

# MEDIDA LOCAL DE LA DEFORMACION CRITICA NECESARIA PARA EL INICIO DE LA PROPAGACION DUCTIL DE GRIETAS EN UN ACERO A533B-1.

*J.L. Viviente Solé, J.M. Rodríguez Ibabe, A. Martín Meizoso, J. Gil Sevillano y M. Fuentes Pérez.*

CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa),  
Bº Ibaeta, s/n, 20009-SAN SEBASTIAN

La fractura dúctil tiene lugar por nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades surgidas por descohesión de inclusiones ó segundas fases. El cambio de forma desde el núcleo inicial hasta la cavidad final es relacionable con  $\bar{\epsilon}_f$  y  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ . En esta comunicación se presentan correlaciones entre  $\bar{\epsilon}_f$  y diferentes parámetros geométricos de los alvéolos en probetas de acero A533B-1. Las correlaciones se pueden usar para determinar indirectamente la deformación local en la zona de inicio de propagación dúctil de grietas en el mismo acero.

*The ductile fracture involves nucleation, growth and coalescence of voids by decohesion of inclusions or second phase particles. The shape change from the initial nucleus to the final void is related to  $\bar{\epsilon}_f$  and  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ . In this communication relations between  $\bar{\epsilon}_f$  and different geometric parameters of the voids in A533B-1 steel specimens are presented. The correlations permit an indirect estimation in the same steel of the local deformation in the starting zone of ductile crack propagation.*

## 1.- INTRODUCCION

La fractura dúctil tiene lugar como consecuencia de un proceso de nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades surgidas a partir de la descohesión o fractura de inclusiones y partículas de segunda fase, caracterizándose las superficies de fractura por encontrarse tapizadas de alvéolos.

Para un estado hidrostático de tensiones dado,  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ , tanto la nucleación como el crecimiento de las cavidades están relacionados con la deformación plástica equivalente, por lo que existe una deformación equivalente crítica para que ocurra la fractura dúctil,  $\bar{\epsilon}_f$ , función del estado hidrostático de tensiones.

De entre los modelos que tienen en cuenta la influencia de la deformación plástica y del estado de triaxialidad de tensiones sobre el crecimiento de huecos destaca el desarrollado por Rice y Tracey /1/. Dichos autores proponen la siguiente expresión de la velocidad de crecimiento de huecos esféricos no teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación del material:

$$\frac{dR_p}{R_p} = 0'283 d_p \bar{\epsilon}_p \cdot \exp\left(1'5 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) \quad |1|$$

donde  $R_p$  es el radio del hueco.

Suponiendo que las partículas que dan lugar a la formación de las cavidades poseen un diámetro  $D_p$  y se encuentran separadas una longitud  $d_p$ , tomando como radio inicial de la cavidad  $D_p/2$  y como radio final  $d_p/2$  e integrando la ecuación anterior, se obtiene la siguiente expresión de la deformación a la fractura,  $\bar{\epsilon}_f$ , suponiendo despreciable la fase de nucleación de huecos:

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{\ln(d_p/D_p)}{0'28 \cdot \exp\left(1'5 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)} \quad |2|$$

con lo cual, para un estado triaxial de tensiones conocido, la morfología de las cavidades (medida a partir de  $d_p/D_p$ ) podría relacionarse con la deformación a la fractura del material y servir  $d_p/D_p$  de testigo local del nivel de deformación sufrido en una superficie de fractura.

Thompson /2/ y Thompson y Ashby /3/ proponen el parámetro  $M=h/w$ , donde  $h$  es la profundidad y  $w$  la anchura del alvéolo (fig. 1), para describir la geometría de la cavidad. Suponiendo simplemente que las cavidades abarquen toda la superficie de fractura, la relación entre este parámetro y la deformación local a fracturas es:

$$\bar{\epsilon}_f \approx \frac{1}{3} \ln \left( \frac{M^2}{3f} \right) \quad |3|$$

siendo  $f$  la fracción volumétrica de las partículas que han dado origen a las cavidades. Otros parámetros que podrían usarse serían  $h/d$  y, mucho más cómodo de medir,  $w/d$ .

El objetivo de este estudio es determinar correlaciones entre diferentes parámetros morfológicos de los alvéolos y la deformación equivalente crítica en el acero A533B-1 para obtener el valor de la deformación local en la zona de inicio de la propagación dúctil de grietas en el acero A533B-1 y compararlo con los resultados predichos por métodos de elementos finitos.

## 2.- TECNICAS EXPERIMENTALES

El material utilizado es un acero bainítico A533B-1.

Su composición química y sus propiedades mecánicas han sido previamente expuestas en la comunicación "Fractura dúctil de un acero A533B-1: relación entre la tenacidad y el comportamiento microscópico" recogida en este mismo volumen. Asimismo, las superficies de fractura sobre las que se llevó a cabo el estudio corresponden a probetas cuyos resultados se han presentado en la comunicación citada.

