

## EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE UNA FUNDICION ESFEROIDAL BAINITICA (ADI)

A.M. Irisarri, J. Arriaran y J.R. Guridi

División Materiales Metálicos  
INASMET, C/Portuetxe, 12, 20009 SAN SEBASTIAN

Resumen. Se ha analizado el comportamiento frente a la fractura de probetas extraídas de bloques de fundición esférica bainítica de 12.5, 25 y 50 mm de espesor en tres estados de tratamiento térmico. Las probetas que han recibido el tratamiento térmico de austempering a la temperatura más alta exhiben una elevada tenacidad, independiente del espesor del bloque de partida. Por el contrario, las probetas tratadas en el margen inferior de temperatura presentan una elevada resistencia mecánica aunque acompañada de una acentuada merma en la tenacidad. Finalmente las probetas tratadas a temperaturas intermedias entre las consideradas en los casos anteriores ofrecen unos valores de resistencia y tenacidad comprendidos entre los registrados en aquellos.

Abstract. Fracture behaviour of austempered ductile iron specimens machined from 12.5, 25 or 50 mm thick blocks, austempered at 275, 325 and 375°C has been studied. Specimens treated at the highest temperature exhibit the highest toughness. However, samples treated at the lowest temperature show a very high strength but accompanied by a marked decrease in toughness. Finally, specimens treated at intermediate temperatures possess a strength and toughness between those measured in those treated at the highest and lowest ones.

## 1. INTRODUCCION

Durante los últimos años el interés suscitado por el desarrollo de las fundiciones esféricas bainíticas ha crecido espectacularmente gracias a la excelente combinación de propiedades de resistencia mecánica y ductilidad que les confiere el tratamiento térmico de austempering y al menor coste de fabricación de las piezas moldeadas frente a las forjadas, estos materiales constituye una alternativa atractiva al acero en usos tales como cigüeñales, arboles de levas, ruedas de vagones de ferrocarril y, sobre todo, engranajes de diversos tipos (1).

El objetivo del tratamiento de austempering es conseguir una microestructura constituida por austenita con un alto contenido en carbono y ferrita acicular, fase que, a causa de su morfología y la temperatura a la cual se forma, es habitualmente denominada bainita (2). En esencia este tratamiento consta de las siguientes etapas (3).

Austenitización de las muestras de fundición esférica a una temperatura en torno a los 900°C, generalmente durante un periodo de 1 hora.

Temple hasta una temperatura comprendida entre 235 y 450°C.

Mantenimiento a dicha temperatura durante un tiempo suficientemente largo para la formación de la ferrita acicular en una matriz de austenita con un alto contenido en carbono

Enfriamiento de las piezas desde esta temperatura de austempering hasta la ambiente.

El deseo de profundizar en el conocimiento de estos materiales ha conducido a la realización de diversos estudios, dando origen a la aparición de distintas publicaciones. Buena prueba de ello es la presentación de varias ponencias sobre este tema en anteriores ediciones de estos Encuentros (4-6). Sin embargo, la gran mayoría de estos trabajos se basan en la caracte-

terización de probetas de espesor relativamente reducido, inferior al que poseen algunas piezas donde estos materiales pueden ser firmes candidatos para su empleo.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento frente a la fractura que ofrecen las probetas extraídas de bloques de fundición esferoidal bainítica de 12.5, 25 y 50 mm de espesor, en tres diferentes estados de tratamiento térmico.

## 2. TECNICA EXPERIMENTAL

Los diferentes bloques de fundición esferoidal objeto de este estudio se obtuvieron en un horno eléctrico de inducción de media frecuencia de 100 Kgs de capacidad. Estos bloques poseen una forma de Y, con un espesor en sus patas de 12.5, 25 o 50 mm. En la referencia (7) se ofrece una descripción más detallada de la técnica de producción de estos bloques así como de los procesos de esferoidización e inoculación empleados.

La composición química de la fundición esferoidal de los bloques de 12.5 o 25 mm corresponde a 3.70%C, 2.70%Si, 0.24%Mn, 0.010%P, 0.014%S, 0.17%Ni, 0.11%Mo, 0.86%Cu y 0.042%Mg. En las muestras de 50 mm de espesor, la necesidad de incrementar la templabilidad del material ha obligado a elevar los contenidos de níquel (0,60%), molibdeno (0,36%) y cobre (1,10%), manteniendo los demás elementos prácticamente inalterados.

