

## CORROSION BAJO TENSION EN ACEROS DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACION

González J.J.\*, Gutiérrez-Solana F.\*, Barroso S.\*\*,  
Varona J.M.\*

\*Escuela de Ingenieros de Caminos. Universidad de Cantabria-Santander

\*\* Junta de Energía Nuclear-Madrid

Este trabajo analiza la influencia que variables metalúrgicas como el tamaño de grano, microestructura y resistencia mecánica ejerce sobre el comportamiento en corrosión bajo tensión de aceros de alta resistencia y baja aleación. El estudio contempla tanto las roturas de aspecto intergranular como las de aspecto transgranular, analizándose el marco de transición entre ambas.

*This work analyzes the influence of metallurgical variables, as grain size, microstructure and strength, on the Stress Corrosion Cracking Behaviour of HSLA Steels. Both, intergranular and transgranular fracture processes are studied as well as the conditions for transition from one to the other.*

## 1.- INTRODUCCION

El comportamiento de los aceros de alta resistencia y baja aleación frente al fenómeno de Corrosión Bajo Tensión (CBT) ha sido y sigue siendo tema de numerosos estudios experimentales y ulteriores publicaciones. A pesar de ello, se está todavía lejos de poder afirmar que existe un conocimiento preciso del mismo, especulándose sobre el agente y el modo en que se produce la fragilización del material. En cualquier caso, lo que si parece evidente es la decisiva influencia de la microestructura del acero sobre su resistencia a la CBT/1-2/.

El estudio de la relación entre la microestructura y el comportamiento en CBT de los aceros, ha llevado a importantes mejoras en el uso de éstos en ambientes agresivos y además a avances lentos pero positivos, en la comprensión del fundamento final del fenómeno. Es en ambos aspectos donde se enmarca el presente estudio de investigación.

En este trabajo se abordan tanto los tipos de fractura intergranular como transgranular, y la influencia que sobre ellos ejercen factores tales como el tamaño de grano, la morfología del borde de grano y el tipo de microestructura, así como la resistencia mecánica del acero.

## 2.- MATERIAL UTILIZADO Y MEDIO AGRESIVO

El acero empleado en este estudio posee la composición que figura en la Tabla 1, y es similar al F-1250 (CENIM). Es un acero clásico de bonificación que se usa en construcción normalmente templado y revenido con una resistencia entre 800 y 1000 MPa.

El agente agresivo empleado ha sido una solución al 3,5% en peso de NaCl en agua destilada con un pH variable durante la experimentación entre 5.5 y 5.7.

TABLA 1 - Composición química, % en peso

<u>C</u>	<u>S</u>	<u>P</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>
0.35	0.009	0.015	0.72	0.23	0.99	0.16

## 3.- PROCESO EXPERIMENTAL

### 3.1. Caracterización mecánica

Los ensayos mecánicos en CBT se hicieron sobre probetas tipo DCB que fueron mecanizadas, fisuradas por fatiga una longitud próxima a 1 mm. y tratadas térmicamente como más adelante se describe. Tras ello fueron cargadas mediante un sistema de tornillos y sumergidas en la solución agresiva.

Durante la carga se controló el factor de intensidad de tensiones mediante la medida de la longitud de fisura y del desplazamiento relativo de los brazos de la probeta por medio de un extensómetro tipo C.O.D., en base a la determinación previa de la variación de la flexibilidad de la probeta con la longitud de fisura /3/.

Con los datos obtenidos en la experimentación se dibujaron las curvas características de comportamiento en CBT de cada probeta mediante la relación del factor de intensidad de tensiones,  $K_I$ , con el logaritmo de la velocidad de avance de la fisura,  $da/dt$ , (Figura 1), determinándose el estado I,

de parada, por el valor umbral  $K_{Isc}$  y el estado II, de propagación, por la velocidad  $da/dt$ .

Para las condiciones de experimentación usadas, el desplazamiento en la línea de carga se mantiene constante por lo que la propagación de la fisura es estable, yendo del estado de propagación al de parada. Así, sobre cada probeta se han llevado a cabo al menos dos procesos completos de ensayo, observándose una repetitividad aceptable de los resultados obtenidos (dispersión < 10 %).

### 3.2. Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos a que fueron sometidas las probetas para modificar las variables microestructurales cuya influencia se pretende analizar pueden ser agrupados en tres series:

Serie A : Las probetas de esta serie fueron austenitizadas a cinco temperaturas diferentes entre 825 y 1.000°C y tras ello templadas en aceite. Así se consigue variar el tamaño de grano austenítico y la resistencia de acuerdo con la ley de Hall-Petch, con una microestructura martensítica.

