

COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL ACERO A515 GRADO 70**Linaza Aberásturi A., Rodríguez Ibabe J.M., Fuentes Pérez M.****CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES TECNICAS DE GUIPUZCOA (CEIT)****P^º Manuel de Lardizabal, 15 - 20080 SAN SEBASTIAN****RESUMEN**

Se ha estudiado el comportamiento a fatiga de un acero A515 Grado 70 utilizado en la construcción de recipientes a presión. Como variables a analizar se han considerado la orientación de la entalla, el nivel de procedencia en el espesor de la plancha y la relación de cargas. Las dos primeras variables no afectan a la ecuación de Paris ni a los valores del umbral. Por otra parte, a través de mediciones de cierre de grieta se ha determinado un valor efectivo del umbral comprendido entre 4 y 5 MPa \sqrt{m} . Los resultados obtenidos concuerdan con los de otros aceros de microestructura similar.

ABSTRACT

The fatigue behaviour of a pressure vessel steel A515 Grade 70 has been studied. Main parameters analysed are notch orientation, location of the specimen level on shell and load ratio. The first two variables have not influence in the Paris equation and threshold values. In the other hand, when measuring crack closure the threshold effective value spans between 4 and 5 MPa \sqrt{m} . Results are in agreement with previously reported data for similar microstructures.

1-INTRODUCCION

El presente trabajo se enmarca dentro de un proyecto más amplio consistente en el estudio del comportamiento a fatiga y fractura de un acero A515 Grado 70 utilizado en la construcción de calderas para centrales térmicas. Las condiciones de trabajo corresponden a un intervalo de temperaturas comprendido entre 20 y 360°C, encontrándose por lo tanto el acero en un rango correspondiente al palier superior de la curva tenacidad-temperatura. En esa situación la fractura frágil resulta remota pero no así el riesgo de rotura por fractura dúctil y fatiga [1]. En ambos casos la rotura se origina a partir de defectos de fabricación superficiales o asociados a soldaduras, especialmente si ocurren en regiones de baja tenacidad o baja resistencia a la propagación de grietas por fatiga.

El trabajo que se describe a continuación es una exposición de los resultados obtenidos con relación a la respuesta a fatiga que presenta el material base (estructura de suministro). A fin de tener en cuenta las posibles heterogeneidades microestructurales y la existencia de tensiones residuales se han estudiado los efectos de la orientación y situación de las probetas en las planchas conformadas. De forma similar, considerando la influencia que en aceros de microestructura similar presenta la relación de cargas en la propagación de la grieta [2,3], se ha estudiado el efecto que ésta genera tanto en la zona de Paris como en la zona del umbral. En este último caso, a fin de determinar el valor efectivo del umbral se han realizado mediciones de cierre de grieta.

2- TECNICAS EXPERIMENTALES

El material estudiado es un acero A 515 Grado 70 suministrado por la empresa Mague (Portugal) y fabricado por Creusot-Marrel (Francia). La composición química del acero es: 0,22% C, 1,21% Mn, 0,030% P, 0,35% Si y 0,004% S. El material ha sido suministrado en forma de discos de 165 mm de espesor con una geometría tal como se indica en la Fig.1.

El acero presenta una estructura ferrito-perlítica ($D_{\alpha} = 10,6 \mu\text{m}$, $D_{\text{perlita}} = 6 \mu\text{m}$, %Perlita = 22%) observándose una homogeneidad microestructural muy notable a lo largo de todo el espesor de la plancha. Las propiedades mecánicas convencionales en la dirección de laminación son $\sigma_{0,2\%} = 370 \text{ MPa}$ y $\sigma_{\text{UTS}} = 545 \text{ MPa}$.

