

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CRACK ARREST EN ACEROS ESTRUCTURALES BASÁNDOSE EN ENSAYOS A PEQUEÑA ESCALA

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. Fax. 942-201818
e-mail: galloc@unican.es, alvareja@unican.es**

Resumen. El concepto de Crack Arrest (parada de fisura) corresponde a una de las técnicas capaces de prever las condiciones para que una fisura propagándose de forma frágil en el interior de un componente se detenga. En la actualidad existen numerosos procedimientos experimentales que permiten determinar los principales parámetros que definen las propiedades de Crack Arrest. Estos parámetros son la temperatura de parada de fisura (CAT) y el factor de intensidad de tensiones en parada de fisura (K_{Ia}).

En este artículo se describen los ensayos y procedimientos utilizados para obtener las propiedades de Crack Arrest de dos aceros estructurales empleados en la construcción del casco de buques. Se han evaluado las correlaciones entre los valores de aparición dúctil-frágil obtenidos en los ensayos a pequeña escala y los valores de CAT, adoptándose los más adecuados en función de cada material para su posterior aplicación en la definición de ensayos a escalas superiores.

Abstract. The concept of Crack Arrest forms the basis of one of the techniques that could obtain the necessary conditions to prevent a flaw from growing in brittle conditions in a component. At present, many experimental procedures are able to obtain the main parameters that characterise Crack Arrest properties. These parameters are the Crack Arrest temperature (CAT) and the plain strain Crack Arrest fracture toughness value (K_{Ia}).

This paper describes the tests and procedures carried out to obtain the Crack Arrest properties of two structural steels used in the shipbuilding industry. The correlation between Shear-Brittle fracture appearance values, obtained from small-scale empirical methods, and CAT values, have been estimated for each steel to define and carry out more complex tests.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de seguridad frente a fractura de componentes y estructuras ha sido clásicamente abordado bajo dos filosofías diferentes (I) asegurar que el material tiene en cualquier punto una tenacidad suficientemente alta para evitar el crecimiento de fisuras y (II) potenciar la existencia de zonas que aseguren la no propagación de grietas una vez que éstas se han iniciado.

Este segundo procedimiento, clásicamente conocido como "Parada de Grieta" o "Crack Arrest", es el que se aborda en el presente trabajo. La limitación del primer enfoque estriba en la dificultad de diseñar componentes y estructuras que en sus condiciones habituales de trabajo se encuentran sometidas en todos sus elementos a solicitaciones inferiores a las permitidas por el material. La existencia de zonas locales frágiles capaces de nuclear defectos de tamaño superior al crítico de propagación de fisuras es lo suficientemente probable en grandes componentes, donde a pesar de cuidadosas

inspecciones, la detección y evaluación del total de los posibles defectos existentes resulta impracticable, como para exigir el segundo. Es decir, resulta importante tener algún tipo de control sobre el comportamiento de las fisuras una vez que éstas se están propagando, con vistas a evitar el fallo global de la estructura o de los componentes en que se encuentran.

Los principales ámbitos de la industria donde tiene mayor empleo el concepto de Crack Arrest son la industria nuclear para la construcción de vasijas a presión, las plantas de gas para sus tanques de almacenamiento, la industria naval para la construcción de los cascos de buques, las conducciones de tuberías o las plataformas offshore sometidas a condiciones extremas de trabajo. Todas ellas en la situación común de ofrecer componentes o elementos estructurales de grandes dimensiones.

En la actualidad existen numerosos procedimientos experimentales utilizados para determinar los principales parámetros que definen las propiedades de

Crack Arrest. Estos ensayos se clasifican de acuerdo a las dimensiones del propio ensayo o al parámetro de cálculo obtenido (temperatura de parada de fisura, CAT, o factor de intensidad de tensiones en parada de fisura, K_{Ia}).

En este artículo se describen los ensayos y procedimientos empleados clásicamente para obtener las propiedades de Crack Arrest, y se presenta su aplicación a la determinación de los parámetros de Crack Arrest de dos aceros estructurales empleados en la construcción del casco de buques. Se han evaluado las correlaciones entre los valores de apariencia dúctil-frágil obtenidos en los ensayos a pequeña escala y los valores de CAT, adoptándose los más adecuados en función de cada material para su posterior aplicación en la definición de ensayos a escalas superiores.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENSAYOS DE CRACK ARREST

Los ensayos existentes para determinar las propiedades de Crack Arrest pueden dividirse en tres grupos [1]: Ensayos a gran escala, ensayos a pequeña escala y ensayos basados en el factor de intensidad de tensiones de parada de fisura.

2.1 Ensayos a Gran Escala

Este tipo de ensayos representa de manera más aproximada la parada de una fisura propagando de forma frágil en el interior de un componente. La geometría de la pieza y el sistema de cargas se modelizan de forma real reproduciendo la situación de trabajo del propio componente o de forma simulada ensayando grandes piezas.

Mientras que los ensayos de componentes resultan excesivamente costosos, los ensayos a gran escala son más prácticos y económicos. Estos surgieron para aplicaciones de la industria naval y han evolucionado desde el ensayo Robertson (1953) hasta los ensayos de doble tracción (DTT) o Crack Arrest corto (SCA) que son los más extendidos.