Serie B : Las probetas de esta serie fueron austenitizadas a 825°C y tras ello templadas en aceite y finalmente revenidas a temperaturas variables entre 200 y 500°C. Así se consigue un tamaño de grano constante y una resistencia gradualmente decreciente acorde con la variación microestructural.

Serie C : Las probetas de esta serie fueron austenitizadas a temperaturas diferentes tras lo cual fueron templadas en aceite y revenidas a 400°C todas ellas. Así se consiguió un tamaño de grano variable con precipitación en el borde y una microestructura y resistencia similares.

En la Tabla 2 se resume este esquema de tratamientos térmicos así como la dureza Vickers obtenida como medida indirecta de sus resistencia mecánica.

La Figura 2 muestra la variación de tamaño de grano con la temperatura de austenitización en la serie A tras un ataque de solución acuosa saturada de ácido picrico en caliente /4/.

TABLA 2 - Tratamientos térmicos

	Temperatura de austenitización (°C)	Temperatura de revenido (°C)	Dureza Vickers
Serie A	A1 (B0)	825	582
	A2	860	580
	A3	900	567
	A4	950	560
	A5	1000	540

Serie B	BO(A1)	825	--	580
	B1	825	200	540
	B2	825	300	505
	B3(CO)	825	400	460
	B4	825	425	440
	B5	825	450	425
	B6	825	500	390
Serie C	CO(B3)	825	400	460
	C1	900	400	455
	C2	1000	400	450

### 3.3. Microscopía electrónica

Tras la rotura de las probetas se hizo sobre ellas un análisis fractográfico de la superficie de rotura por microscopía electrónica de barrido (SEM), mostrándose el carácter intergranular en todas ellas excepto en las probetas con revenidos a 450 y 500°C en las que el modo de fractura fue transgranular.

También se hizo una observación por microscopía electrónica de transmisión (TEM) sobre muestras de las probetas tratadas, observándose tanto la microestructura de martensita dislocada (Serie A) o martensita (Series B y C), como la morfología del borde de grano, limpia (Serie A) o con precipitación (Series B y C), así como su espesor.

### 4.- RESULTADOS

Los resultados de la caracterización mecánica de estas probetas en corrosión bajo tensión, que se reflejan en sus curvas características, han sido correlacionados con las variables microestructurales mencionadas obteniéndose las relaciones que a continuación se comentan y se resumen en la Tabla 3.

TABLA 3- Resultados numéricos de la caracterización en CBT

Probeta	$K_{I_{scc}}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	da/dt para $K_I=30$ (m.s <sup>-1</sup> )	Tamaño de grano (TG)
			Tamaño Z.P. ( $K_I=K_{I_{scc}}$ )
A1	9.9	1.5 10 <sup>-6</sup>	22
A2	11.7	1.3 10 <sup>-6</sup>	23
A3	13.6	1.7 10 <sup>-6</sup>	28
A4	15.1	1.2 10 <sup>-6</sup>	29
A5	16.8	1.6 10 <sup>-6</sup>	32
BO(A1)	9.9	1.5 10 <sup>-6</sup>	22
B1	12.5	1.5 10 <sup>-6</sup>	12
B2	16.1	1.5 10 <sup>-6</sup>	6.5
B3	19.8	1.3 10 <sup>-6</sup>	3.5
B4	22.5	0.3 10 <sup>-6</sup>	2.5
B5	75	4.2 10 <sup>-8</sup> (*)	0.21
B6	130	4.0 10 <sup>-8</sup> (**)	0.06
CO(B3)	19.8	1.3 10 <sup>-6</sup>	3.5
C1	20	1.4 10 <sup>-6</sup>	8.4
C2	18.2	1.1 10 <sup>-6</sup>	20

(\*) para  $K_I = 100 \text{ MPa.m}^{1/2}$

(\*\*) para  $K_I = 150 \text{ MPa.m}^{1/2}$

La Figura 3 muestra la variación de los parámetros básicos CBT ( $K_{Isc}$  y  $da/dt$  en estado II) en la Serie A con la temperatura de austenitización. Los valores crecientes de  $K_{Isc}$  están relacionados con el tamaño de grano en la Figura 4 y la resistencia mecánica en la Figura 5, mostrando que siguen la regla general de que mejoras en la resistencia a la CBT (del orden del 60%) están asociadas a pérdidas en el nivel resistente (del orden del 7%), que en este caso son debidas al aumento del tamaño de grano. La Figura 3 muestra también que no se observan cambios en la velocidad de propagación en estado II para rotura intergranular a pesar de la variación del tamaño de grano.