La técnica utilizada para la medición de la profundidad de las cavidades,  $h$ , consistió en la obtención de pares estereográficos /4/ por medio de microscopía electrónica de barrido (en la mayoría de los casos de ángulo girado fue de  $20^\circ$ , si bien en algunas ocasiones se emplearon también  $10^\circ$  y  $15^\circ$ )

Debido a que en la mayoría de los casos la inclusión se encontraba en el fondo de la cavidad, se consideró como profundidad real de la misma la distancia medida más el diámetro de la partícula. Por otra parte, tanto el diámetro de la inclusión,  $d$ , como la anchura de la cavidad,  $w$ , se han determinado calculando la media geométrica de sus dimensiones máxima y mínima.

Las mediciones del tamaño de las cavidades se realizaron en cinco probetas axisimétricas ensayadas a 20, 100 y  $180^\circ\text{C}$ . (Tabla 1), con estados hidrostáticos de tensiones comprendidos entre 0'66 y 1'67.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1 Relación entre la geometría de los alvéolos y $\bar{\epsilon}_f$

En las superficies de fractura se observan dos grupos de huecos fácilmente diferenciables por su tamaño; grandes, nucleados a partir de inclusiones (fig.2) y los de tamaño mucho más reducido (fig.3), surgidos a partir de carburos. Se supone que la descohesión de las inclusiones ocurre para deformación despreciable, mientras que la de los carburos exige deformación relativamente grande. La coalescencia de los huecos pequeños determina la fractura. Por tanto, para conocer la deformación local crítica se procedió a la medición de los tamaños de los alvéolos nucleados a partir de las inclusiones. En la tabla 2 se presentan recopilados los valores medios de  $\bar{d}$  (tamaño de la inclusión),  $2h$  (altura total de la cavidad),  $w$  (anchura de la cavidad) y las relaciones  $2h/w$ ,  $2h/d$  y  $w/d$  para unos límites de confianza del 95%, indicándose además el número de cavidades medido en cada probeta.

De los tres parámetros utilizados ( $2h/w$ ,  $2h/d$  y  $w/d$ ) para caracterizar la morfología de las cavidades el menos sensible resulta ser  $w/d$  (el más fácil de cuantificar, ya que no es necesario realizar pares estereográficos para medir la anchura de la cavidad), mientras que, tanto las relaciones  $2h/w$  como  $2h/d$  varían apreciablemente de unas probetas a otras al hacerlo  $\bar{\epsilon}_f$ . Obviamente, sobre  $w$  influyen de manera contrapuesta la contracción impuesta por el cambio de forma externo y la expansión inducida por la tracción hidrostática imperante.

En la fig. 4. se representa la variación de  $\ln(2h/w)$ ,  $\ln(2h/d)$  y  $\ln(w/d)$  en función de la deformación macroscópica a la fractura,  $\bar{\epsilon}_f$ . En los tres casos la dependencia es lineal:

$$\bar{\epsilon}_f = 0'382 + 0'664 \ln\left(\frac{2h}{w}\right) \quad r = 0'998$$

$$\bar{\epsilon}_f = -1'014 + 0'881 \ln\left(\frac{2h}{d}\right) \quad r = 0'963 \quad |4|$$

$$\bar{\epsilon}_f = 3'053 - 1'695 \ln\left(\frac{w}{d}\right) \quad r = 0'771$$

La relación  $w/d$ , como era de esperar, no sirve para caracterizar adecuadamente la deformación macroscópica. En realidad, según el modelo de Rice y Tracey /1/,  $w/d$  (en la expresión |2|  $Dp/dp$ ) depende de  $\bar{\epsilon}_f$  y  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ . Expresando la ecuación |2| de la forma:

$$\ln \frac{w}{d} = \ln \alpha + \beta \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad |5|$$

y determinando los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  mediante un ajuste por mínimos cuadrados, resulta:

$$\ln \frac{w}{d} = 0'604 \bar{\epsilon}_f \cdot \exp \left( 1'642 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \quad r=0'994 \quad |6|$$

El ajuste es ahora mucho mejor (fig. 5) y el parámetro  $w/d$  puede también relacionarse con la deformación  $\bar{\epsilon}_f$  siempre que se conozca la tensión hidrostática local.

El valor del coeficiente  $\beta$  resulta muy próximo al predicho por el modelo teórico. Sin embargo, no sucede lo mismo con el coeficiente  $\alpha$  (0'283 según el modelo y 0'604 según el ajuste experimental). Se ha observado |5| que  $\alpha$  depende de la fracción volumétrica de inclusiones, tal como queda señalado en la Fig. 6, y los valores de  $\alpha$  experimentales son siempre más elevados que los propuestos por Rice y Tracey. En la misma figura se ha representado el valor de  $\alpha=0'604$  obtenido con el acero A533B-1 (la fracción volumétrica de inclusiones medida es 0'38<sup>o</sup>/oo), que se ajusta bastante bien a los resultados de la bibliografía. La predicción teórica no tiene en cuenta la interacción entre cavidades próximas.

