

VALIDACIÓN MEDIANTE ENSAYOS ESTRUCTURALES DE LAS PREDICCIONES DE TEMPERATURA DE PARADA DE FISURA (CAT) CON ENSAYOS CHARPY INSTRUMENTADOS

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

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. Las propiedades de parada de fisura de un material permiten conocer si es posible evitar el fallo de componentes o estructuras cuando se inicia la propagación de fisuras existentes en su interior. Los ensayos convencionales existentes para determinar estas propiedades, como el Doble Tracción (DTT), conllevan un amplio despliegue de medios técnicos y requieren gran cantidad de material. La alternativa más habitual consiste en llevar a cabo ensayos a pequeña escala, como el Charpy Instrumentado, que resultan más sencillos para laboratorios convencionales y requieren poca cantidad de material. Con estos ensayos es posible determinar el parámetro CAT (temperatura de parada de fisura) característico del Crack Arrest por medio de sencillas correlaciones empíricas.

Las predicciones de CAT se obtienen con varios aceros estructurales empleados en la actualidad mediante ensayos Charpy Instrumentados. Estos ensayos se llevan a cabo con dos tipos de probetas, normalizadas y modificadas, para evaluar la influencia que puede tener la geometría de la pieza sobre el resultado final. Las predicciones de parada de fisura serán contrastadas con los valores reales obtenidos por medio de ensayos a gran escala realizados sobre los mismos materiales en condiciones próximas a las que sufren en su aplicación estructural.

Abstract. Material Crack Arrest properties make it possible to avoid the failure of components once a brittle crack initiates in them. Existing conventional tests like Double Tension (DTT) involve a large quantity of technical equipment and require a great amount of material. The most suitable alternative consists of carrying out small scale tests such as the Instrumented Charpy which are easier for normal laboratories and need small quantities of material. With these tests is possible to obtain the characteristic Crack Arrest Temperature (CAT) through simple empirical correlations.

CAT predictions are obtained through Instrumented Charpy tests on some structural steels currently used. These tests are carried out with two types of geometry, normalised and modified, to evaluate the influence of the geometry on the final result. Crack Arrest predictions will be compared with real values obtained by means of large scale tests carried out on the same materials at similar conditions of structural applications.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades de Crack Arrest de un material permite evitar el fallo de componentes o estructuras cuando se inicia la propagación de fisuras existentes en su interior. Los ensayos convencionales existentes para determinar estas propiedades, como el Doble Tracción (DTT), conllevan un amplio despliegue de medios técnicos, requieren gran cantidad de material para lograr un número de resultados adecuado y sólo un número reducido de laboratorios tiene capacidad para realizarlos. Una alternativa a estos ensayos consiste en realizar ensayos con probetas de tamaño intermedio, que pese a tener un montaje de dificultad similar, puede realizarse en laboratorios convencionales. En este

artículo se muestra el desarrollo de este nuevo tipo de ensayo llevado a cabo en el presente trabajo.

La alternativa más habitual a los ensayos DTT consiste en llevar a cabo ensayos a pequeña escala, como el Charpy Instrumentado, que resultan más sencillos para los laboratorios y requieren poca cantidad de material. A partir de estos ensayos es posible predecir los parámetros CAT (Temperatura de parada de fisura) o K_{Ia} (Factor de intensidad de tensiones en parada de fisura) característicos del Crack Arrest por medio de correlaciones empíricas o por aproximaciones exponenciales.

En este artículo se presentan las predicciones de CAT obtenidas mediante ensayos Charpy Instrumentados

para distintos aceros estructurales empleados en la actualidad en aplicaciones industriales. Estos ensayos se llevan a cabo con dos tipos de probetas para evaluar la influencia que puede tener la geometría de la pieza sobre el resultado final. Se realizan ensayos con probetas Charpy, normalizadas o probetas modificadas en la zona de entalla mediante aportación de un material soldado de tipo frágil y realización de una entalla por electroerosión.

Los resultados previstos de parada de fisura serán contrastados con los valores reales obtenidos por medio de ensayos a gran escala, como el DTT o el Intermedio, realizados sobre los mismos materiales en condiciones similares a las que sufren en su aplicación estructural.

2. APLICACIÓN: MATERIALES ANALIZADOS

El análisis de las condiciones de Parada de Fisura se realiza con dos tipos de aceros estructurales que se emplean habitualmente en la industria. El acero X80, denominado según API, se obtiene mediante proceso de laminación controlada a partir de chapa de 25 mm de espesor y se emplea en la construcción de tuberías para transporte de gas y petróleo. El acero Grade A, resultante de un proceso de laminación, procede de chapa de 15 mm de espesor y se utiliza en la industria naval para la construcción de cascos de buques. La composición química de estos aceros se refleja en la Tabla 1 y sus propiedades mecánicas en la Tabla 2 [1].

