

LIMITACIONES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO DEL WEAKEST LINK EN LA FRACTURA FRÁGIL DE ACEROS MICROALEADOS

M.A. Linaza, J.M. Rodríguez y J.J. Urcola

Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT) y
Escuela Superior de Ingenieros Industriales
P^o. Manuel de Lardizabal, 15, 20009 San Sebastián (País Vasco)

Resumen. En este trabajo se analiza la influencia que la temperatura, estado de tensiones y microestructura ejercen en los mecanismos de fractura frágil de tres aceros microaleados de forja. Para ello, se han realizado ensayos de tenacidad a -196, -105 y 20°C utilizando probetas CT preagrietadas por fatiga. Las diferencias de comportamiento observadas pueden explicarse teniendo en cuenta el estado de tensiones en las proximidades de la punta de la grieta y su relación con los parámetros microestructurales que intervienen en el inicio y propagación de la fractura frágil.

Abstract. In this work the influence of temperature, stress state and microstructure in the brittle fracture micromechanisms of three microalloyed forging steels is analysed. Fatigue precracked CT specimens have been tested at -196, -105 and 20°C. The different behaviours observed can be explained taking into account the relationship between the stress state near the crack tip and the interaction with microstructural parameters which take part in the nucleation and propagation of cleavage fracture.

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de los modelos que se han desarrollado para analizar y predecir el comportamiento frágil de las estructuras BCC de los aceros consideran que la fractura frágil se inicia en un único punto del material de acuerdo con la teoría del "weakest link". Estos modelos toman como base física la constatación experimental, corroborada en una gran cantidad de diferentes microestructuras, de que la fractura de probetas ensayadas a temperaturas correspondientes a la zona frágil o a la zona de transición frágil-dúctil tiene lugar siempre a partir de un único inicio.

Los estudios experimentales en los que se basan la mayoría de los modelos han tenido como punto de referencia la realización de ensayos con probetas con entalla roma. En estos casos, los estudios fractográficos corroboran la vigencia del "weakest link". Otro tanto sucede en la zona de transición frágil-dúctil con

probetas preagrietadas. En este último caso, la propagación estable dúctil de la grieta modifica de una forma notable el estado de tensiones y deformaciones que hubiese correspondido a una grieta con punta aguda.

Sin embargo, cuando el estudio de la fractura frágil se realiza en la zona del "palier" inferior con probetas preagrietadas, existe evidencia de que la fractura frágil no se corresponde con el modelo del "weakest link". En las ref. [1, 2] se expusieron resultados obtenidos con probetas CT ensayadas a 77K en las que se demostraba que la fractura frágil tenía lugar simultáneamente en diferentes puntos del frente de la grieta. En este trabajo se ha ampliado dicho estudio considerando dos nuevas situaciones: la primera de ellas a -105°C (zona totalmente frágil) y la segunda a temperatura ambiente (20°C), que en los aceros estudiados corresponde a la zona de la transición frágil-dúctil.

2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Las composiciones químicas de los aceros microaleados de forja (suministrados por GSB, Azkoitia) se detallan en la Tabla 1. Los tres aceros se han estudiado en condiciones de suministro (microestructura de laminación convencional en caliente y posterior enfriamiento al aire) con una estructura ferrítico-perlítica. Las características microestructurales más relevantes se señalan en la referencia [3].

Tabla 1. Composición química de los aceros microaleados y características microestructurales

Acero	C	Mn	V	Ti	N (ppm)	f _α (%)	D _α (μm)
Ti-V	.37	1.45	.11	.015	162	38	5.5
Ti bajo	.35	1.56	-	.028	89	26	5.3
Ti alto	.23	1.72	-	.044	75	-	-

Para la medida de la tenacidad se han utilizado probetas compactas CT (espesor B=18 mm, y profundidad W=36 mm) ensayadas a las temperaturas de -196°C (nitrógeno líquido), -105°C (etanol fundente) y 20°C. Para el caso de los ensayos a realizar a -196°C, el preagrietamiento previo por fatiga se realizó a temperatura ambiente, terminando con un valor de K_{max} próximo al umbral de fatiga de los aceros (~10 MPa√m). Mediante este procedimiento se evita que la deformación plástica originada en el preagrietamiento influya en la medida de la tenacidad a bajas temperaturas (efecto del "warm prestressing").