El ensayo Robertson consiste en iniciar una fisura mediante el efecto de un impacto sobre la zona entallada y frágil de una pieza sometida a una tensión máxima admitida. El ensayo permite determinar si la fisura logra detenerse en un punto de la pieza o propaga de forma inestable bajo las condiciones de carga impuestas y la temperatura de trabajo. El objetivo de este ensayo es la obtención de la menor temperatura para la cual el material es capaz de provocar la detención de la fisura. Esta temperatura se denomina Temperatura de Parada de Fisura, CAT.

El ensayo de doble tracción también consiste en provocar la propagación de una fisura en una pieza sometida a la máxima tensión admitida, generalmente 2/3 del límite elástico, a partir de un defecto generado

en una zona frágil. El impacto inicial sobre la pieza es reemplazado mediante la aplicación de una fuerza secundaria, Figura 1.

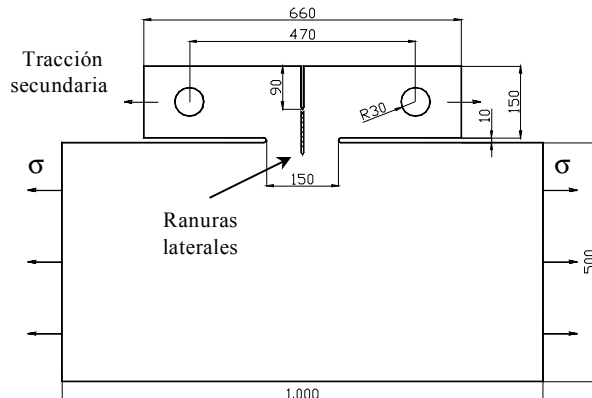


Fig. 1. Configuración del Ensayo Doble Tracción [2]

Generalmente, la pieza está sometida a un gradiente de temperatura, creciente desde la parte en que se inicia la propagación. El objetivo del ensayo consiste en comprobar si la fisura iniciada logra detenerse y en ese caso, obtener la temperatura correspondiente a ese punto de la pieza. Esta temperatura, asociada a la longitud de parada de fisura, a_a , a través del gradiente térmico conocido será un parámetro CAT dependiente de las temperaturas extremas y de la tensión de sollicitación establecida.

Las variables que influyen en este ensayo son el espesor y dimensiones de la probeta, la tensión aplicada, la longitud de zona fragilizada de la pieza y la existencia de tensiones residuales.

Una variación del ensayo de doble tracción dio lugar al ensayo Crack Arrest corto, desarrollado para localizar y conocer la influencia de fisuras que propagan en zonas frágiles situadas en zonas afectadas térmicamente debidas a soldaduras en grandes piezas [3].

Resumiendo, los ensayos a gran escala suelen realizarse con el fin de obtener resultados más exactos y validar los obtenidos por otras vías. Los ensayos recomendados son el DTT y el SCA puesto que pueden llevarse a cabo a temperatura constante o con un gradiente térmico, es posible conocer el factor de intensidad de tensiones aplicado o iniciar la propagación de la fisura de forma estática.

2.2 Ensayos a Pequeña Escala

La dificultad de realizar ensayos a gran escala dio como origen la aparición de los ensayos a pequeña escala a partir de los cuales también pueden obtenerse los parámetros característicos de Crack Arrest. La aplicabilidad de estos viene definida por correlaciones empíricas con los ensayos a gran escala y de componentes. Sin embargo, sus resultados poseen menor exactitud puesto que el sistema de cargas, la flexibilidad

de la probeta, sus dimensiones, etc., pueden no ser representativas de la estructura.

Los principales ensayos englobados en este grupo, todos ellos normalizados, son el ensayo Charpy, convencional o instrumentado, el ensayo Pellini y los ensayos drop-weight tear, DWTT y dynamic tear. El ensayo Charpy es el más extendido y permite obtener resultados en términos de energía absorbida por la pieza de ensayo, porcentaje de rotura dúctil en la superficie de fractura o expansión lateral de la pieza en la línea de impacto del martillo. Por medio de estos resultados es posible determinar la temperatura de transición dúctil-frágil en la curva de apariencia de rotura, FATT, del material ensayado.

Se han establecido numerosas correlaciones, basadas en ensayos, entre los valores de la temperatura FATT de transición y la temperatura CAT [4]. Sin embargo, los resultados presentan ligeras desviaciones debidas principalmente a que la energía medida en el proceso de rotura es suma de las energías de iniciación y de propagación. Con el fin de separar estas dos componentes de la energía surgió el ensayo Charpy instrumentado, que también permite obtener la curva Carga-Desplazamiento del ensayo.

El ensayo Pellini permite determinar la máxima temperatura para la cuál no existe deformación de la pieza después de producirse su rotura, NDTT. Este ensayo se realiza mediante la caída de un peso que golpea sobre una pieza rectangular apoyada en dos puntos, que posee una soldadura de tipo frágil en una de sus caras.