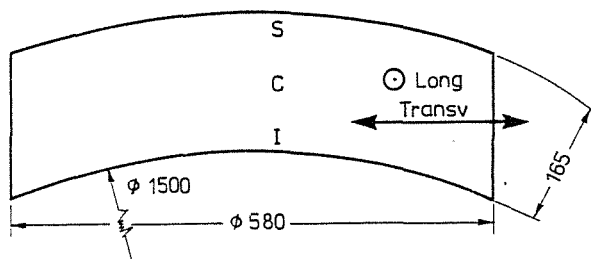


Fig. 1 Esquema de la geometría del trozo de acero utilizado para la extracción de las probetas.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina servohidráulica Instron 1342 de $\pm 100 \text{ KN}$ de capacidad dinámica, utilizando probetas CT de 12 mm de espesor y $W=50 \text{ mm}$. Para velocidades de propagación ($da/dN < 10^{-8} \text{ m/c}$), éstos se realizaron a una frecuencia de $30 \div 40 \text{ hz}$, bajo control de carga y con onda sinusoidal. Durante el transcurso del ensayo la relación de cargas se mantuvo constante, disminuyendo la amplitud de carga escalonadamente de forma manual. Cada etapa de amplitud de carga constante se mantuvo hasta lograr un crecimiento mínimo de grieta de dos veces el tamaño de la zona plástica correspondiente al escalón anterior. La velocidad de propagación de la grieta (la longitud de ésta se midió mediante un catetómetro de X20) se estimó por el método de la secante y la expresión utilizada para calcular ΔK fue la propuesta por la norma ASTM E 647-88 para probetas CT. A partir de los pares de valores $\log \Delta K - \log (da/dN)$ se realizó un ajuste por regresión lineal para las velocidades comprendidas entre 10^{-9} y 10^{-10} m/c . De la ecuación de la recta obtenida se calculó el valor de ΔK correspondiente a $(da/dN) = 10^{-10} \text{ m/ciclo}$ y se consideró igual a ΔK_{th} . Los ensayos correspondientes a velocidades de propagación superiores a 10^{-8} m/ciclo se llevaron a cabo bajo control de carga, con onda sinusoidal de amplitud constante, a una frecuencia de 30 hz. Para el cálculo de da/dN se procedió al ajuste de los pares de puntos a - N a un polinomio de 2° grado

(grupos de 7 puntos). En todo el rango de velocidades de propagación se estudiaron 3 relaciones de carga ($R = P_{\text{min}}/P_{\text{máx}}$): 0.03, 0.3 y 0.5.

Por otra parte, el cierre de grieta para valores correspondientes a la zona de umbral ($da/dN < 10^{-8} \text{ m/c}$) fue medido periódicamente por medio de un extensómetro tipo "COD" tanto en la boca de la entalla de la probeta CT como en una cara lateral en las proximidades de la punta de la grieta. Para determinar el valor de la carga de apertura, P_{op} , se procedió a aplicar una onda de baja frecuencia ($\approx 0.1 \text{ hz}$), representando gráficamente la curva carga -desplazamiento (P vs δ). Como es práctica habitual, a fin de obtener una mejor definición del punto de apertura - cambio de pendiente en la curva $P-\delta$ - se utilizó el procedimiento propuesto por Kikukawa [4] de representar la curva frente a δ' , siendo δ' la diferencia entre la medición δ realizada por el extensómetro y una señal proporcional a la carga, $\alpha.P$ ($\delta' = \delta - \alpha.P$).

Una vez ensayadas las probetas, las superficies de fractura fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido.

3. -RESULTADOS

3.1 Curvas $\Delta K - da/dN$

Los resultados obtenidos con probetas de orientación LT y TL y niveles inferior (I) y central (C) de la plancha se muestran en la Fig.2 para una $R=0.03$, pudiendo apreciarse que tanto la orientación de la entalla como el nivel de procedencia de la probeta con relación al espesor de la plancha no afectan a los valores de da/dN . Comportamientos similares se han obtenido para valores de R iguales a 0.3 y 0.5.