Tabla 1. Composición química.

Elemento	X80	Grade A
C	0.07	0.13
Si	0.18	0.24
Mn	1.83	0.66
P	162 ppm	0.015
S	45 ppm	0.016
Al	0.03	0.006
Nb	0.03	< 0.005
Ni	0.03	< 0.02
Mo	0.15	< 0.005
Ceq.	0.43	0.243

Tabla 2. Propiedades mecánicas.

Acero	X80		Grade A	
	LT	TL	LT	TL
Límite Elástico (MPa)	589.0	621.3	272.5	274.0
Tensión Última (MPa)	666.9	691.0	450.0	455.2
Deformación en Rotura	6.0 %	6.4 %	16.3 %	17.2 %

3. ENSAYO DOBLE TRACCIÓN

Este ensayo está incluido entre los de gran escala [2]. Su realización requiere el uso de maquinaria especial por las dimensiones de la probeta en cuanto a sistema de anclaje y por motivos de carga aplicada para conseguir una propagación y parada de la fisura. Estos ensayos han sido realizados para un proyecto de investigación con los aceros estudiados permitiendo obtener el valor de CAT para cada condición de ensayo [1]. Los resultados de este ensayo se incluyen para validar con datos reales las predicciones de CAT realizadas a partir de los ensayos Charpy Instrumentados.

La Fig. 1 muestra la máquina empleada para este ensayo con la probeta situada mediante soldadura a sus extremos. Como puede verse en la figura, la probeta lleva colocados termopares a lo largo de la línea de propagación para la medida del gradiente de temperatura. También se colocan en la pieza galgas extensométricas para la medida de la tensión aplicada.



Fig. 1. Montaje del ensayo Doble Tracción.

Los resultados de este ensayo en términos de tensión aplicada, parada de fisura, gradiente térmico y CAT están incluidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del ensayo Doble Tracción.

Código	σ (MPa)	a_a (mm)	ΔT (°C) <small>a = 0 → 500 mm</small>	CAT (°C)
X80 (LT)				
X1	113	340	-132 → -33	-40
X2	106	245	-159 → -24	-72
X3	126	380	-115 → -59	-63
X4	108	400	-133 → -46	-41
Grade A (LT)				
A1	149	315	-56 → 24	5
A2	99	155	-85 → 23	-30
A6	60	315	-67 → -18	-18
A7	118	205	-71 → 28	-6

Los valores de CAT para el acero X80 se encuentran en un rango de temperatura entre -40 y -70 °C, mientras que para el acero Grade A este rango va desde 5 hasta -30 °C, con un resultado sin parada de fisura.

4. ENSAYO INTERMEDIO

La imposibilidad de llevar a cabo en laboratorios convencionales ensayos a gran escala como el Doble Tracción, debido a la falta de maquinaria capaz de aplicar la carga necesaria para lograr que la fisura propague, ha motivado el desarrollo de un nuevo ensayo de menor escala, denominado ensayo Intermedio [1]. El objetivo de este ensayo consiste obtener la parada de fisura en probetas simulando las condiciones reales que sufre un componente o estructura de manera más sencilla que con el ensayo DTT.

El ensayo consiste, al igual que el DTT, en obtener una propagación y posterior parada de fisura mediante la aplicación de un impacto sobre una pieza que se encuentra sometida a una tensión constante y un gradiente de temperatura desde la parte de inicio de la fisura hasta la parte final. La aplicación de carga se realiza con un gato hidráulico para el impacto y una máquina de 1200 kN de capacidad en régimen de desplazamiento constante para la tensión principal. El gradiente térmico se establece por medio de unos paneles conectados mediante latiguillos a una botella de nitrógeno líquido.

En este trabajo de investigación se ha diseñado una pieza basada en la geometría de la probeta DTT y semejante a la realizada en otro laboratorio [1]. En primer lugar se ha realizado un estudio por medio de elementos finitos para verificar que la pieza diseñada mantiene una distribución de tensiones adecuada en la zona de propagación de la fisura.

La Fig. 2 muestra la distribución de tensiones en la parte de inicio de propagación obtenida por la simulación a partir de datos obtenidos con otros ensayos [1].