La temperatura NDTT sirve para la definición de la temperatura de referencia con ductilidad nula, RT_{NDT} . Esta temperatura, definida según el código ASME, resulta ser la mayor de las tres siguientes [1]:

- La temperatura NDTT obtenida del ensayo Pellini.
- 33.3 °C por debajo de la temperatura correspondiente a una energía de 68 J en el ensayo Charpy.
- 33.3 °C por debajo de la temperatura correspondiente a una expansión lateral de 0.89 mm del ensayo Charpy.

Al igual que en el ensayo Charpy, se han establecido correlaciones entre los valores de NDTT y RT_{NDT} con la temperatura CAT.

A pesar de tener ciertas limitaciones, mejoradas por el ensayo DWTT, el ensayo Pellini está considerado como el más adecuado de esta categoría para caracterizar las propiedades de Crack Arrest. Esto es debido al tipo de pieza y procedimiento utilizado por este ensayo [1].

2.3 Ensayos basados en el Factor de Intensidad de Tensiones de Parada de Fisura

Este tipo de ensayos, similares a los convencionales de tenacidad a fractura, tienen por objeto producir un inicio

de una fisura y su posterior detención para determinar de manera sencilla el factor de intensidad de tensiones en parada de fisura del material, K_{Ia} .

Los principales ensayos incluidos en este tipo son: Viga Doble Cantilever, DCB, Crack Arrest Compacto, CCA, (normalizado por la sociedad ASTM), Viga Doble Cantilever Afilada, TDCB o Compacto de Tensión debida a un Momento, MMCT.

El ensayo de Viga Doble Cantilever utiliza diferentes configuraciones de probeta, siendo la más utilizada con forma rectangular. Introduciendo una cuña de forma constante en una zona de la pieza que posee una entalla, se consigue un factor de intensidad de tensiones, K_{app} , mayor que la tenacidad a fractura del material, K_{Ic} , originando por ello una propagación de la fisura. Sin embargo, el desplazamiento constante origina en la pieza un factor K_{app} decreciente con el tamaño de fisura y esto puede inducir a una parada de la fisura si este factor alcanza el valor K_{Ia} .

El ensayo Crack Arrest Compacto posee ciertas ventajas respecto al ensayo DCB, como una geometría de la pieza más sencilla, menores efectos dinámicos, etc. Asimismo, está normalizado por la asociación ASTM (ASTM E1221/96). La geometría de la pieza es similar a una probeta de tipo CT utilizada en el ensayo de tenacidad a fractura. Como puede verse en la figura 2, su forma es rectangular, está ranurada lateralmente para obtener condiciones de deformación plana y posee un sistema de aplicación de carga por cuña, como se representa en la figura 3. La pieza tiene una zona de soldadura frágil por donde la fisura comienza a propagar.

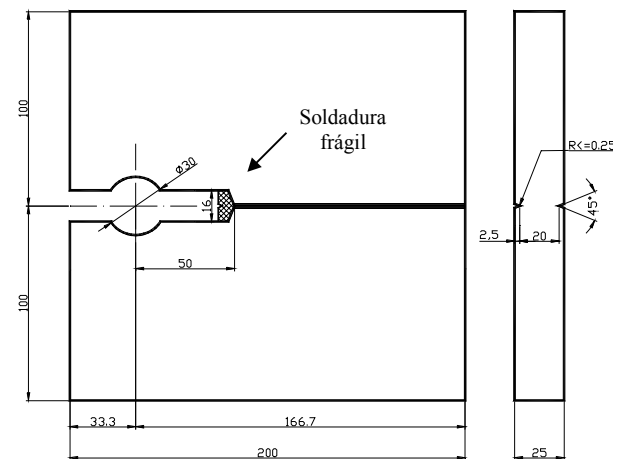


Fig. 2. Pieza del ensayo CCA [5]

El ensayo consiste en introducir una cuña con un pasador aplicando una fuerza en la pieza a ensayar, la cual se encuentra apoyada sobre una placa, como refleja la figura 3 [6]. Mediante un sistema de cargas cíclicas, la carga es aplicada hasta que se produce la propagación rápida de la fisura o hasta que se alcanza un valor de abertura del fondo de fisura predeterminado.

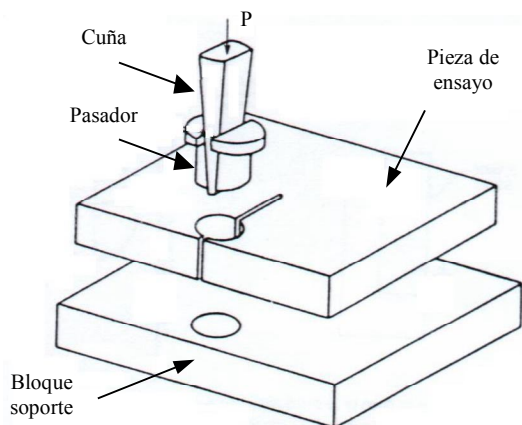


Fig. 3. Configuración del ensayo CCA

El sistema de carga aplicada sobre la pieza asegura que el factor de intensidad de tensiones decrece con el crecimiento de fisura. De este modo es posible estimar el valor del factor de intensidad de tensiones para el cual, la fisura que está propagando se detiene. Este valor se conoce como factor de intensidad de tensiones en parada de fisura, K_{Ia} , asociado a la temperatura del ensayo, siendo K_{Ia} en condiciones de deformación plana.