Los tratamientos térmicos se efectuaron en dos hornos: uno para la austenitización de la fundición a la temperatura de 900°C durante 1 hora y el otro para transformar isotérmicamente esta fase a temperaturas entre 275 y 375°C. La duración de este tratamiento de austempering fue de 1 hora en las muestras de 12,5 y 25 mm de espesor y de 2 horas en las de 50 mm. Las probetas que recibieron el tratamiento de austempering a 275, 325 y 375°C, fueron referenciadas con las letras I, M y S, respectivamente.

La caracterización de la tenacidad a la fractura del material en los distintos estados de tratamiento térmico se basó en la determinación del factor de intensidad de tensiones crítico según la norma ASTM E399 (8). En el caso de los bloques de 12,5 o 25 mm se emplearon probetas de doblado en tres puntos de la geometría que se indica en la figura A3.1 de la mencionada norma. Sin embargo, en el caso de las muestras de 50 mm de espesor el uso de este tipo de probetas conduciría a la necesidad de fundir unos bloques de longitud muy elevada (más de 420 mm). Por esta razón se optó por la utilización de probetas compactas de tracción (CT) de la configuración señalada en la figura A4.1 de la misma norma. Todos los ensayos se efectuaron a temperatura ambiente.

Finalizado el ensayo de las probetas la mitad de cada una de ellas se destinó para el examen de su superficie de fractura en el microscopio electrónico de barrido, al objeto de determinar el mecanismo operante en cada uno de los casos.

## 3.- RESULTADOS Y DISCUSION

Las figuras 1 y 2, que muestran las gráficas carga-desplazamiento de apertura del extensómetro obtenidos en el ensayo de una probeta de referencia I y otra de referencia S, respectivamente permiten constatar los dos diferentes tipos de comportamiento a la fractura observados. La primera de estas gráficas presenta un tramo lineal hasta valores de la carga muy próximas al máximo soportado por la probeta, separándose de dicha linealidad tan solo en la fase final del ensayo. Este tipo de curvas se obtiene no solo en las probetas de referencia I sino también en aquellas otras en que el tratamiento de austempering se efectuó a 325°C (referencia M). Este comportamiento elástico de estas probetas permite, supuesto que el espesor de la probeta sea suficiente la obtención de un  $K_{IC}$  válido.

Por el contrario, las gráficas obtenidas en el ensayo de las probetas tratadas a 375°C muestran una desviación de la linealidad para valores de carga sensiblemente más bajos. A partir de este punto continua creciendo la carga de manera paulatina al tiempo que se van abriendo los labios de la fisura, pasando por un suave máximo y comenzando a decrecer nuevamente de forma lenta en un principio para acelerarse posteriormente el proceso de rotura. Esto supone que el valor del factor de intensidad de tensiones calculado según el método de la norma - ASTM E399 (8) implicaría una importante subestimación de la tenacidad. En consecuencia, en estos casos se ha decidido efectuar una evaluación de esta propiedad acudiendo al concepto de la Energía Equivalente de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E992 (9).

La Tabla 1 recoge los valores del factor de intensidad de tensiones ( $K_{IC}$  o  $K_{IEE}$ ), permitiendo establecer las oportunas comparaciones entre ellas, así como con otros materiales. Se observa que, dentro del margen de temperaturas considerado, un aumento de la temperatura de austempering conduce a un acentuado incremento de tenacidad, pudiendo considerarse los valores obtenidos en las probetas tratadas a 375°C equiparables a los registrados en aceros de baja aleación con un límite elástico similar (640 MPa). Por el contrario, los bloques tratados a 275°C que poseen una extraordinaria resistencia mecánica -límite elástico del orden de 1280 MPa- sufren una apreciable merma de tenacidad.

Por otra parte, si bien no se puede descartar totalmente un cierto efecto producido por el cambio del tipo de probeta, la adición de mayores porcentajes de aleación permite que los bloques de 50 mm posean una tenacidad incluso ligeramente superior a la obtenida en las probetas de menor espesor. Este es un resultado

de gran interés puesto que posibilita la fabricación de piezas de un espesor considerable que mantienen unas características mecánicas similares a las que presentan otras más delgadas pero con menor contenido en elementos de aleación.

