las propiedades de parada de fisura de los aceros estructurales. Para ello, se han comparado los resultados con los de diferentes ensayos de parada de fisura compacto (CCA) y doble tracción (DTT) llevados a cabo sobre los mismos aceros estudiados. Los resultados obtenidos por medio del ensayo CCA [5] en la dirección longitudinal de laminación se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Ensayo CCA: Resultados de  $K_{Ia}$  [2].

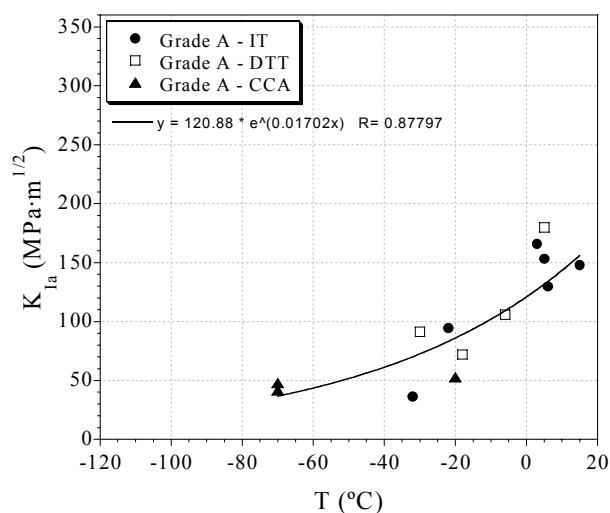
Acero (LT)	Código	T (°C)	$a_a$ (mm)	$K_0$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	$K_{Ia}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Grade A	ALT5	-20	76.0	104.08	52.80
	ALT1	-50	---	> 105.08	---
	ALT4	-50	---	> 116.51	---
	ALT3	-70	74.0	66.85	41.66
	ALT6	-70	72.0	78.94	47.74
AH32	HLT1	-70	76.7	66.35	48.94
	HLT5	-80	89.0	81.84	62.59
	HLT3	-80	---	> 162.30	---
	HLT4	-90	123.7	108.63	56.26
	HLT2	-100	78.7	72.92	56.87
SE500	LT1	-50	---	163	94

Los resultados de los ensayos doble tracción, que incluyen la temperatura y la tenacidad en parada de fisura (CAT y  $K_{Ia}$ ), se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados del ensayo doble tracción [2].

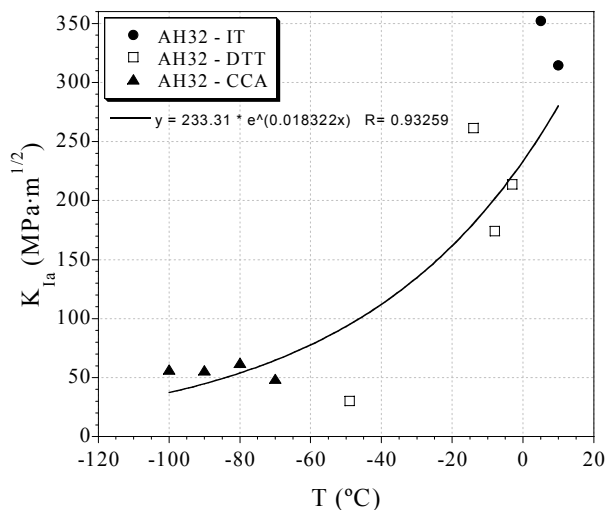
Código	$\sigma$ (MPa)	$a_a$ (mm)	CAT (°C)	$\sigma_a$ (MPa)	$K_{Ia}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Grade A (LT) (B = 15 mm)					
A1	149	315	5	40	179.76
A2	99	155	-30	77	91.26
3A	113	N/A	N/A	0	-
3B	60	315	-18	16	71.90
A-1	118	205	-6	61	105.88
AH32 (B = 25 mm)					
4G6	211	430	-8	13	174.09
4H2	164	408	-14	24	261.41
4H4	126	15	-49	124	30.27
4H6	158	360	-3	31	213.61
X80 (B = 26 mm)					
X80-1	113	340	-57	-	-
X80-2	106	245	-72	47	112.91
X80-3	126	380	-63	38	317.09
X80-4	108	400	-52	19	191.84
SE500 ((B = 40 mm)					
SE-1	150	495	-38	~0	-
SE-2	113	400	-26	-	-

A continuación se representan conjuntamente los resultados obtenidos por medio de los diferentes procedimientos con los aceros seleccionados. La Fig. 7 muestra los resultados de tenacidad a fractura en función de la temperatura obtenidos para el acero Grade A.