En la Fig. 3 se comparan, para una misma orientación, los valores de da/dN en función de R . Para $da/dN > 10^{-8} \text{ m/c}$ se aprecia una ligera diferencia entre los resultados obtenidos con $R=0.03$ y el resto de los valores. A medida que aumenta ΔK las diferencias disminuyen. Como consecuencia de dicho comportamiento y ante la posibilidad de existencia de tensiones residuales originadas en el proceso de conformado de la plancha, varias probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 500°C (1 hora y posterior enfriamiento dentro del horno en atmósfera inerte). Los resultados obtenidos revelan la falta de diferencias apreciables entre probetas con y sin tratamiento.

Para velocidades de propagación inferiores a 10^{-8} m/c la relación de cargas, R , influye apreciablemente en los valores de da/dN , correspondiendo dicha zona a la conocida como umbral de fatiga.

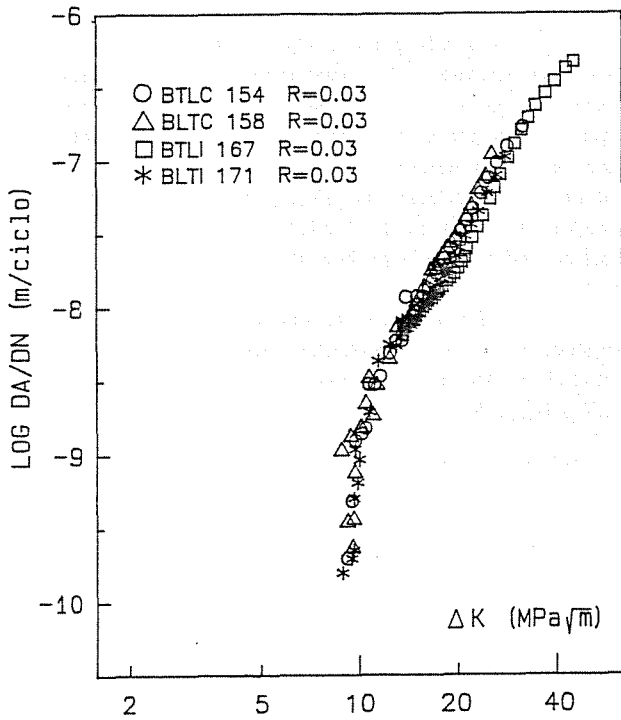


Fig. 2 Influencia de la orientación y nivel de procedencia de la probeta en la velocidad de propagación de la grieta para R = 0,03.

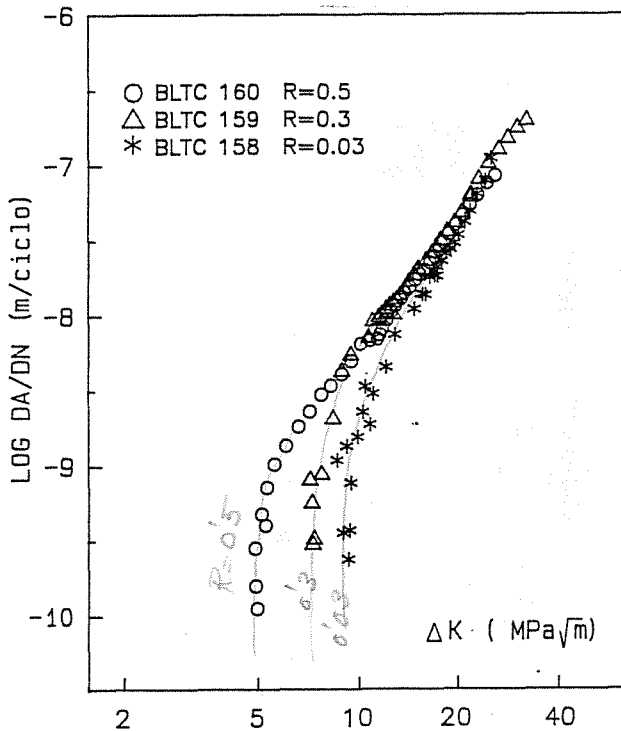


Fig. 3 Influencia de la relación de cargas en da/dN.