El examen en el microscopio electrónico de barrido de las distintas probetas ensayadas pone de manifiesto las posibles causas de las diferencias de tenacidad observadas. La figura 3 ofrece un aspecto de la superficie de fractura de una probeta tratada a 375°C. Se aprecia la morfología predominantemente dúctil de dicha superficie de fractura con aparición de cúpulas de tamaño más o menos uniforme, alrededor de los nódulos de grafito. Asimismo, se observa que estas cúpulas o bien se encuentran vacías o bien contienen la totalidad del nódulo de grafito en su interior. La figura 4, obtenida por medio de la técnica de electrones retrodispersados, permite comprobar con mayor claridad la validez de este comentario. Este hecho indica que las microcavidades que constituyen el origen de la fractura se han formado por descohesión entre la matriz y el nódulo al no poder acompañar éste a aquella en su deformación y no por rotura del grafito. Una conclusión en el mismo sentido se ha establecido por observación directa de probetas ensayadas en el interior de la cámara del microscopio electrónico de barrido (10).

La comparación de la micrografía de la figura 3 con las de las 5 y 6, obtenidas a los mismos aumentos en las probetas tratadas a 325 y 275°C, respectivamente, apunta hacia un aumento en el tamaño de los nódulos presentes en la fractura conforme disminuye la temperatura de tratamiento. Habida cuenta que en la observación microestructural de las distintas muestras no se detecta ninguna diferencia en el tamaño de los nódulos su origen deberá ser otro. Una explicación plausible se basa en la diferente capacidad de deformación del material en función del estado de tratamiento. En las probetas tratadas a 275°C a poco de producirse la descohesión entre la matriz y los nódulos más grandes, la relativamente pobre tenacidad de la matriz facilita que se produzca una rápida unión entre las microgrietas así generadas y la subsiguiente rotura. Sin embargo, en las muestras tratadas a 375°C al producirse esta descohesión entre los nódulos de mayor tamaño y la matriz, la ductilidad del material continua siendo lo suficientemente elevada para permitir que continúe deformándose. Como consecuencia de esta ulterior deformación se generan grietas en las intercaras de la matriz con nódulos de menor tamaño que, de esta manera, intervienen en el proceso de rotura y aparecen en las superficies de fractura de las probetas.

Por otra parte, al disminuir la temperatura de austempering aparecen zonas frágiles mas numerosas en la superficie de fractura de las probetas (figura 7) entre las cavidades producidas por los nódulos de grafito. No obstante, a causa de la morfología de la matriz

constituida en parte por austenita fase donde la actuación de un mecanismo de clivaje es sumamente difícil, el tamaño de estas áreas de fractura frágil se encuentra siempre bastante limitado (11). En la referencia (7) se ofrece un estudio fractográfico más extenso.

#### 4. CONCLUSIONES

- a) Se detecta un acentuado efecto de la temperatura de austempering sobre la tenacidad del material. Este comportamiento se observa tanto en las muestras extraídas de los bloques de 12.5 0 25 mm, donde la adición de elementos de aleación es bastante reducida o en las de 50 mm en que el contenido en estos elementos es sensiblemente mayor.
- b) En ambos casos la máxima tenacidad se registra en las muestras tratadas a 375°C, alcanzándose valores del orden de las medidas en un acero de baja aleación con una resistencia mecánica similar.
- c) Las muestras tratadas a 275°C exhiben una resistencia mecánica notablemente mayor pero a costa de un apreciable sacrificio en la tenacidad.
- d) El mecanismo de fractura operante en todos los casos es uno de coalescencia de las microcavidades generadas en las intercaras entre la matriz y los nódulos de grafito.
- e) Conforme disminuye la temperatura de austempering aumenta el tamaño medio de los nódulos presentes en las superficies de fractura de las probetas. Una explicación a este comportamiento se basa en la mayor ductilidad que posee el material tratado a la temperatura más alta lo cual permite que se produzca una mayor deformación sin rotura de la matriz, facilitando la intervención de nódulos más pequeños en el proceso de generación de cavidades por descohesión y coalescencia de las mismas.
- f) Al disminuir la temperatura de austempering se observan areas más amplias de fractura por clivaje. No obstante, la presencia de un considerable porcentaje de austenita en la matriz limita fuertemente la extensión de estas zonas.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J.L. Dong y S.I. Yu Int. J. Fatigue Vol 10 nº 4 (1988): 219-226.
- (2) B.v. Kovacs, J. Heat Treat. Vol 5 nº 1 (1987): 55-60
- (3) R.A. Harding Hommes et Fonderie. Nov (1987) 21-35
- (4) J. Aranzabal, I. Gutierrez, J.M. Rodriguez Ibabe y J.J. Urcola. Anales de Mecánica de la Fractura 7 (1990): 39-46.
- (5) F.J. Belzunce y C. Rodríguez. Anales de Mecánica de la Fractura 7 (1990): 47-52
- (6) Y. Houbaert y J. Dilewijns. Anales de Mecánica de la Fractura 8 (1991): 44-49.
- (7) A.M. Irisarri, J.R. Guridi, J. Arriarán, J.M. Shissler, J. Chobaut. Congreso Mundial Fundición Brasil.
- (8) ASTM E399-83 Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of Standards. Vol 03 . 01.
- (9) ASTM E992-84 Standard Practice for Determination of Fracture Toughness of Steels Using Equivalent Energy Methodology. Annual Book of Standards Vol 03.01.
- (10) R.C. Voigt Fracture of Cast Iron 57th World Foundry Congress Osaka Japon 1990
- (11) M. Gagné. Mem. Sci Rev. Met. Jan (1987): 35-45.