**Fig. 7.** Comparación de resultados  $K_{Ia}$ . Acero Grade A.

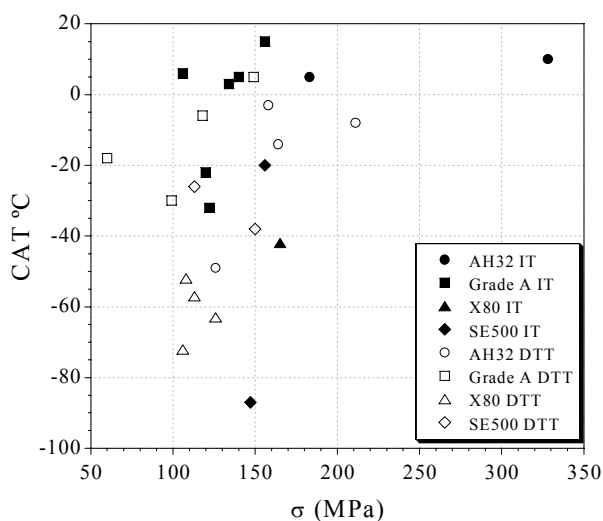
Como puede verse en la figura, se ha utilizado una curva exponencial para interpolar los diferentes punto obtenidos, presentando un resultado satisfactorio puesto que se ajustan correctamente.

La Fig. 8 representa los resultados de tenacidad en parada de fisura obtenidos para el acero AH32. También se comprueba que todos los valores se ajustan a la curva exponencial de interpolación.



**Fig. 8.** Comparación de resultados  $K_{Ia}$ . Acero AH32.

Los resultados de CAT obtenidos por medio de los ensayos intermedio y DT se representan en la Fig. 9, mostrando la dependencia de dicho parámetro con el estado tensional aplicado, tanto en el ensayo IT como en el DT.



**Fig. 9.** Distribución de temperaturas CAT en función de la tensión aplicada.

Finalmente, la realización de un análisis fractográfico sobre muestras seleccionadas de los diferentes ensayos realizados [2] demuestra que a las distintas temperaturas de ensayo se obtienen en todos los casos similares micromecanismos de fractura, no apreciándose diferencias entre los mecanismos desarrollados en los ensayos IT y DT para condiciones de temperatura y tensión similares.

## 7. CONCLUSIONES

El ensayo intermedio (IT) ha sido desarrollado con el objetivo de presentar una alternativa consistente y mejorada frente a los ensayos a gran escala como el DT.

Se han realizado dos diseños versátiles de geometría intermedia que permiten el uso de máquinas de ensayos convencionales con fijación de la probeta mediante mordazas. Asimismo, se ha simplificado el sistema de aplicación de carga secundaria para iniciación de la fisura empleando un pequeño gato hidráulico. Para la realización del ensayo se mantiene la posibilidad de conseguir amplios gradientes térmicos por medio de paneles refrigerantes y de obtener la medición de los resultados a través de galgas extensométricas, serie de termopares e instrumentación de la máquina de ensayos.

Los resultados de temperatura y tenacidad en parada de fisura obtenidos con este procedimiento han sido comparados frente a los obtenidos por medio de ensayos existentes de fiabilidad contrastada como el DTT o el CCA, confirmando que el ensayo intermedio es un instrumento válido para la determinación de las propiedades de parada de fisura. Por tanto, este procedimiento se presta a ser desarrollado en mayor profundidad y poder llegar a su normalización.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo se extrae del trabajo realizado con la subvención de los proyectos “An Energy Balance Approach For Crack Arrest”. ECSC n° 7210/PR/182 y “Estudio de la parada de fisuras a partir de balance energético” CICYT (proyecto n° MAT2000-2819-CE).

## REFERENCIAS

- [1] 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).
- [2] “An Energy Balance Approach For Crack Arrest”. ECSC Sponsored Research Project, ECSC n° 7210/PR/182. Draft Final Report. 2003.
- [3] 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, pp. 302-307, (2003).
- [4] M. A. Meyers, K. K. Chawla, “Mechanical Behaviour of Materials”. Prentice Hall, 1999.
- [5] “Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness,  $K_{Ia}$  of Ferritic Steels”, ASTM E 1221-96 (1996).