Numerosos ensayos CCA se realizan a temperaturas menores que la obtenida a partir de la ecuación expresada en función de la temperatura RT_{NDT} [1].

$$T_{ENSAYO} < RT_{NDT} + 60 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{1}$$

3. VALORES DE CAT OBTENIDOS MEDIANTE CORRELACIONES EMPÍRICAS

La realización de ensayos de Crack Arrest que poseen dificultad de procedimiento o un elevado coste debido al tipo de maquinaria o a las dimensiones de la probeta de ensayo, induce a considerar en muchos casos como válidos los resultados de los ensayos a pequeña escala. Para ello, diferentes autores han abordado el estudio de estas correlaciones empíricas basadas en ensayos y programas de investigación que proporcionan los valores de los parámetros CAT y K_{Ia} .

Los valores de temperatura CAT obtenidos por medio de los ensayos Charpy han sido determinados mediante porcentajes del valor de la temperatura FATT [1]. En un principio se relacionaron con un 25% de la temperatura de transición dúctil-frágil. Sin embargo, en aceros modernos se emplea un 50 % del valor esta temperatura mediante la siguiente expresión [4, 7]:

$$CAT = 50\% \text{ FATT} + 35 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{2}$$

Esta relación ha sido obtenida para aceros de espesor 25 mm y una tensión aplicada de 2/3 del valor del límite elástico.

Otra expresión empleada para aceros con espesor de 13 mm tiene la siguiente expresión [4]:

$$CAT = 50\% \text{ FATT} - 15 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{3}$$

Las correlaciones obtenidas mediante el ensayo Pellini se determinan a partir de la temperatura NDTT. Una de ellas utiliza correcciones para la tensión aplicada, σ y el espesor de probeta, B, obteniendo el siguiente valor de CAT [4, 8]:

$$CAT = [NDTT + 10] + [0.13 \cdot \sigma - 16] + [5.3 \cdot (B - 12)^{1/2} - 19] \tag{4}$$

(CAT y NDTT en $^\circ\text{C}$, σ en MPa y B en mm).

4. APLICACIÓN: MATERIAL ANALIZADO

El estudio de las propiedades de Crack Arrest tiene como objetivo establecer requerimientos o guías en el diseño de componentes y en las características de los materiales empleados. En el presente artículo se aborda este análisis en dos tipos de aceros que se emplean en la industria naval para la construcción de cascos de buques. Estos aceros, producidos mediante diferentes procedimientos, son el acero Grade A resultante de un proceso de laminación y el AH32 normalizado y tratado termomecánicamente.

El acero Grade A, procedente de chapa de espesor 15 mm, tiene por composición química la indicada en la tabla 1 y sus propiedades mecánicas están incluidas en la tabla 2.

Tabla 1. Composición química. Acero Grade A

ELEMENTO		C	Si	Mn	P
Composición Química		0.13	0.24	0.66	0.015
S	Cr	Ni	Mo	Al	
0.016	<0.02	<0.02	<0.005	0.006	
V	Nb	Cu	Ti	Ceq.	
<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	0.243	

Tabla 2. Propiedades mecánicas. Acero Grade A

Dirección	Longitudinal	Transversal
Límite Elástico (MPa)	272.5	274.0
Tensión de Rotura (MPa)	450.0	455.2
Deformación en Rotura	16.3 %	17.2 %

El acero AH32, que proviene de chapa de espesor 25 mm, tiene la composición química presentada en la Tabla 3 y las propiedades mecánicas descritas en la Tabla 4.

Tabla 3. Composición química. Acero AH32

ELEMENTO		C	Si	Mn	P
Composición Química		0.099	0.26	1.30	0.019
S	Cr	Ni	Mo	N	Al
0.004	0.020	0.020	<0.005	0.0073	0.034
V	Nb	Cu	Sn	Ti	Ceq.
---	0.012	<0.02	<0.005	<0.005	0.321

Tabla 4. Propiedades mecánicas. Acero AH32

Dirección	Longitudinal	Transversal
Límite Elástico (MPa)	388.5	398.5
Tensión de Rotura (MPa)	504.0	509.1
Deformación en Rotura	15.7 %	15.6 %

5. APLICACIÓN DE ENSAYOS A PEQUEÑA ESCALA

Los ensayos a pequeña escala realizados con los dos aceros analizados, a partir de probetas normalizadas, han sido del tipo Charpy instrumentado y Pellini.

Los ensayos Charpy instrumentados permiten obtener la energía absorbida por el material en el proceso de rotura para valores paramétricos de la temperatura de ensayo. Por medio de estas curvas es posible determinar la temperatura de transición dúctil-frágil del material, que corresponde a una energía de rotura de 27 Julios. En las figuras 4 y 5 se pueden ver estas curvas según las direcciones longitudinal (LT) y transversal (TL) de laminación.