Ref.	Temperatura Austempering	Espesor (mm)	$K_{IC}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	$K_{IEE}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
I	275	12,5	59	-
		25	57	-
		50	60	-
M	325	12,5	72	-
		25	66	-
		50	73	-
S	375	12,5	-	82
		25	-	98
		50	-	105

TABLA 1  
EFECTO DE LA TEMPERATURA DE AUSTEMPERING SOBRE LA TENACIDAD DEL MATERIAL

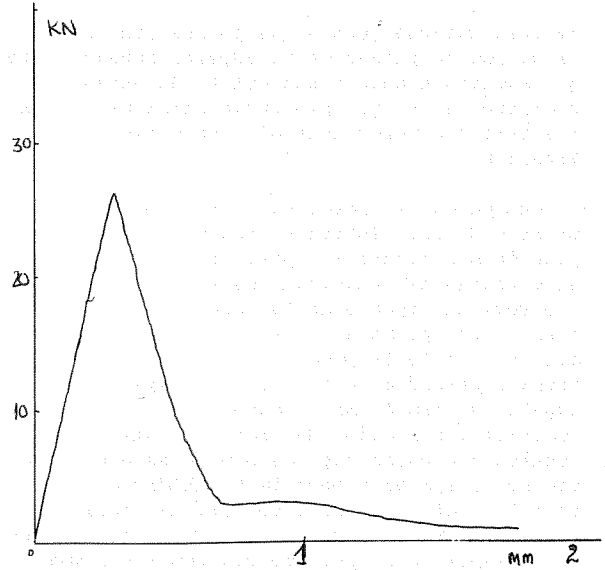


Fig.1.- Gráfica Carga-Desplazamiento de apertura del extensómetro. Probeta I.

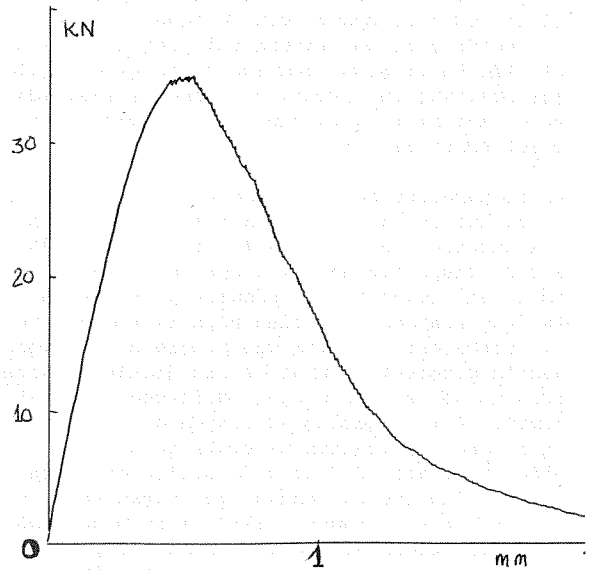


Fig.2.- Gráfica Carga-Desplazamiento de apertura del extensómetro. Probeta S.

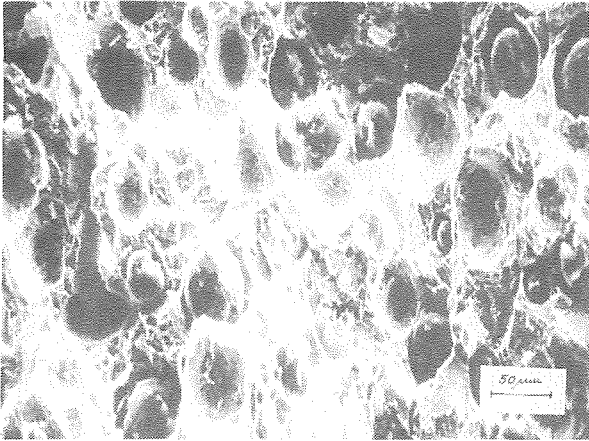


Fig.3.- Micrografía SEM. Superficie de fractura de una probeta de referencia S. Imagen de electrones secundarios.