3.2. Ecuación de Paris ($da/dN > 10^{-8}$ m/ciclo)

Independientemente de la orientación y nivel de la probeta, todos los resultados obtenidos admiten una representación aceptable mediante la ecuación de Paris para $da/dN > 10^{-8}$ m/c ($da/dN = C(\Delta K)^m$).

Los valores de las constantes C y m se indican en la Tabla 1, así como los coeficientes de correlación obtenidos al hacer el ajuste de mínimos cuadrados. Asimismo, en la misma tabla se muestran los valores de los coeficientes de la ecuación de Paris obtenidos al realizar la media de todas las probetas ensayadas a igualdad de relación de cargas.

TABLA 1

PROBETA	R	C	m	r
BTLC 154	0,03	$2,24 \cdot 10^{-13}$	3,94	0,999
* BTLC 157		$1,23 \cdot 10^{-13}$	4,13	0,999
BLTC 158		$1,46 \cdot 10^{-13}$	4,13	0,991
BLTC 161		$1,05 \cdot 10^{-12}$	3,43	0,990
* BLTC 164		$2,27 \cdot 10^{-13}$	3,95	0,998
BTLI 167		$2,68 \cdot 10^{-13}$	3,81	0,988
BLTI 171		$2,50 \cdot 10^{-13}$	3,84	0,995
BLTI 172		$4,06 \cdot 10^{-14}$	4,53	0,996
* BLTI 173		$2,41 \cdot 10^{-13}$	3,94	0,997
Media			$2,35 \cdot 10^{-13}$	3,91
BTLC 154	0,3	$4,38 \cdot 10^{-12}$	3,05	0,997
BLTC 159		$3,76 \cdot 10^{-12}$	3,13	0,998
BTLI 165		$1,67 \cdot 10^{-12}$	3,41	0,998
BLTI 170		$3,28 \cdot 10^{-12}$	3,16	0,997
Media		$2,81 \cdot 10^{-12}$	3,22	0,996
BTLC 152	0,5	$8,85 \cdot 10^{-12}$	2,74	0,993
BLTC 160		$3,94 \cdot 10^{-12}$	3,07	0,995
Media		$5,78 \cdot 10^{-12}$	2,92	0,987

(*) Probeta tratada térmicamente

3.3. Umbral de fatiga ($da/dN < 10^{-8}$ m/c)

Los umbrales de fatiga, ΔK_{th} , en función de la relación de cargas se señalan en la Tabla 2 junto con los valores obtenidos de las constantes C y m al realizar un ajuste mediante una ecuación de tipo Paris para $da/dN < 10^{-9}$ m/c.

En cuatro probetas se ha determinado el cierre de grieta, indicándose en la Fig.4a un ejemplo de curvas carga-desplazamiento y en la Fig.4b las correspondientes gráficas $P-\delta'$ utilizadas para la determinación de P_{op} .

TABLA 2

PROBETA	R	C	m	ΔK_{th} (MPa \sqrt{m})	$\Delta K_{th\text{ef}}$ (MPa \sqrt{m})
BLTC 158	0,03	$4,27 \cdot 10^{-19}$	9,16	8,9	-
* BLTC 164		$7,81 \cdot 10^{-20}$	10,06	8,0	5,1
BLTI 171		$1,26 \cdot 10^{-24}$	14,70	8,8	-
BLTI 172		$1,64 \cdot 10^{-21}$	11,44	8,8	5,3
* BLTI 173		$1,66 \cdot 10^{-20}$	10,79	8,1	4,9
* BTLC 157		$2,69 \cdot 10^{-16}$	6,16	8,0	4,3
BTLC 155	0,3	$2,51 \cdot 10^{-19}$	11,00	6,1	-
BLTC 159		$2,45 \cdot 10^{-14}$	4,92	5,4	-
BLTI 170		$1,99 \cdot 10^{-29}$	2,22	7,0	-
BTLC 152	0,5	$1,00 \cdot 10^{-13}$	5,50	3,5	-
BLTC 160		$1,26 \cdot 10^{-20}$	14,04	5,1	-