Con objeto de caracterizar las propiedades mecánicas convencionales, se procedió a realizar ensayos de tracción a las tres temperaturas anteriormente citadas. Para finalizar, se llevó a cabo el estudio fractográfico de todas las probetas CT ensayadas, identificando en cada caso las zonas de inicio de la fractura frágil.

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de tracción obtenidos para cada acero se indican en la Tabla 2, conjuntamente con el coeficiente de endurecimiento por deformación de la ecuación de Hollomon. Puede apreciarse que, como es habitual en los aceros, a medida que aumenta la temperatura se produce una disminución importante del límite elástico y de la resistencia a la tracción. Con relación al coeficiente n, el comportamiento del mismo con la temperatura varía de un acero a otro.

Los ensayos de tenacidad se resumen en la Tabla 3. En dicha tabla también se han introducido el tamaño de la

Tabla 2. Propiedades mecánicas convencionales

Acero	Temp. (°C)	σ _{0.2%} (MPa)	R.T. (MPa)	n
Ti -V	-196	1138	1219	0.105
	-105	805	1077	0.176
	20	590	875	0.179
Ti bajo	-196	1053	1194	0.121
	-105	627	931	0.262
	20	440	740	0.262
Ti alto	-196	932	1099	0.117
	-105	619	875	0.184
	20	430	691	0.138

zona plástica en la fase final de preagrietamiento por fatiga y el tamaño correspondiente al momento de la fractura de la probeta. Como puede comprobarse, el tamaño de la zona afectada por la fatiga es muy pequeño, pudiendo despreciarse el mismo al compararlo con la zona plástica en el instante de la fractura.

A medida que aumenta la temperatura se observa un incremento de la tenacidad, de tal forma que, para la temperatura de 20°C, los resultados obtenidos no cumplen las condiciones del ensayo K_{Ic} y, en consecuencia, se ha tomado K_c (según el procedimiento ESIS) como parámetro representativo de la tenacidad.

El estudio fractográfico pone de manifiesto que la nucleación de la fractura frágil tiene lugar de forma similar a las tres temperaturas ensayadas. Como ya se expuso en una publicación previa [1], en el caso de las probetas ensayadas a 77K la fractura frágil tiene lugar a través de la activación simultánea de un elevado número de núcleos de fractura muy próximos al frente de fatiga o situados en el propio borde. En una misma probeta, el número de puntos en los que se ha iniciado la fractura frágil es notablemente elevado (entre 12 y 16 zonas diferentes en cada probeta). En algunos casos el inicio está relacionado con la rotura de una partícula gruesa de TiN, pero en otros no ha sido posible identificar ningún parámetro microestructural singular.

Con relación a los ensayos realizados a -105°C, la fractura se caracteriza, desde el punto de vista macroscópico, por presentar un aspecto plano muy uniforme con carencia de marcas macroscópicas ("river marks"). A más aumentos, se constata que la fractura se ha iniciado a partir de un único punto. En la Fig. 1 puede apreciarse el caso de una probeta (acero) ensayada a -105°C y con el inicio de la fractura frágil muy próximo al borde la fatiga. La nucleación de la fractura frágil ha tenido lugar a través de la rotura de una partícula de TiN (ver Fig. 1b). Este tipo de comportamiento se reproduce en todas las probetas ensayadas a esa temperatura.

Tabla 3. Tenacidad de los aceros microaleados a -196, -105 y 20°C.