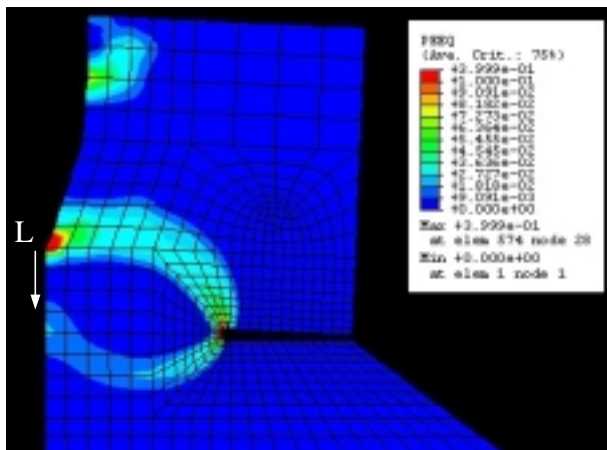


Fig. 2. Montaje del ensayo Intermedio.

La Fig. 3 muestra el dibujo del diseño definitivo de la pieza UC para el ensayo Intermedio.

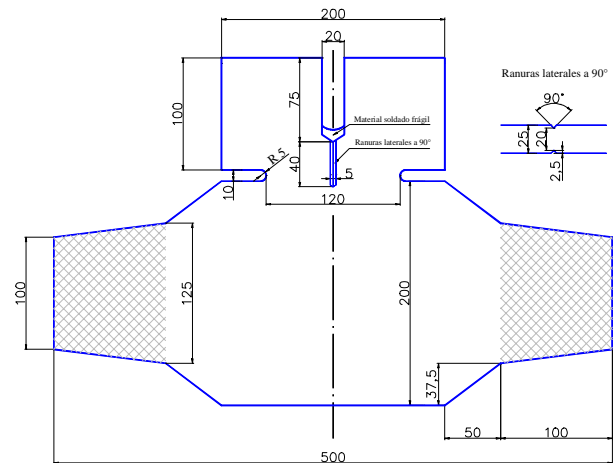


Fig. 3. Ensayo intermedio. Probeta UC (cotas en mm).

El valor de la tensión aplicada se obtiene mediante cuatro galgas extensométricas dispuestas en los lados de la pieza y con la variación de carga registrada por la máquina. El gradiente térmico se mide por medio de ocho termopares situados a lo largo de la línea de propagación de la fisura.

La Fig. 4 muestra una pieza colocada en las mordazas de la máquina justo antes de realizarse el ensayo, en la que pueden verse colocados los termopares, las dos galgas extensométricas correspondientes a la parte anterior de la pieza, el sistema de enfriamiento y el gato hidráulico situado entre las alas de la pieza.



Fig. 4. Elementos de medida para ensayo Intermedio.

La Fig. 5 muestra una probeta ensayada en la que puede verse indicado el punto donde la fisura propagada se ha detenido.

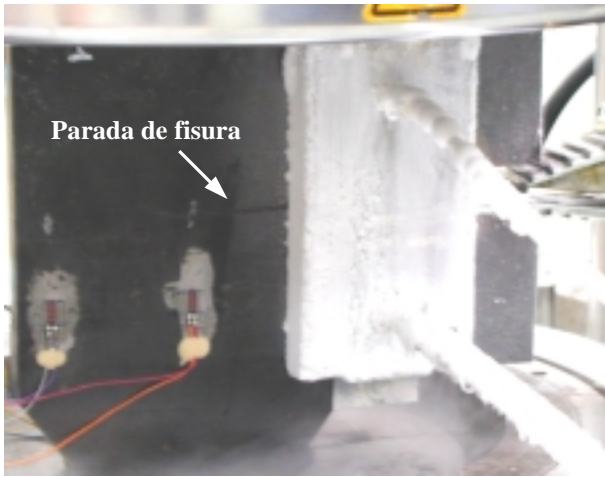


Fig. 5. Detalle de probeta intermedia ensayada.

La temperatura de parada de fisura se establece por medio de la curva de interpolación entre los valores de lectura de los termopares situados a lo largo de la pieza. Para ello es necesario determinar la longitud de fisura propagada y esto implica abrir la pieza una vez ensayada. En la Fig. 6 puede verse el punto de parada (a_a) medido en la pieza después de ser abierta.