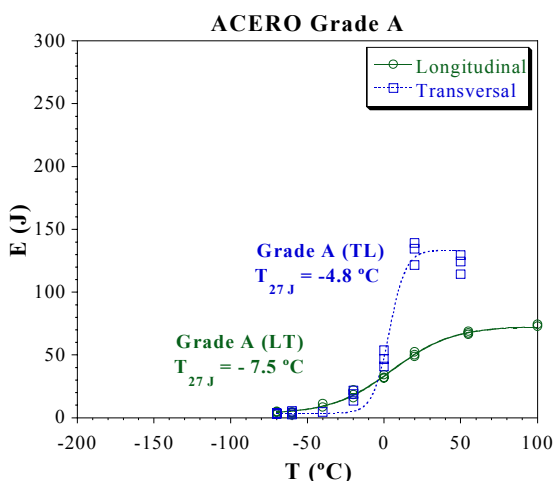


Fig. 4. Energía de rotura en función de la temperatura de ensayo. Acero Grade A.

En la figura 4, correspondiente al acero Grade A, puede verse que este material presenta mejor comportamiento

en la dirección transversal para altas temperaturas. Sin embargo, sucede al contrario para temperaturas negativas donde se llega a una temperatura de transición ligeramente menor en la dirección longitudinal.

La figura 5 corresponde al acero AH32 y en ella puede verse que la diferencia entre las dos direcciones de laminación es considerable. El material posee mejores propiedades en la dirección longitudinal, existiendo una importante diferencia en la temperatura de transición.

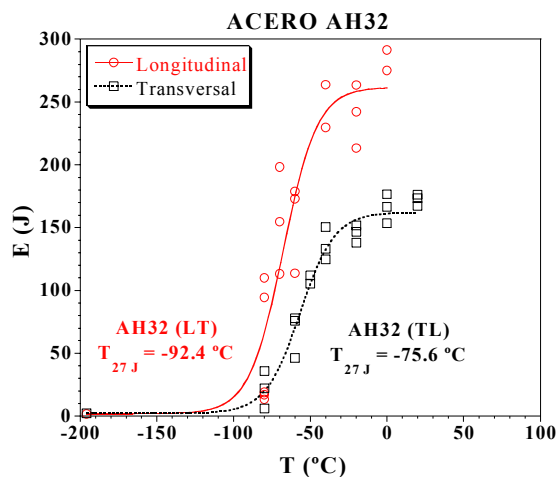


Fig. 5. Energía de rotura en función de la temperatura de ensayo. Acero AH32.

El acero AH32 presenta valores muy superiores de energía de rotura frente al acero Grade A. Asimismo, la transición dúctil-frágil llega para valores de temperatura mucho menores.

En las figuras 6 y 7 se pueden ver las curvas de apariencia de rotura de los dos materiales representándose el porcentaje de rotura frágil frente a la temperatura de ensayo para las dos direcciones de laminado, y obteniendo de ese modo la temperatura correspondiente al 50 % de apariencia frágil.

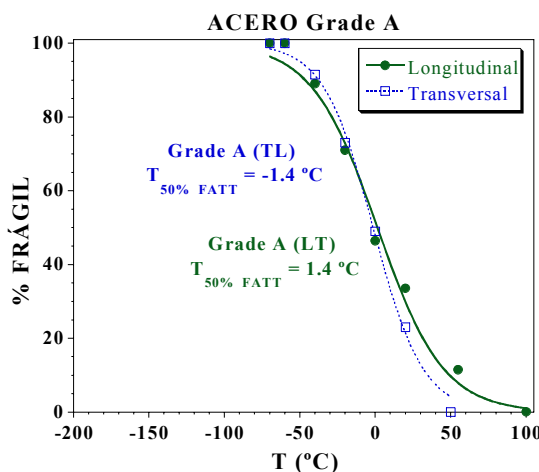


Fig. 6. Apariencia de rotura. Porcentaje de rotura frágil en función de la temperatura. Acero Grade A.

La figura 6 corresponde al acero Grade A y en ella se aprecia una igualdad en los resultados de apariencia de rotura en las direcciones longitudinal y transversal determinándose valores de 50% FATT similares.

En la figura 7 se pueden ver los resultados del aspecto de rotura del acero AH32. Ésta indica que la dirección longitudinal tiene menor temperatura correspondiente el valor 50 % FATT. Se comprueba que este material es completamente dúctil a temperatura ambiente.

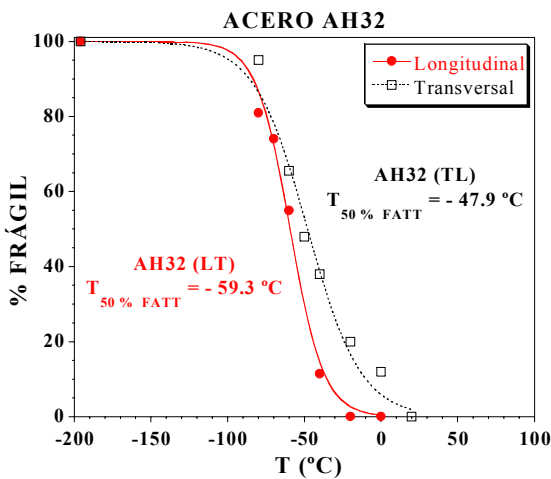


Fig. 7. Apariencia de rotura. Porcentaje de rotura frágil en función de la temperatura. Acero AH32.