Acero	σ_F (MPa)	Temp. (°C)	$(K_{max})_{fat}$ (MPa√m)	$(r_p)_{fat}$ (*) (μm)	K_{Ic} (MPa√m)	K_c (MPa√m)	$(r_p)_{Kc}$ (μm)
Ti-V	2109	-196	11.5	16.3	20.3		50.6
			12.8	20.1	21.4		56.3
		-105	14.6	52.4	32		251.5
			10.8	28.6	37		336.2
		20	19.4	172.6		73	2370.2
			21.1	203.7		67	1931.7
Ti bajo	2148	-196	11.1	17.7	23.4		78.6
			10.8	16.7	22.6		73.3
		-105	8.5	29.2	33.3		448.9
			10.0	40.5	35.1		498.8
		20	22.0	398		96.5	2959.5
			24.0	473.5		121.5	2486.8
Ti alto	1829	-196	11.0	22.2	25.2		116.4
			11.2	23.0	25.6		120.1
		-105	9.7	39.1	40.5		681.3
			9.7	39.1	36.9		565.6
		20	19.4	324.0		151	2510.0
			23.3	467.3		132	2996.3

$$* r_p = (1/2\pi) (K/\sigma_{0.2\%})^2$$

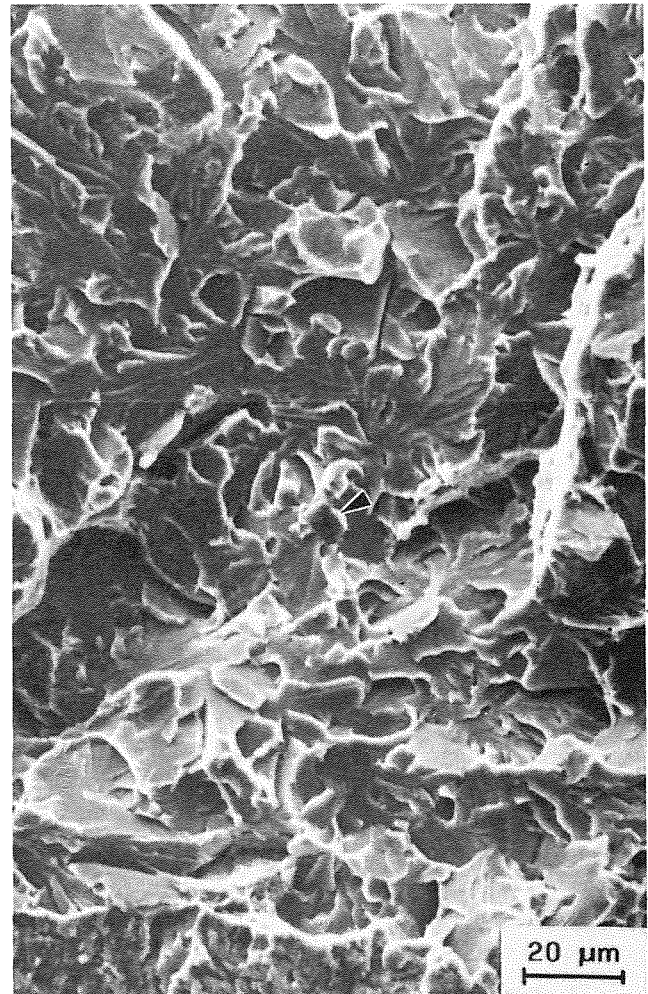
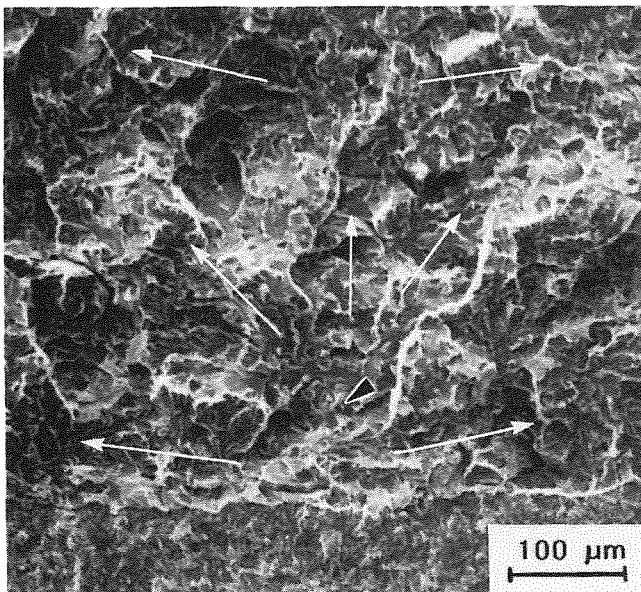