La Figura 6 muestra la variación de los parámetros básicos en CBT entre las probetas de la Serie B con la temperatura de revenido. Se observa que los valores de  $K_{Isc}$  aumentan suavemente hasta el revenido a  $425^{\circ}\text{C}$  en el rango  $10\text{-}20\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ , y bruscamente a partir de esa temperatura hasta valores de 70 y  $130\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ . Asimismo no hay variación en la velocidad de propagación en estado II, con valores análogos a los de la Serie A, cuando la propagación es intergranular, pero cuando ésta es transgranular, su velocidad se hace 30 veces menor. En la Figura 7 se observa cómo se correlaciona la pérdida gradual de resistencia en el revenido con una mejora en la resistencia a la CBT, mejora que es brusca a partir del revenido a  $450^{\circ}\text{C}$  que no se corresponde con ninguna variación microestructural repentina en esa temperatura. Este escalón está asociado al cambio en el tipo de fractura observado, de intergranular a transgranular, así como a un importante descenso en los valores de la relación tamaño de grano -tamaño de zona plástica (TG/ZP), (Tabla 3).

Para las probetas de la Serie C, la Figura 8 muestra que no hay variaciones importantes tanto en la velocidad de propagación como en el valor umbral  $K_{Isc}$  con la temperatura de austenitización y por tanto con el aumento del tamaño de grano en el revenido a  $400^{\circ}\text{C}$ .

## 5.- DISCUSION

Los resultados obtenidos permiten hacer las siguientes consideraciones:

- La variación de  $K_{Isc}$  en las probetas templadas de la Serie A no puede ser explicada exclusivamente por aspectos geométricos en parada, que exigirían un valor constante en la relación tamaño de grano a tamaño de zona plástica /5-6/ (Figura 9). Ello conduce a un análisis del efecto de la variación del borde de grano con la temperatura de tratamiento /7/, del que se desprende que la deformación del borde de grano juega un papel importante en el control de la rotura intergranular para las condiciones de esta serie, en cuyas probetas no se observa precipitación en borde de grano.

- La Serie B de probetas revenidas nos muestra un escalón de mejora en la resistencia a la CBT en la transición de rotura intergranular a transgranular, que no va acompañada de una variación microestructural brusca, y cuya explicación se debe al cambio de micromecanismos que controlan las condiciones de rotura, asociados a una variación en la relación TG/ZP desde valores superiores a la unidad (mínimo observado: 2.5) a valores muy inferiores a la misma (máximo observado: 0.21), descrita en anteriores trabajos /8/. Para temperaturas de revenido inferiores a la transición, rotura intergranular, la variación de  $K_{Isc}$  se asocia a la variación observada en la precipitación en borde de grano, posibles puntos de inicio de decohesión al alcanzar una concentración crítica de hidrógeno en el proceso de CBT /9/. Para temperaturas superiores a la de transición, rotura transgranular, la variación de  $K_{Isc}$  se asocia a la variación microestructural debida a los tratamientos.

- En las probetas de la serie C, de acuerdo con lo dicho para las roturas intergranulares de la Serie B, no cabe esperar grandes diferencias de comportamiento, como efectivamente sucede, al tener el mismo tipo de borde de grano con precipitaciones.

- Las únicas diferencias en cuanto a la velocidad de propagación en estado II, están asociadas a la transición intergranular-transgranular, variando desde  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$  a  $4 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ . Este descenso se atribuye a la diferente velocidad de difusión del hidrógeno por borde de grano y por el interior del mismo, fenómeno que controla la velocidad de propagación de las fisuras en los procesos de CBT analizados /10-11/. En fractura intergranular es la difusividad por el borde de grano la que determina la velocidad de propagación de la fisura a lo largo de dichos bordes, sin embargo en fractura transgranular la velocidad de propagación depende de la difusividad del hidrógeno a través de la red, mucho más lenta.

#### 6.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está incluido en un programa de investigación financiado por la Comisión Asesora para la Investigación Científica y Técnica (CAICYT) del Ministerio de Educación y Ciencia. Los autores expresan asimismo su agradecimiento a la ETS de Ingenieros Industriales de Gijón y al CEIT por la colaboración prestada.