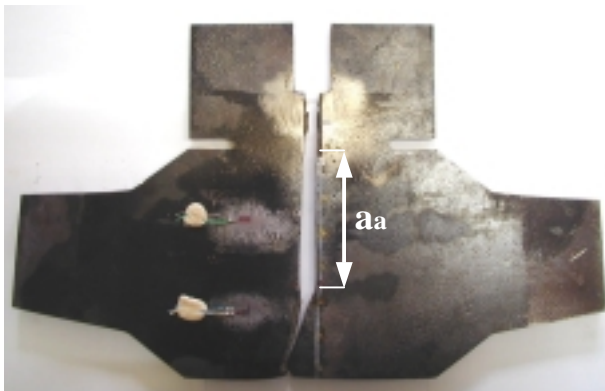


Fig. 6. Longitud de fisura en probeta ensayada.

La Fig. 7 presenta la variación de carga respecto del tiempo recogida durante el ensayo de una probeta del acero Grade A. En esta gráfica se han indicado los valores de carga inicial o de diseño (P_0) al que se llega después de iniciar el enfriamiento; la carga (P_i) alcanzada al conseguir el gradiente térmico deseado en la pieza y que se tiene en el momento de aplicar el impacto del gato hidráulico para iniciar la propagación y la carga (P_a) de parada de fisura que mantiene la máquina después de la propagación. La Fig. 8 presenta el mismo resultado para la probeta del acero X80 ensayada.

La Tabla 4 presenta los resultados de este ensayo realizados con los dos aceros estudiados. Para disponer de mayor número de resultados se han incluido en el estudio los ensayos llevados a cabo para el acero Grade

A en otro laboratorio con las probetas de geometría similar.

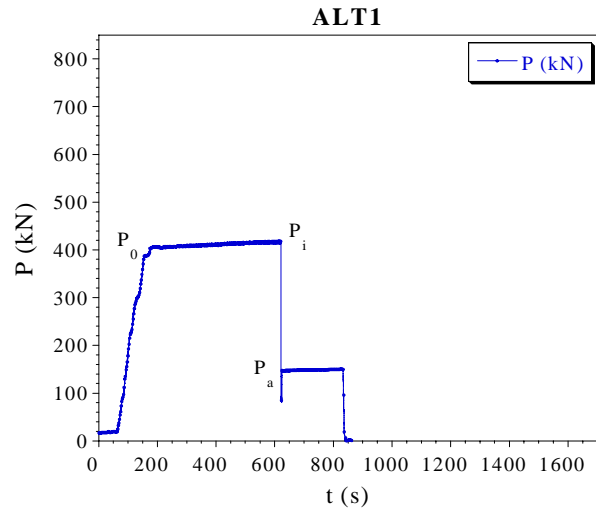


Fig. 7. Diagrama Carga-tiempo. Acero Grade A.

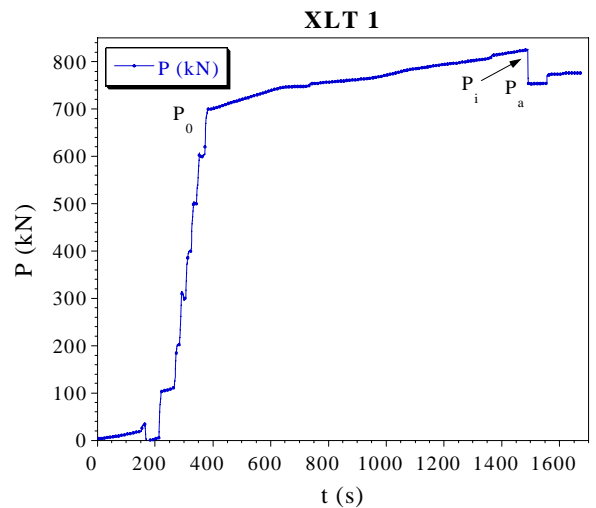


Fig. 8. Diagrama Carga-tiempo. Acero X80.

Tabla 4. Resultados del ensayo Intermedio.

Código	σ (MPa)	a_a (mm)	ΔT (°C) $a = 0 \rightarrow 200$ mm	CAT (°C)
X80 (LT)				
(XLT1) _{UC}	165	60	-124 \rightarrow -10	-42
Grade A (LT)				
(ALT1) _{UC}	140	130	-70 \rightarrow 10	5
(ALT2) _{UC}	122	25	-80 \rightarrow 6	-32
(ALT3) _{UC}	134	150	-110 \rightarrow 8	3
(A1A) _{CORUS}	156	106	-78 \rightarrow 24	15
(3AA) _{CORUS}	120	76	-64 \rightarrow 16	-22
(3B1) _{CORUS}	106	122	-72 \rightarrow 7	6

El valor de CAT para el acero X80 se encuentran en - 42 °C, mientras que para el acero Grade A este rango va desde -32 hasta 15 °C.