Las curvas de apariencia de rotura correspondientes a los dos materiales estudiados indican de nuevo que el acero AH32 presenta mejores propiedades mecánicas y una transición dúctil-frágil a temperaturas mucho menores. Asimismo, se comprueba que los valores obtenidos con el estudio de la fractografía son más conservadores que los definidos a partir de energía.

El segundo tipo de ensayo a pequeña escala llevado a cabo con los dos aceros es el Pellini [9]. Ensayando dos series de probetas mecanizadas según la dirección longitudinal, se obtienen las temperaturas NDTT.

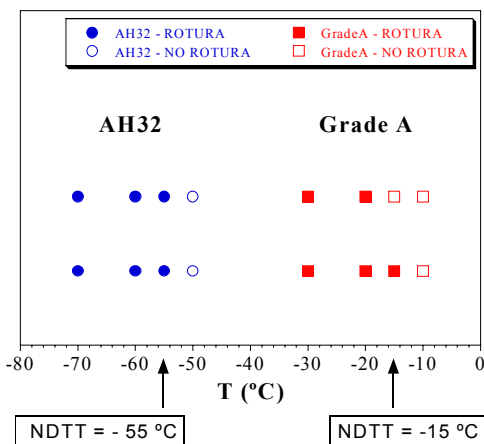


Fig. 8. Resultados del ensayo Pellini. Aceros AH32 y Grade A. Dirección longitudinal.

En la figura 8 puede verse el comportamiento de cada material para las diferentes temperaturas, observando que el acero AH32 presenta un valor de temperatura NDTT inferior al acero Grade A.

Basándose en los resultados obtenidos se prueba que el acero AH32 puede trabajar a temperaturas en las que el acero Grade A presenta un comportamiento totalmente frágil.

También se observa para cada material que los resultados de las temperaturas correspondientes a los valores 50 % FATT del ensayo Charpy y NDTT del ensayo Pellini, conducen a predicciones similares de la transición dúctil-frágil.

6. TEMPERATURA CAT OBTENIDA MEDIANTE ENSAYOS A PEQUEÑA ESCALA

Como se ha dicho en este artículo, el cálculo de las propiedades de Crack Arrest puede realizarse a partir de los ensayos a pequeña escala, mediante las relaciones entre la temperatura CAT y los valores 50 % FATT y NDTT.

Los resultados de CAT que se obtienen basándose en el ensayo Charpy para los dos aceros estudiados según la ecuación (2) para el acero AH32 y según la ecuación (3) para el acero Grade A, son los siguientes:

Tabla 5. Valores de CAT a partir del ensayo Charpy

Material	Dirección	50 % FATT (°C)	CAT (°C)
Grade A	Longitudinal	1.4	-13.6
	Transversal	-1.4	-16.4
AH32	Longitudinal	-59.3	-24.3
	Transversal	-47.9	-12.9

Los resultados que se obtienen del ensayo Pellini para los dos aceros estudiados según la ecuación (4), con una tensión igual a 2/3 del límite elástico son los siguientes:

Tabla 6. Valores de CAT a partir del ensayo Pellini

Material	Dirección	NDTT (°C)	CAT (°C)
Grade A	Longitudinal	-15	-7.3
AH32	Longitudinal	-55	-27.2

Los valores de CAT obtenidos mediante estas aproximaciones están en torno a -25 °C para el acero AH32 en su dirección longitudinal. Esto indica que el acero AH32 presenta propiedades de Crack Arrest mejores siendo por ello de mejor aplicación en las situaciones que requieren esta característica.

7. RESULTADOS DE ENSAYOS DOBLE TRACCIÓN

Para evaluar la bondad de las predicciones en el valor de CAT obtenido mediante ensayos a pequeña escala, es importante realizar alguno a mayor escala para determinar la exactitud de estas predicciones y correlacionar la tipología de la propagación con la encontrada en ensayos a pequeña escala.