#### 7.- REFERENCIAS

- /1/ Bernstein, I.M. y Thompson, A.W., Int. Metals Reviews, 21 pp.269-287, 1976.
- /2/ Thompson, A.W y Bernstein, I.M., Advances in Corrosion Science and Tech. 7 pp 53-173, 1980.
- /3/ Gutierrez-Solana, F., Bernstein, I.M. y Thompson, A.W., Cenim 6ª Asamblea, Madrid, art 164, 1985.
- /4/ Barraclough, D.R., Metallography, 6 , pp 465-472, 1973.
- /5/ Gonzalez, J., Gutierrez-Solana, F., y Varona, J.M., Anales de Ing. Mecánica, 3 pp 239-243, 1985.
- /6/ Hirano, K., Kobayashi, H., y Nakasawa, H., Trans. of the Japan Ins. of Metals, 21 pp 605-608, 1980.
- /7/ González, J. Pte. de publicación. Tesis Doctoral.
- /8/ Kerr, R., Gutiérrez-Solana, F., Bernstein, I.M. y Thompson. A.W., Pte. de publicación en Metallurgical Transactions.
- /9/ Pressouyre, G.M., Proc. of Corrent Solutions to Hydrogen Problems in Steels, Washington, Ed. ASM, pp 18-37, 1982.
- /10/ Pressouyre, G.M. Tesis doctoral, Carnegie-Mellon Un., Pittsburgh, 1977.
- /11/ Gutiérrez-Solana, F., Bernstein, I.M. y Thompson, A.W., Cenim 6ª Asamblea, Madrid, Art. 163, 1985.

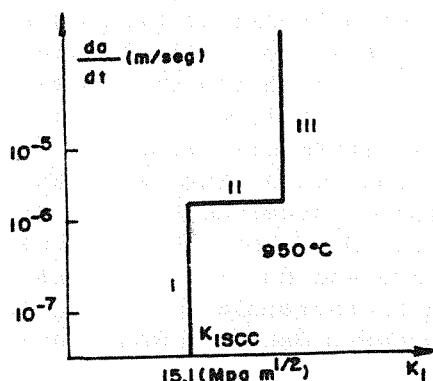


Fig.1- Curvas de comportamiento en CBT.

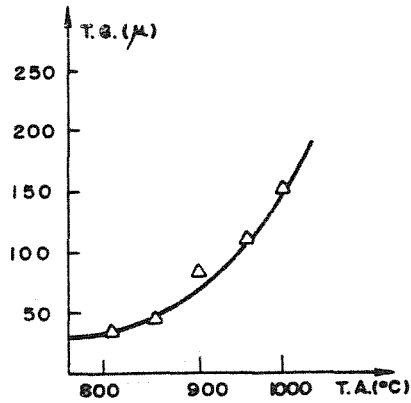


Fig. 2- Variación del tamaño de grano con la temp. de austenitización.

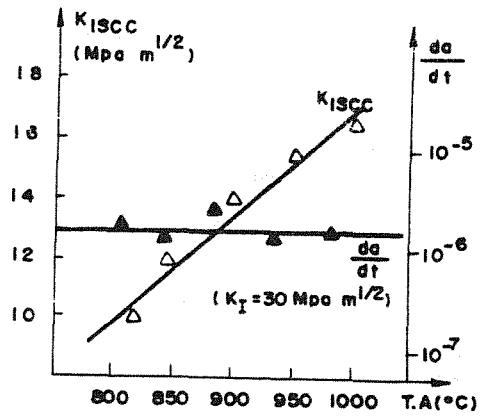


Fig. 3- Variación de los parámetros de CBT con la temp. de austenitización.

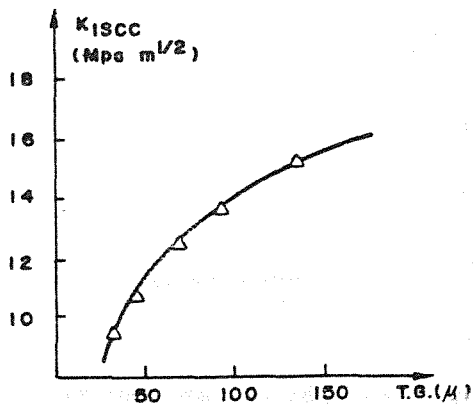


Fig. 4- Variación del  $K_{I SCC}$  con el tamaño de grano.