Fig. 1. Fractura frágil a -105°C (acero al Ti alto), mostrando un único inicio a partir de una partícula de TiN

Por otra parte, además de tener un único origen, la fractura a -105°C se caracteriza por propagarse fundamentalmente de forma paralela al frente de fatiga. En efecto, a partir del punto de iniciación, la propagación frágil se dirige hacia las dos caras laterales de la probeta de forma prácticamente paralela al frente de fatiga, con un crecimiento muy limitado en la dirección perpendicular al frente de fatiga. Para finalizar, a temperatura ambiente, tras una ligera propagación dúctil (inferior en todos los casos a 0.2 mm), el comportamiento de los tres aceros es frágil. Desde el punto de vista macroscópico, el inicio frágil queda claramente definido, pudiendo a más aumentos identificarse la partícula de TiN responsable del desencadenamiento de la fractura frágil. A diferencia de lo que ocurría a -105°C , la propagación frágil tiene lugar en todas las direcciones (Fig. 2).

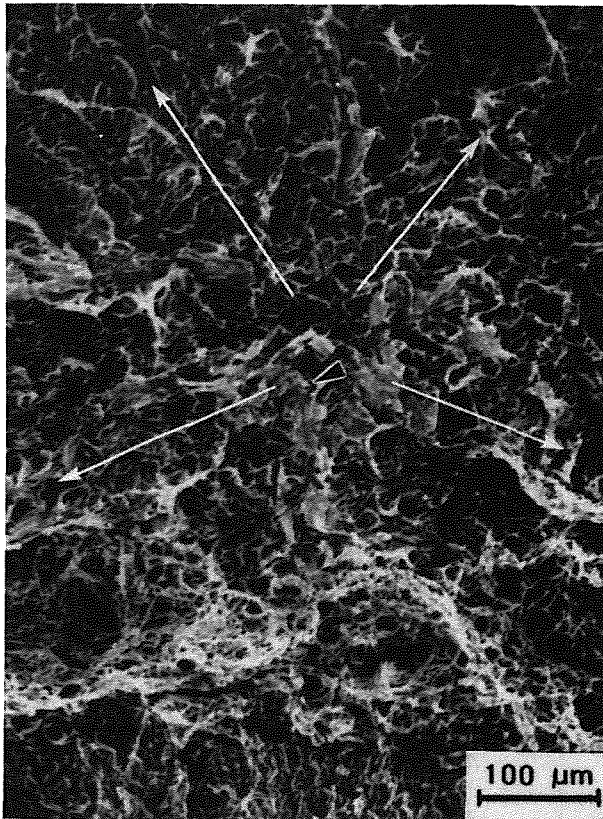


Fig. 2. Fractura frágil a 20°C iniciada en un único punto después de una cierta propagación dúctil (acero Ti alto). La propagación frágil tiene lugar a partir del punto inicial en todas las direcciones.

4. DISCUSIÓN

El estudio realizado con los tres aceros a 77K mostró que el inicio de fractura frágil era múltiple y que no se correspondía con el criterio del "weakest link". Por otra parte, mediante el análisis fractográfico se evidenció que en la mayoría de los casos los inicios no se podían correlacionar con un parámetro microestructural

determinado. Este comportamiento se analizó considerando la relación existente entre la distribución de tensiones en la punta de la grieta y el tamaño de grano de cada material. Teniendo en cuenta que para que la fractura frágil se active es necesario que la tensión actuante supere el valor de la tensión crítica de exfoliación σ_F , a 77K en los tres aceros considerados eso sólo se satisface en una zona muy estrecha ($\sim 20 \mu\text{m}$ para los aceros al Ti-V y al Ti bajo y $\sim 30 \mu\text{m}$ para el acero al Ti alto) situada en las proximidades de la punta de la grieta. En definitiva, la condición de tensión $\sigma \geq \sigma_F$ sólo se cumple en un volumen de material muy restringido. Como consecuencia de esa situación, se comprobó que en la propagación de microgrietas, al disminuir la tensión actuante, éstas podían ser detenidas por juntas de grano, comportamiento que no sucedía en el caso de probetas con entalla roma ensayadas a la misma temperatura [2].