(*) Probeta tratada térmicamente

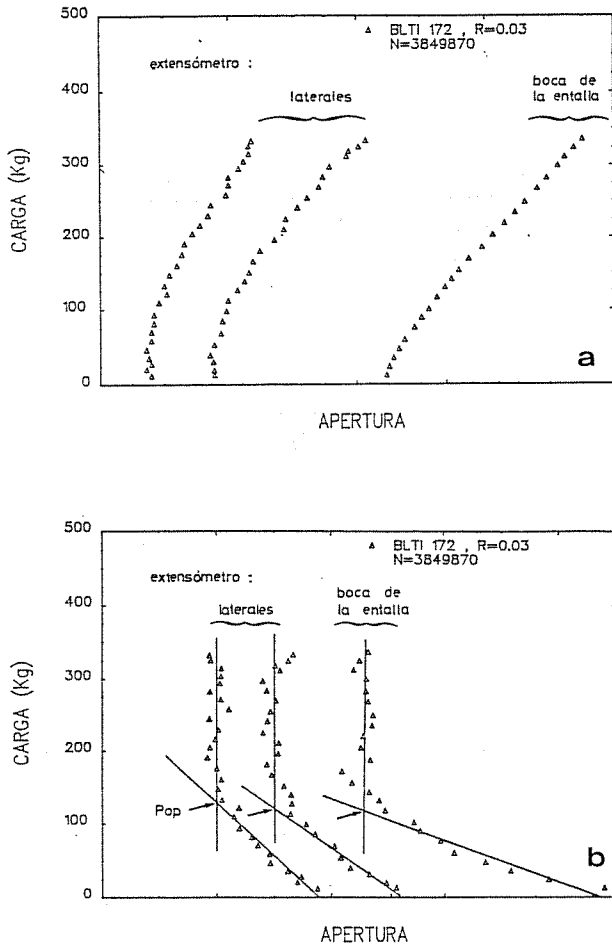


Fig. 4 Curvas (a) carga-desplazamiento, P- δ y (b) carga-desplazamiento modificado P- δ'

La diferencia entre los valores de apertura medidos situando el extensómetro en las diferentes posiciones es en todos los casos inferior al 10%, por lo que se optó por el procedimiento general de promediar los valores. A medida que el valor de ΔK se aproxima al umbral, la relación $K_{op}/K_{m\acute{a}x}$ tiende a ser cada vez mayor, tal como queda señalado en la Fig.5 (resultados correspondientes a la probeta BLTC 164).

En la Fig.6 se muestra un ejemplo de la variación de los resultados para $da/dN < 10^{-8}$ al modificar ΔK por el correspondiente valor efectivo $\Delta K_{ef} = K_{m\acute{a}x} - K_{op}$.

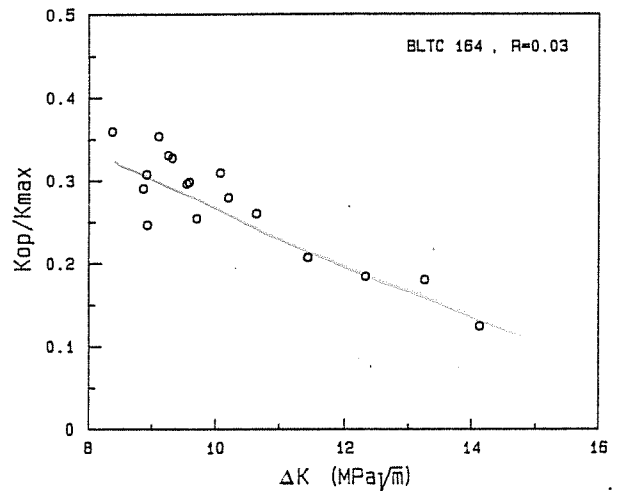


Fig. 5 Variación de $K_{op}/K_{m\acute{a}x}$ en función de ΔK .