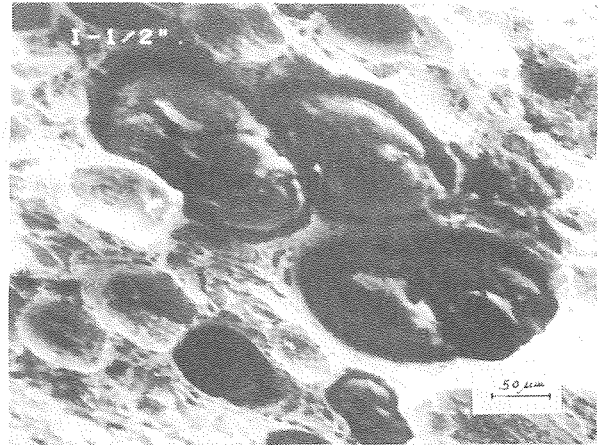


Fig. 6.- Micrografía SEM. Superficie de fractura de una probeta de referencia I.

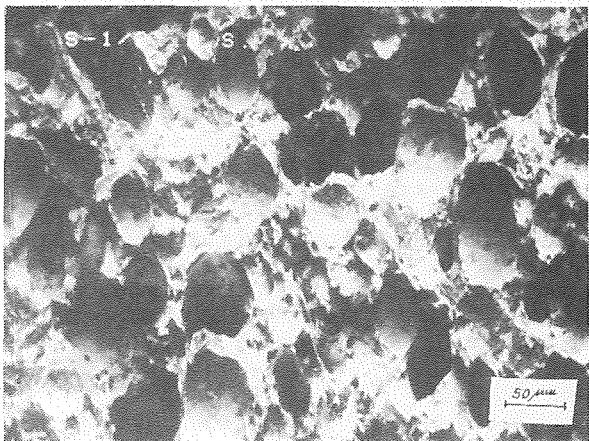


Fig.4.- Micrografía SEM. Misma zona que la imagen anterior pero obtenida con electrones retrodispersados

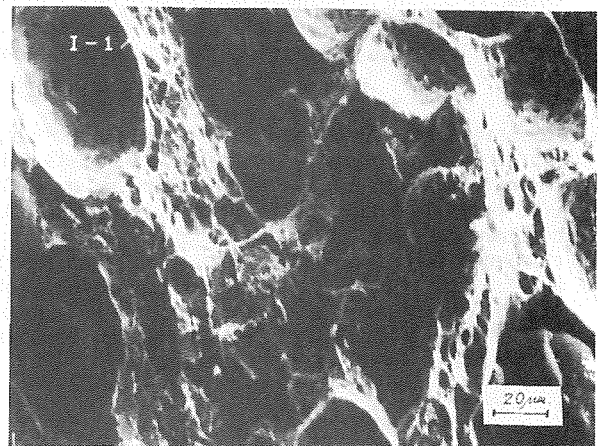


Fig. 7.- Micrografía SEM. Zonas frágiles en una probeta de referencia I.

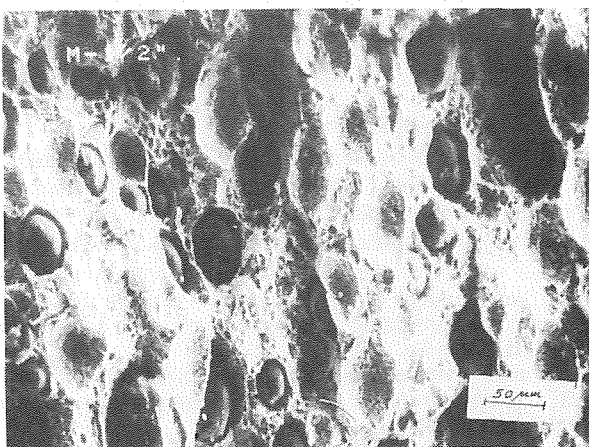


Fig. 5.- Micrografía SEM. Superficie de fractura de una probeta de referencia M.