A -105°C el comportamiento difiere del observado a 77K. La diferencia fundamental reside en el hecho de que la fractura frágil ha tenido lugar siempre a partir de un único inicio (de acuerdo con el criterio del weakest link). Además, dicho inicio se encuentra relacionado con la rotura de una partícula de TiN. Para finalizar, si bien a 20°C el inicio también es único y a partir de una partícula de TiN, macroscópicamente la dirección de la propagación de la grieta difiere apreciablemente.

A modo de resumen, en la Fig. 3 se muestra un esquema de la propagación frágil de la grieta a las tres temperaturas ensayadas: la característica fundamental a -196°C (77K) es la formación de múltiples inicios que se propagan fundamentalmente de forma paralela al frente de fatiga; a -105°C el inicio es único, siendo la propagación predominantemente paralela al frente de la grieta; a 20°C , en cambio a partir del estallido principal único, la propagación de la grieta tiene lugar en todas las direcciones. Este comportamiento se reproduce de forma similar en los tres aceros y no puede atribuirse a cambios microestructurales acaecidos en el material: la microestructura y, fundamentalmente, el elemento nucleante (las partículas de TiN) de la fractura frágil ha permanecido constante a las tres temperaturas de ensayo.

Por lo tanto, la distinta respuesta del material debe analizarse a través de la variación del límite elástico y del coeficiente de endurecimiento por deformación con la temperatura (ver Tabla 2). Como consecuencia de dicho cambio, la distribución de tensiones en las proximidades de la punta de la grieta varía de forma notable y su interacción con los parámetros microestructurales controlantes del proceso frágil es totalmente diferente de una temperatura a otra.

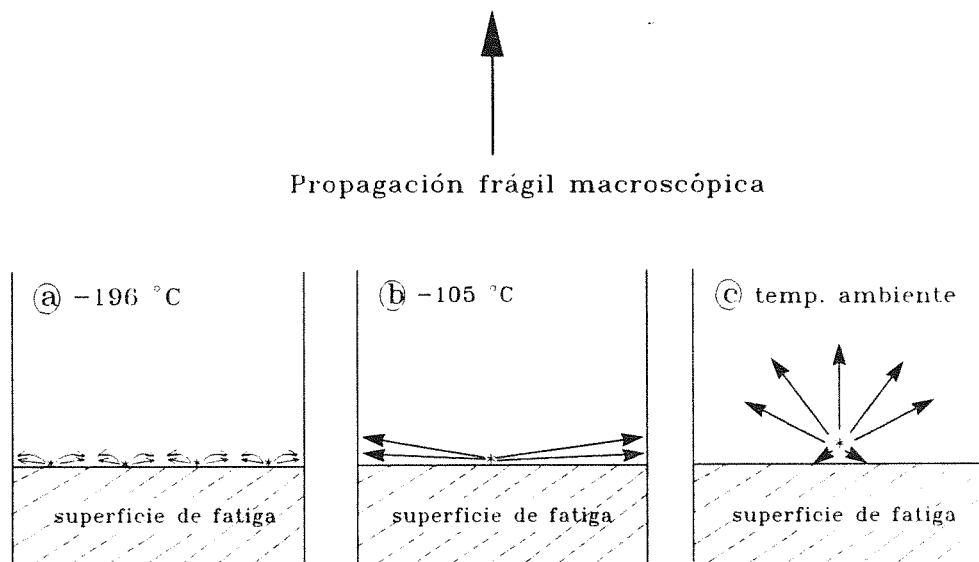


Fig. 3. Esquema representando los tres tipos de propagación frágil en función de la temperatura en probetas preagrietadas por fatiga.

En la Fig. 4 se ha representado la distribución de la tensión tractiva, en el instante correspondiente a la fractura frágil, en función de la distancia a la punta de la grieta (sin tener en cuenta la zona afectada por el enromamiento y considerando la expresión analítica propuesta por Schwalbe [4]) para las temperaturas de -196 y de -105°C y para los aceros al Ti-V y al Ti alto. En la misma gráfica se ha representado también el valor de la tensión crítica de fractura σ_F correspondiente a cada acero y que ha sido determinada experimentalmente a 77K [5].