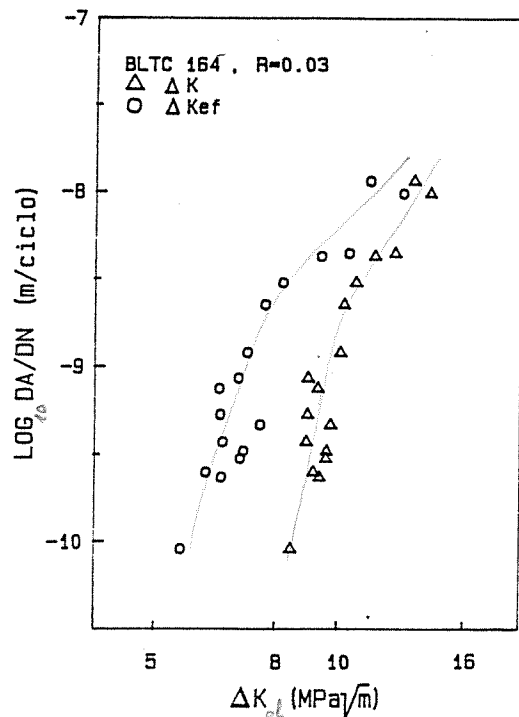


Fig. 6 Representación de da/dN en función de ΔK y ΔK_{ef} para una misma probeta.

*intergranular
zona, 10-17µm*

3.4 Fractografía

El análisis de las superficies de fractura de las probetas ensayadas pone de manifiesto que no existen diferencias significativas entre muestras con diferente orientación o nivel con relación al espesor. Las diferencias más apreciables se observan dentro de cada probeta entre las zonas próximas al umbral y las correspondientes a la ecuación de Paris.

Para velocidades de propagación inferiores a 10^{-8} m/c, la superficie de fractura se caracteriza por la presencia de islotes de óxidos cuya densidad disminuye al aumentar la relación de cargas. Con objeto de eliminar los óxidos, se procedió a adherir en las superficies réplicas de extracción humedeciendo las mismas en acetona. Posteriormente, la réplica era arrancada de la superficie arrastrando partículas de óxidos y en consecuencia permitiendo disponer de unas superficies en buenas condiciones para su observación. El aspecto de la fractura es fundamentalmente plano, apareciendo con relativa frecuencia zonas intergranulares (Fig.7).

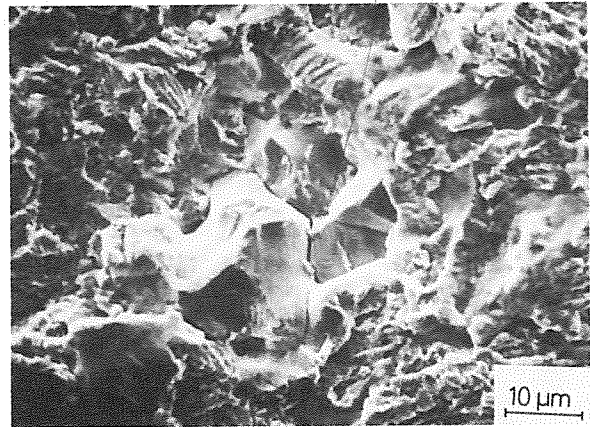


Fig. 7 Zona fracturada intergranularmente para velocidades de propagación próximas al umbral. (Probeta BLTC 158, R=0.03, $da/dN=2.10^{-10}$ m/c

En la zona de Paris la fractura es totalmente uniforme destacando la aparición de estrias claramente identificables a elevadas velocidades de propagación (Fig.8)

4 -DISCUSION

4.1 Zona de Paris

De los resultados obtenidos se constata que la orientación de la entalla TL ó LT no afecta a la velocidad de propagación de la grieta. Otro tanto sucede con los niveles C e I de procedencia de la probeta en el espesor de la plancha. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en la caracterización microestructural del material y con las observaciones realizadas en el microscopio electrónico de barrido, en el que los aspectos de las superficies de fractura son semejantes en todos los casos.