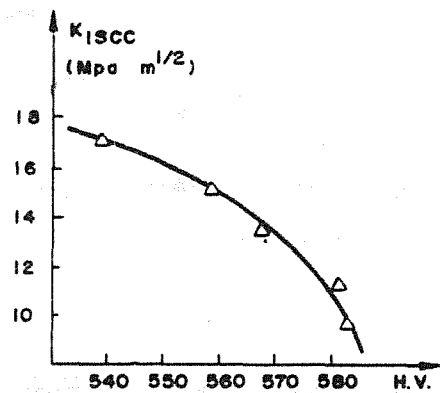


Fig. 5- Variación del  $K_{I SCC}$  con la dureza.

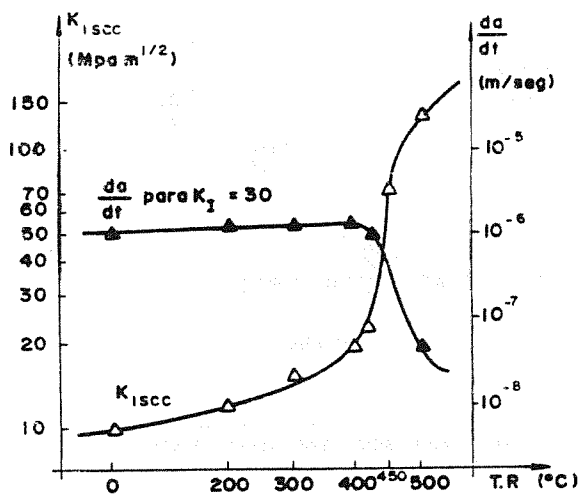


Fig.6-Variación de los parámetros de CBT con la temp.de revenido.

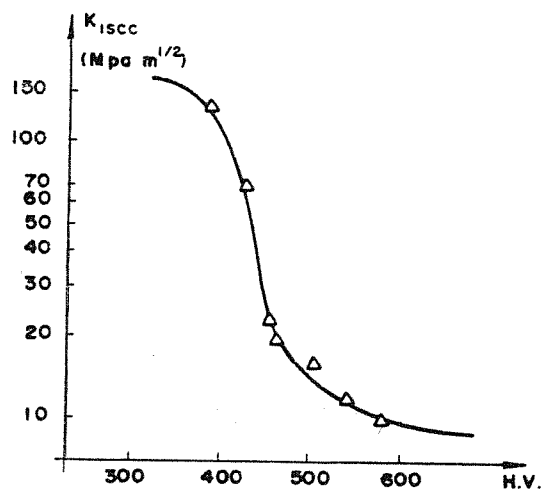


Fig.7-Variación del  $K_{Isc}$  con la dureza.

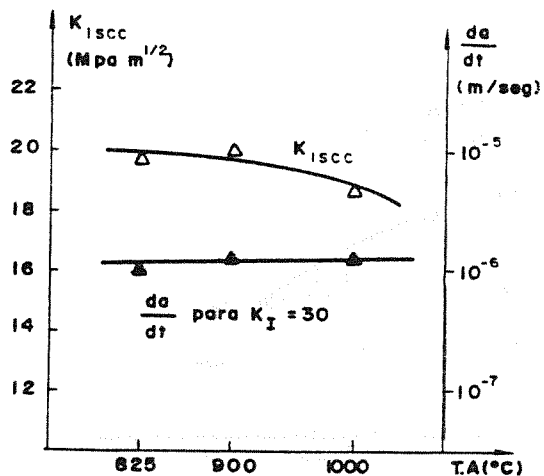


Fig.8-Variación de los parámetros de CBT con la temp.de austenit.

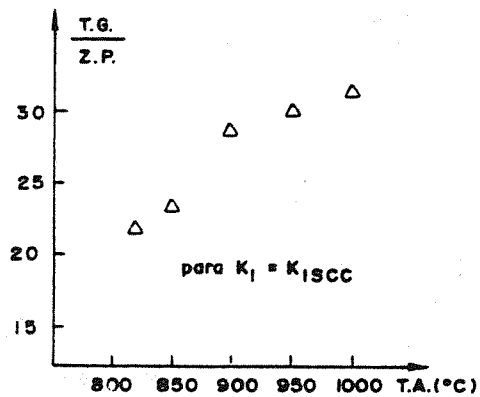


Fig.9-Variación de la relación TG/ZP con los valores de  $K_{Isc}$  (Serie A)