Para la temperatura de -105°C se han considerado los mismos valores de σ_F , siguiendo el criterio habitual de que dicha tensión se mantiene constante con la temperatura [6]. En ambos aceros (y otro tanto sucede con el acero al Ti bajo) a la temperatura de 77K la zona sometida a una tensión superior a la crítica de fractura frágil es muy pequeña y, tal como se expuso anteriormente, la rápida caída de la tensión motiva la formación de inicios múltiples y el crecimiento paralelo al frente de la grieta. A la temperatura de -105°C el aumento de la tenacidad (ver Tabla 3) y la disminución del límite elástico (Tabla 2) conduce a que la zona de material sometida a una tensión superior a la crítica de exfoliación sea aproximadamente el doble de la existente a 77K . Por otra parte, dicha distancia aumenta de forma apreciable si en vez de considerar la tensión de exfoliación macroscópica se toma el valor determinado experimentalmente de la tensión de fractura local $\sigma_{F^*} \approx 0.9\sigma_F$.

Comparando este hecho con el estudio fractográfico se deduce que a -105°C la zona sometida a una tensión superior a la crítica de fractura ha adquirido la

dimensión suficiente para que una vez nucleada la microgrieta en una partícula de TiN, ésta pueda progresar a través de diferentes juntas de grano. Sin embargo, debido a que la zona afectada es estrecha, la propagación de la grieta tiene lugar de forma preferente en una dirección prácticamente paralela a la del frente de fatiga, por la caída brusca que experimenta la tensión en la dirección perpendicular. En cambio, a temperatura ambiente, la zona en la que se supera la tensión crítica de fractura es notablemente más amplia y, en consecuencia, el crecimiento tiene lugar indistintamente en todas las direcciones, tal como se representó en el esquema de la Fig. 3.

Por otra parte, en cortes de secciones longitudinales de las probetas ensayadas se aprecia que a -105°C existe una gran cantidad de microgrietas paradas en juntas de grano en las proximidades de las superficies de fractura. Ello pone de manifiesto que una vez nucleada la microgrieta, debido a la rápida caída de la tensión macroscópica, si no existe en sus proximidades una serie de planos de exfoliación adecuadamente orientados, puede quedar detenida y se enromarse.

En definitiva, en los tres aceros microaleados estudiados, a diferencia de lo que sucede a -196°C , tanto a -105°C como a 20°C , la fractura frágil se rige a través del criterio del weakest link, iniciándose la misma mediante la rotura de una partícula de TiN. Sin embargo, debido a la distribución de tensiones en la punta de la grieta, desde el punto de vista macroscópico, la propagación de la grieta es diferente.