Con relación a la influencia de la relación de cargas, los resultados obtenidos muestran un diferente comportamiento entre la probeta ensayada con R=0,03 y las ensayadas con R=0,3. Esta diferencia apreciable en el rango $10^{-8} < da/dN < 10^{-7}$ m/c hace pensar en la posible existencia de un fenómeno de cierre de grieta. Comportamientos similares han sido obtenidos también con otros aceros con estructuras ferrito-perlíticas [2-3].

La banda que abarca los límites (95% de confianza) extremos de todos los resultados obtenidos se representa en la Fig. 9 , en la que además se señalan los resultados publicados por otros autores con aceros con estructuras ferrito-perlíticas [2-8]. La banda obtenida con el acero A515 G70 queda inscrita dentro de la dispersión de resultados publicados en la bibliografía, con-

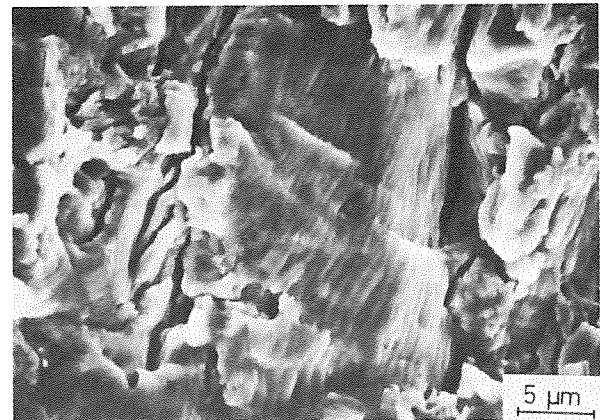


Fig. 8 Detalle de la presencia de estrias de fatiga en la zona de Paris. (Probeta BLTI 173, R=0.03, $da/dN=4.6.10^{-7}$ m/c, $\Delta K=40$ MPa \sqrt{m})

statándose una vez más que el predominio de mecanismos propios de la mecánica del continuo relega a un segundo plano los aspectos microestructurales del material, siempre y cuando no surjan modos estáticos de fractura o fenómenos de cierre de grieta originados por fuertes heterogeneidades microestructurales).

4.2 Umbral de fatiga

La notable influencia que se aprecia de la relación de cargas sobre el umbral puede adecuarse a una relación lineal:

$$\Delta K_{th} = 8,7 - 8,7.R \quad 0 \leq R \leq 0,5$$

El comportamiento observado es generalizado para la mayoría de los materiales y corresponde a un efecto de cierre de grieta inducido por la acción de al-

gundo de los mecanismos propuestos por Suresh y Ritchie [9]. La presencia de óxidos y de facetas de cortadura en la superficie de fractura para velocidades de propagación próximas al umbral confirma este hecho. Los valores de ΔK_{thef} medidos resultan ser muy similares a los de ΔK_{th} correspondientes a $R = 0,5$, lo cual podría conducir a la opinión de que para $R = 0,5$ la componente de cierre de grieta es mínima (la presencia de óxidos para esa relación de cargas resulta ser prácticamente despreciable). Dicha afirmación implica la

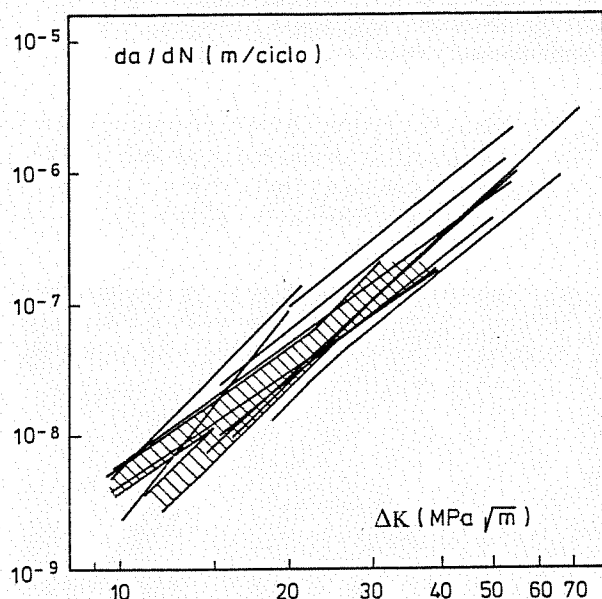


Fig. 9 Comparación de los resultados obtenidos con el acero A515 G70 con otros publicados en la bibliografía para aceros ferrito-perlíticos [2-8].