5. ENSAYOS CHARPY INSTRUMENTADO

Se ha realizado este tipo de ensayo a pequeña escala, siguiendo las reglas establecidas en la norma ASTM E23-96 [3], con dos tipos de probetas, convencionales para ambos aceros y modificadas para el acero X80. Estas probetas tienen la misma geometría pero se modifica la zona de inicio de la fisura mediante aportación de material soldado de tipo frágil y posterior realización de una entalla de 1mm por electroerosión [4].

La Fig. 9 muestra un detalle de la zona de soldadura en una probeta Charpy modificada. Para determinar esta zona de la pieza se realiza un pulido y ataque con producto químico. También se realiza un estudio de dureza para verificar que la entalla mecanizada por electroerosión se encuentre dentro de la zona de material frágil.



Fig. 9. Soldadura frágil en probeta Charpy modificada.

Para obtener la temperatura de Parada de Fisura a través de correlaciones empíricas el parámetro más utilizado es la temperatura de transición obtenida de la curva de apariencia de rotura (50% FATT) [5]. Este resultado se presenta en la Tabla 5 para ambos aceros y diferentes geometrías.

Tabla 5. Resultados de apariencia de rotura.

Material	Dirección	Geometría	50 % FATT (°C)
Grade A	LT	Convencional (Cv)	-1.4
X80	LT	Convencional (Cv)	-77.3
	LT	Modificada (1 mm)	-46.4

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Existen distintas correlaciones para determinar el valor de CAT a partir de los ensayos Charpy Instrumentados. En general, estas ecuaciones están previstas para una

tensión aplicada de 2/3 del límite elástico del material y un espesor de chapa determinado. La siguiente expresión se obtuvo para permitir la predicción de ensayos DTT a partir de cualquier tensión y espesor [6]:

$$CAT = 50\% FATT + 0.5 \cdot \sigma + 2.85 \cdot B - 129 \text{ (°C)} \quad (1)$$

Esta expresión ha sido adaptada para utilizar los resultados de las probetas modificadas. Para ello se ha tenido en cuenta en las predicciones el factor de corrección de 35 °C existente entre las probetas convencionales y modificadas [4]. La expresión resultante es la siguiente:

$$CAT = 50\% FATT + 0.5 \cdot \sigma + 2.85 \cdot B - 164 \text{ (°C)} \quad (2)$$

La Tabla 6 incluye las predicciones de CAT para los resultados de los ensayos DTT obtenidas por medio de esta ecuación con resultados de probetas convencionales en ambos aceros y de probetas modificadas en el acero X80. Su representación gráfica se muestra en la Fig. 10.

Tabla 6. Resultados de CAT para ensayo DTT.

Código	CAT real (°C)	Predicción CAT Cv (°C) (1)	Predicción CAT modif. (°C) (2)
Grade A (LT)			
A1	5	-13.15	---
A2	-30	-38.15	---
A6	-18	-57.65	---
A7	-6	-28.65	---
X80 (LT)			
X1	-40	-78.55	-82.65
X2	-72	-82.05	-86.15
X3	-63	-72.05	-76.15
X4	-41	-81.05	-85.15

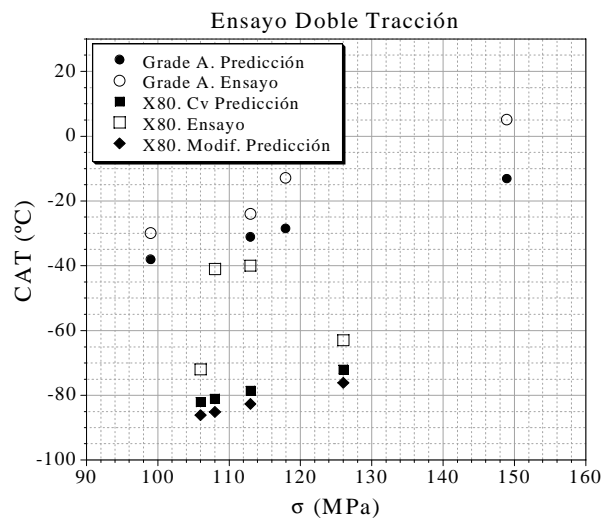


Fig. 10. Resultados del ensayo Doble Tracción.