La valoración de los resultados de temperatura CAT

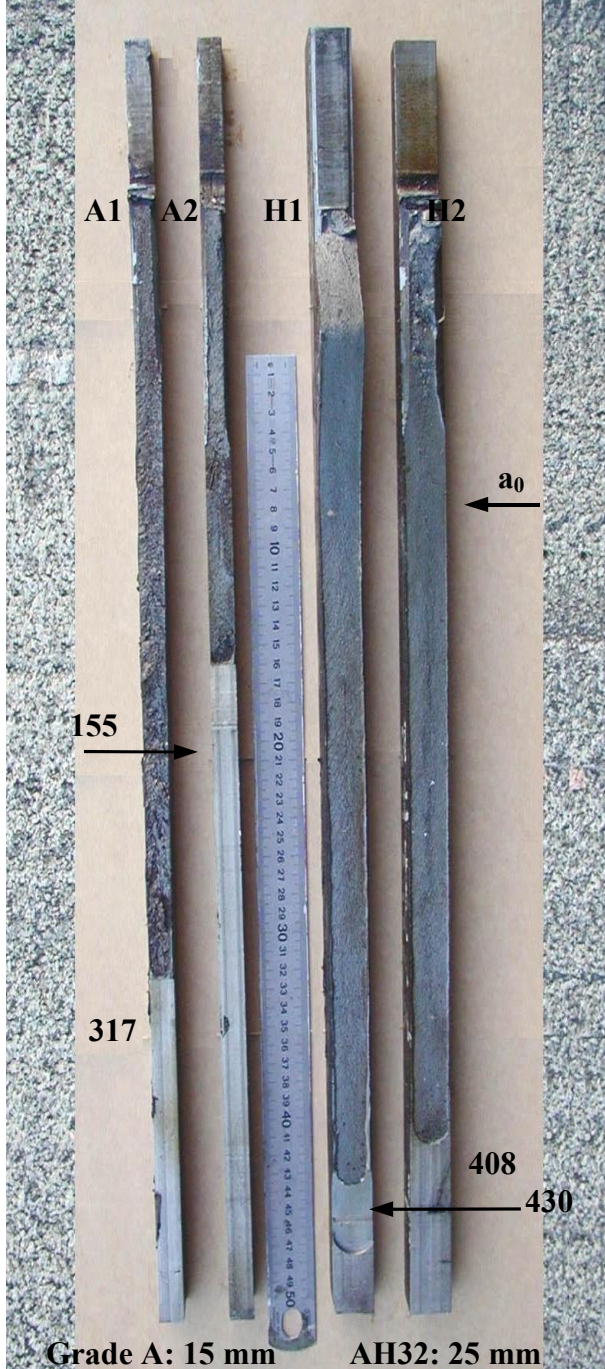


Fig. 9. Secciones de probetas del ensayo doble tracción. Aceros Grade A y AH32.

Mediante la toma de temperaturas con termopares en toda la sección de la pieza se han obtenido las temperaturas en cada punto y en parada, CAT, de cada probeta. Asimismo, se puede calcular el valor del factor de intensidad de tensiones aplicado en el momento de parada de la fisura, K_a , a partir de la tensión impuesta sobre la pieza y la longitud de fisura propagada, con lo que se obtiene la relación de este factor con la temperatura CAT.

En la tabla 9 se indican los resultados de ensayos doble tracción llevados a cabo con los aceros Grade A y AH32 [9].

Tabla 9. Resultados de ensayos Doble Tracción

Material	Grade A		AH32	
	A1	A2	H1	H2
Código	A1	A2	H1	H2
B (mm)	15	15	25	25
a (mm)	317	155	430	408
a/W	0.63	0.31	0.86	0.82
CAT (°C)	5	-30	-8	-13
σ (MPa)	149	99	211	164
CAT Calc.	-11.4	-17.9	-33.4	-39.5

Los valores de CAT obtenidos con cada pieza ensayada se representan junto con las predicciones realizadas por medio del ensayo Pellini en función de la tensión aplicada, figura 10.

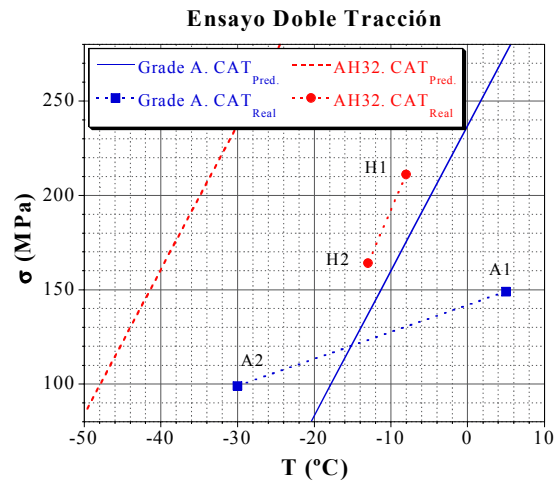


Fig. 10. Temperaturas CAT del ensayo doble tracción en función de la tensión aplicada

Otros resultados obtenidos con estos aceros se presentan en la tabla 10. Estos resultados permiten disponer de mayor información para comparar la temperatura CAT calculada frente a los valores reales obtenidos en los ensayos.

Tabla 10. Resultados de ensayos Doble Tracción [10]

Material	Grade A			AH32
	A3	A4	A5	H3
B (mm)	12.7	20.1	25	20.3
a/W	0.2	0.69	0.5	0.42
CAT (°C)	-38	12	5	-18
σ (MPa)	158	200	148	190
CAT Calc.	-30	1	-11.6	-37.5

En la figura 11 se representan todos los valores de temperatura CAT obtenidos en los ensayos doble tracción frente a los valores determinados mediante el ensayo Pellini.

Las predicciones de CAT a partir de los ensayos a pequeña escala tienen una exactitud en torno a ± 15 °C, [4]. Tomando los resultados de la gráfica y teniendo en cuenta este rango de quince grados, se puede afirmar que las predicciones realizadas para el acero Grade A presentan buena aproximación frente a los valores reales obtenidos con el ensayo doble tracción, ya que oscilan entre 8 y 16 grados. Las predicciones en el caso del acero AH32 tienen una correlación frente a los valores reales que oscila entre 19 y 26 grados y que queda del lado de la inseguridad al ser las predicciones de mayor tenacidad.