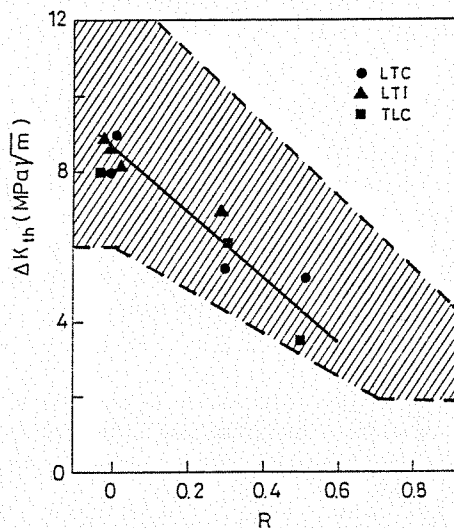


Fig. 10 Variación del umbral en función de R , señalándose la banda de comportamiento obtenida con aceros estructurales [10].

existencia de un valor de umbral efectivo, por lo tanto independiente de R , comprendido entre 4 y 5 $MPa\sqrt{m}$.

En la Fig 10 junto con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se indica el intervalo de valores correspondiente a umbrales medidos en aceros al carbono y aceros de baja aleación con límites elásticos inferiores a 620 MPa [10]. Puede apreciarse que en todo el rango de R , los umbrales determinados con el acero A515 G70 tienden a situarse en la zona inferior del intervalo. Este comportamiento pone de manifiesto que, excepto la presencia de óxidos, en el acero estudiado no tienen lugar otros mecanismos que favorezcan el cierre de grieta y en consecuencia conduzcan a valores más elevados de ΔK_{th} .

5 - CONCLUSIONES

- El acero A515 G70 analizado presenta un comportamiento homogéneo desde el punto de vista de propagación de grietas por fatiga.

- Los coeficientes de la ecuación de Paris son diferentes para $R = 0$ y $R \geq 0,3$. En ambos casos los resultados son similares a los obtenidos para otros aceros con estructuras ferrito-perlíticas independientemente del contenido de carbono.

- El umbral de fatiga depende de R a través de mecanismos tipo cierre de grieta. El valor efectivo del umbral oscila entre 4 y 5 $MPa\sqrt{m}$.

7- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación CECA n° 7210/KE/933. Uno de los autores (A.L.A.) agradece al Gobierno Vasco la concesión de una beca de investigación.

7 REFERENCIAS

1. Branco, C.M., Rosa, L.G., Int. Rep., CEMUL, Lisboa, 1987.
2. Rodriguez, J.M., Gil, J., Fuentes, M., Frac. Prev. En. Transport Systems, II, p.465, 1984.
3. Beevers, C.J., Cooke, R.J., Knott, J.F., Ritchie, R.O., Met. Sci., 2, p.119, 1975.
4. Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K., Proc. 2nd Int. Conf. Mechanical Behavior of Materials, Boston, p. 254, 1976.
5. Barsom, J.M., J. Eng. Ind., ASME Trans, Series B, 93, p.1190, 1971.
6. Bowman, M.D., Munse, W.H., Welding J., 62, p.36S, 1983.
7. Castagna, M., Venturelli, T., Venzi, S., Brazzoduro, G., Montechiaro, F., Martini, R., Proc. 4th Int. Wheelset Congr., 3, p.108, 1972.
8. Evans, P.R.V., Owen, N.B., Hopkins, B.E., J. Iron Steel Inst., 208, p.560, 1970.
9. Suresh, S., Ritchie, R.O., Metall. Trans, 13A, p.1627, 1982.
10. Lindley, T.C., Richards, C.E., Fatigue Thresholds, EMAS, II, p.1087, 1982.