Esta ecuación, aplicable a los ensayos Doble Tracción, ha sido corregida para predecir los resultados del ensayo Intermedio. Las siguientes expresiones son para los resultados de las probetas convencionales y modificadas respectivamente.

$$CAT = 50\% FATT + 0.5 \cdot \sigma + 4 \cdot B - 129 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

$$CAT = 50\% FATT + 0.5 \cdot \sigma + 4 \cdot B - 164 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

En la Tabla 7 se presentan los resultados para el ensayo Intermedio y se muestran en la Fig. 11.

Tabla 7. Resultados de CAT para ensayo Intermedio.

Código	CAT real (°C)	Previsión CAT Cv (°C) (3)	Previsión CAT modif. (°C) (4)
X80 (LT)			
(XLT1) _{UC}	-42	-23.80	-27.90
Grade A (LT)			
(ALT1) _{UC}	5	-0.40	---
(ALT2) _{UC}	-32	-9.40	---
(ALT3) _{UC}	3	-3.40	---
(A1A) _{CORUS}	15	7.60	---
(3AA) _{CORUS}	-22	-10.40	---
(3B1) _{CORUS}	6	-17.40	---

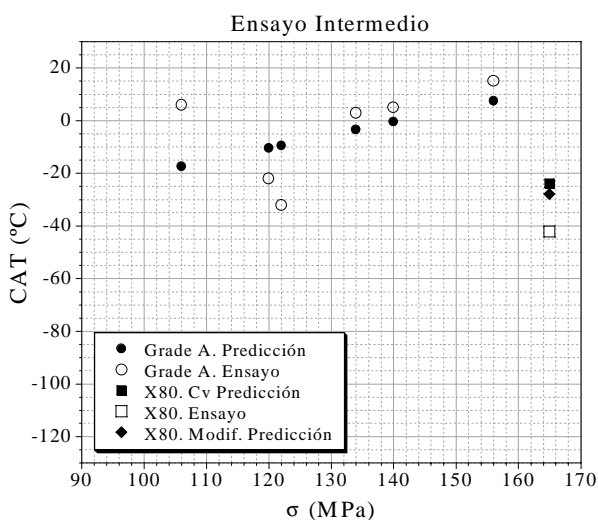


Fig. 11. Resultados del ensayo Intermedio.

Teniendo en cuenta las diferentes condiciones de los ensayos se observa que las predicciones de ambos ensayos son satisfactorias puesto que estiman los resultados de parada de fisura con una buena tendencia. Sin embargo, estas predicciones presentan una desviación en torno a ± 20 °C, siendo la desviación media de -23 °C para los ensayos DTT y 3 °C para los Intermedios.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado un nuevo ensayo para probetas de tamaño intermedio con el objetivo de poder llevarse a cabo en laboratorios convencionales. La pieza UC diseñada a partir de la doble tracción permite obtener la propagación y parada de fisura de forma satisfactoria, obteniendo resultados de CAT para distintos materiales y condiciones de trabajo. Por lo tanto este ensayo puede sustituir al DTT y realizarse de forma generalizada.

Los ensayos Charpy Instrumentados pueden ser útiles para predecir con un intervalo de seguridad los resultados de CAT. También sirven para definir las condiciones en que se pueden realizar los ensayos a gran escala. En este trabajo se han realizado predicciones de CAT a partir del valor de 50 % FATT de probetas convencionales y modificadas para los dos aceros estudiados, permitiendo aproximaciones en torno a ± 20 °C. Aunque estas predicciones han sido apoyadas con resultados de otros aceros [1], su obtención debe ser contrastada con más resultados y mejorada hasta llegar a correlaciones más ajustadas.

8. REFERENCIAS

- [1] "An Energy Balance Approach For Crack Arrest", Informes técnicos. ECSC Project. 7210/PR/182, (2000, 2001, 2002).
- [2] Wiesner C. S. y Hayes B. "A review of Crack Arrest tests, models and applications". Crack Arrest concepts for failure prevention and life expansion". Abington publishing (1999).
- [3] "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", ASTM E 23-96 (1996).
- [4] Gallo C., Álvarez J. A., Gutiérrez-Solana F. y Polanco J. A. "Obtención de las propiedades de Crack Arrest en aceros de tuberías mediante ensayos Charpy con probetas modificadas". Anales de mecánica de la fractura. Vol.19.pp.61-66. (2002)
- [5] Wiesner C. S., "Predicting structural crack arrest behaviour using small-scale material characterisation tests", Internal Journal Pressure Vessel & Piping 69, pp. 185-196 (1996).
- [6] 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).

9. 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.