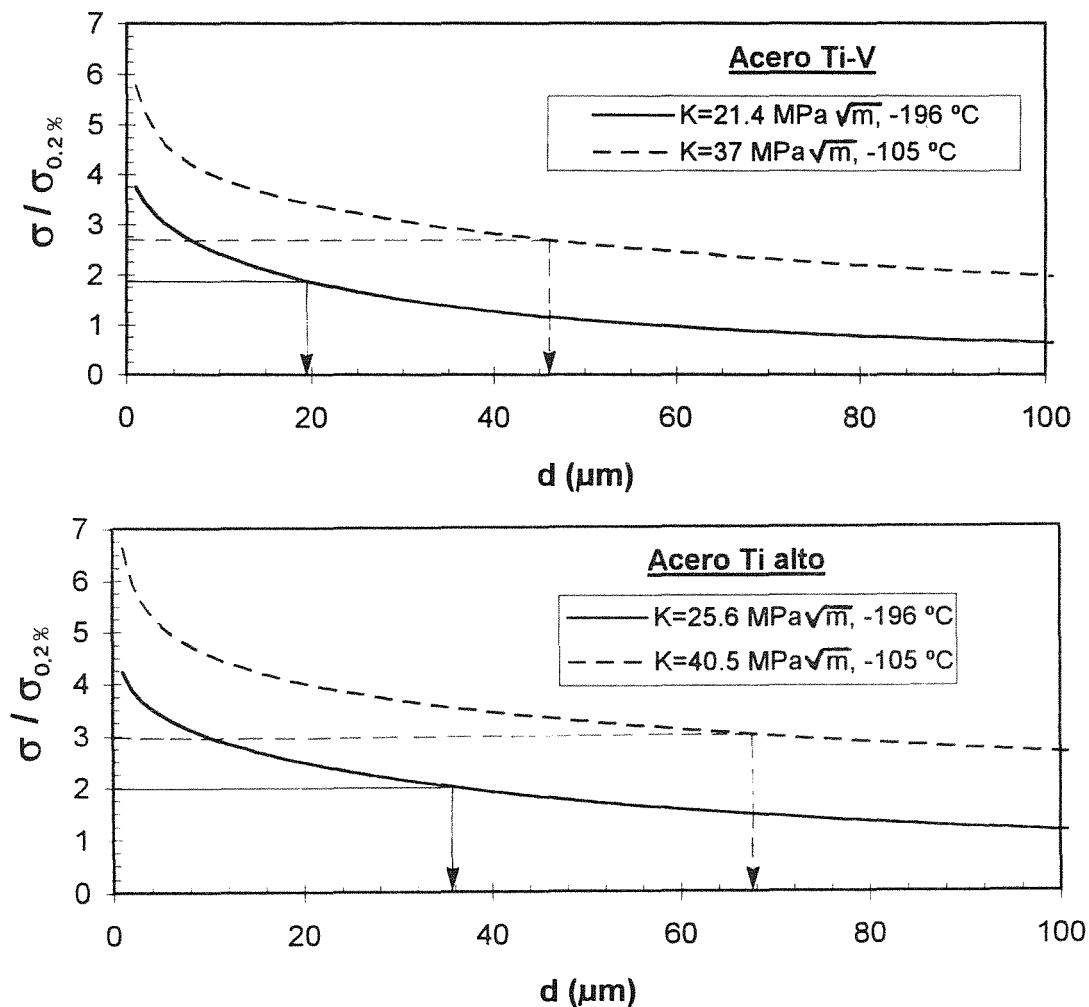


Fig. 4. Distribuciones de tensiones en las proximidades de la punta de la grieta a -196 y a -105°C en el acero al Ti-V y en el acero al Ti alto. En cada curva se ha representado la relación $\sigma_F / \sigma_{0.2\%}$ correspondiente a dicha temperatura.

5. CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que para unos parámetros microestructurales constantes, la distribución de tensiones en la punta de la grieta determina la forma en la que tiene lugar la propagación de la fractura frágil.
- A 77K , la combinación parámetros microestructurales - distribución de tensiones da lugar a la activación de la fractura frágil a partir de múltiples inicios interconectados.
- A -105°C y a 20°C el inicio es único y se ha nucleado a partir de la rotura de una partícula de TiN. Sin embargo, como consecuencia de la distribución de tensiones, el avance de la fractura hacia el interior de la probeta se encuentra más dificultado a -105°C

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a GSB Acero el haber suministrado el material utilizado en el trabajo.

7. REFERENCIAS

[1] Linaza, M.A., Rodriguez, J.M. y Urcola, J.J., Int. Journ. of Fracture, **70**, R3-R10 (1995).
 [2] Linaza, M.A. Rodriguez, J.M. y Urcola, J.J., Anales de Mecánica de la Fractura, **12**, 151-156 (1995).
 [3] Linaza, M.A., Romero, J.L., Rodriguez, J.M. y Urcola, J.J., Script. Met. and Mat., **29**, 451-456 (1993).
 [4] Schwalbe, K.H., Trans. of the ASM, 186-188 (1977).
 [5] Linaza, M.A., Romero, J.L., Rodriguez, J.M. y Urcola, J.J., Script. Met. and Mat., **32**, 395-400 (1995).
 [6] Bowen, P. Druce, S.G. y Knott, J.F., Acta Metall., **34**, 1121-1131 (1986).