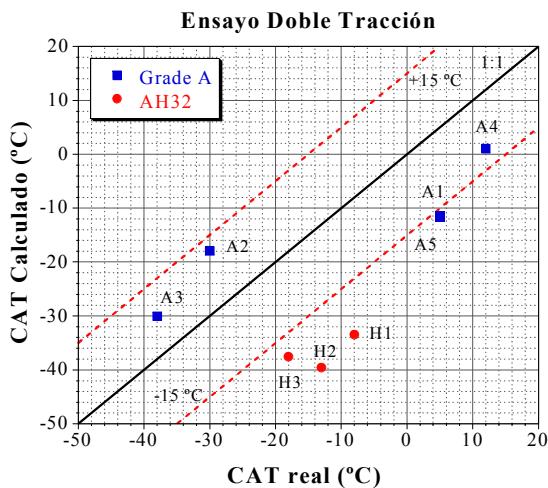


Fig. 11. Temperaturas CAT del ensayo doble tracción junto a predicciones de ensayos a pequeña escala

La predicción de una temperatura de parada de fisura basada en parámetros de cambio de modo de propagación frágil a dúctil en ensayos Charpy y Pellini permite prever para el ensayo doble tracción unos micromecanismos de rotura totalmente frágiles tal como muestra el estudio fractográfico realizado sobre las muestras ensayadas.

9. CONCLUSIONES

El estudio de las propiedades de Crack Arrest tiene gran importancia en el diseño de grandes componentes con necesidades de seguridad importantes o que trabajan en condiciones extremas. De este estudio surgen materiales con capacidad para detener la propagación de fisuras internas, lo cual les permite ser aptos para soportar estas condiciones de trabajo.

Existen numerosos tipos de ensayos que determinan las propiedades de Crack Arrest. Entre ellos, los ensayos a gran escala que por resultar demasiado costosos y complicados suelen realizarse únicamente como validación de otros más sencillos. Los ensayos recomendados actualmente de este grupo son los de doble tracción y Crack Arrest corto.

Entre los diferentes tipos de ensayos a pequeña escala, útiles por su simplicidad y por permitir obtener el valor de temperatura CAT mediante sencillas relaciones empíricas, el ensayo Pellini es el más adecuado para caracterizar las propiedades de Crack Arrest.

Los ensayos basados en el factor de intensidad de tensiones de parada de fisura sirven para calcular este parámetro del material y con él, determinar si una combinación de tensión aplicada y longitud de fisura puede llevar a que ésta, una vez iniciada, propague o se detenga. El ensayo CCA ha sido normalizado, por lo que se recomienda su empleo.

Se han estudiado las propiedades de Crack Arrest de dos aceros empleados en la construcción de cascos de buques (Grade A y AH32). Con estos aceros se han llevado a cabo los ensayos más sencillos con el fin de obtener el parámetro CAT. Este valor ha resultado similar obtenido a partir de la temperatura NDTT del ensayo Pellini o por medio del 50 % FATT del ensayo Charpy. Los resultados conducen a temperaturas CAT entre -13 y -7 °C para el acero Grade A y -25 °C para el acero AH32. Esto ha indicado que el acero AH32 es más adecuado para condiciones de trabajo a bajas temperaturas.

La contrastación de los valores CAT obtenidos por medio de los ensayos a pequeña escala se ha realizado mediante resultados procedentes de ensayos doble tracción, corroborando la afirmación de una exactitud en torno a ± 15 °C para el acero Grade A y augura unas predicciones optimistas en exceso para el acero más tenaz AH32.

10. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se extrae del trabajo realizado hasta la fecha en el proyecto europeo denominado "An Energy Balance Approach For Crack Arrest" n° 7210/PR/182.

11. 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] Lindley C., Bannister A. y Priest A. H., "Crack Arrest in modern structural steels - fundamentals, test development and significance to steel usage", British Steel. Report (1992).
- [3] Bala S. R., Malik L. y Graville B. A., "Short crack arrest capability of a structural steel for arctic ships", Proc. 11th OMAE Conf. Vol.III-B, pp.431-439, American Society of Mechanical Engineers, (1992).
- [4] Wiesner C. S., "Predicting structural crack arrest behaviour using small-scale material characterisation tests", Internal Journal Pressure Vessel & Piping 69, pp. 185-196 (1996).
- [5] Gallo C., Álvarez J.A., Gutiérrez-Solana F. y Polanco J. A., "An Energy Balance Approach For Crack Arrest" Proyecto CECA. 2º informe técnico, (2000).
- [6] "Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} of Ferritic Steels", ASTM E 1221-96 (1996).
- [7] Smedley G. P., "Prediction and Specification of Crack Arrest Properties of Steel Plate", Internal Journal Pressure Vessel & Piping 40, pp. 279-302 (1989).
- [8] Priest A. H., "An energy balance in crack propagation and arrest", Engineering Fracture Mechanics, 61, pp.231-251, (1998).
- [9] "An Energy Balance Approach For Crack Arrest", Technical Report No 2. ECSC project. 7210/PR/182, (2000).
- [10] "Steel selection criteria for fracture avoidance in welded ships", ECSC project. 7210/KA/824, (1999).