### 3.2 Aplicación

Con objeto de comprobar la aplicabilidad de las expresiones anteriormente determinadas, se procedió a la medición de la relación  $w/d$  en tres probetas compactas ensayadas a -40, 20 y 150 °C en las cuales el inicio de la propagación de la grieta fue dúctil. La elección del parámetro  $w/d$  se debió a su facilidad de medición, ya que no exige la realización de pares estereográficos.

En la fig. 7 se representan los valores de  $w/d$  medidos en función de la distancia al frente de fatiga para las tres temperaturas. Debido a que no se aprecia una dependencia entre la posición de la cavidad y  $w/d$ , se procedió a determinar los valores medios de todos los resultados medidos para cada temperatura (Tabla 3).

La deformación plástica equivalente frente al borde de una grieta, sobre su plano, para un sólido elasto-plástico, ha sido calculada por Rice y Johnson/6/, para un sólido no endurecible. Dichos valores admiten, en función de  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ , un ajuste del siguiente tipo:

$$\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = 0'763 - 0'293 \ln \bar{\epsilon}_f \quad r=0'996 \quad |7|$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones |6| y |7| para los valores de  $w/d$  promedios, se obtienen, teniendo en cuenta los intervalos de confianza de  $\ln w/d$ , los siguientes valores de la deformación local:

$$\begin{aligned}
-40^{\circ}\text{C} &: 0'496 < \bar{\epsilon}_f < 0'679 \\
20^{\circ}\text{C} &: 0'398 < \bar{\epsilon}_f < 0'536 \\
150^{\circ}\text{C} &: 0'490 < \bar{\epsilon}_f < 0'618
\end{aligned}$$

| 8 |

En la fig. 8 se representan los intervalos determinados de  $\bar{\epsilon}_f$  superpuestos a las curvas obtenidas por Rice y Johnson de  $\bar{\epsilon}_f$  y  $\sigma_m/\bar{\sigma}$  en función de  $x/\delta$ . Igualmente, se han indicado las curvas experimentales de deformación efectiva necesaria para que tenga lugar la fractura dúctil, calculadas con probetas axisimétricas y con probetas planas, así como la curva correspondiente al promedio de todos los ensayos.

Tal como puede apreciarse, los valores de la medida indirecta local de  $\bar{\epsilon}_f$  quedan comprendidos dentro de los límites definidos por los ensayos con probetas axisimétricas y con probetas planas, aunque es necesario señalar que para las tres temperaturas el valor de la medida local es inferior a la estimación obtenida con el promedio de todos los ensayos.

La fig. 8 induce a pensar que es posible medir indirectamente la deformación local en la zona de inicio de propagación dúctil de grietas, si bien existen varias limitaciones debidas a la utilización del parámetro  $w/d$ . En primer lugar, dicho parámetro es el menos sensible de los tres ( $w/d$ ,  $2h/d$  y  $2h/w$ ) a las variaciones macroscópicas de  $\bar{\epsilon}_f$ . Y en segundo lugar, si bien es el más fácil de medir, presenta el inconveniente de que depende de  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ , siendo necesario recurrir a los cálculos de Rice y Johnson. En definitiva, es previsible pensar que la utilización de las relaciones  $2h/d$  o  $2h/w$  conduzca a resultados mejores que los logrados con  $w/d$ .

#### 4.- CONCLUSIONES

- La deformación crítica equivalente,  $\bar{\epsilon}_f$ , puede ser caracterizada adecuadamente a través de la geometría de los alvéolos de las superficies de fractura mediante los parámetros  $2h/w$  o  $2h/d$ .

- La relación  $w/d$ , cociente entre los diámetros de la cavidad y de la partícula, no depende exclusivamente de  $\bar{\epsilon}_f$ , sino de  $\bar{\epsilon}_f$  y  $\sigma_m/\bar{\sigma}$ . La ecuación de Rice y Tracey resulta adecuada para expresar dicha dependencia.

- Una vez calibradas esas relaciones, los alvéolos de la superficie de fractura pueden utilizarse como testigos de la deformación local en la zona de proceso en el inicio de la propagación dúctil de grietas, proporcionando una comprobación adicional de los modelos teóricos de fractura.

#### 5.- REFERENCIAS

- /1/ Rice, J.R., Tracey, D.M., J. Mech. Phys. Solids, 17, pp. 201, (1969).
- /2/ Thompson, A.W., Advances in Fracture Research, (Proc. of 6th Int. Conf. on Fracture, Nueva Delhi (India), 1984), S.R. Valluri et al. ed., Pergamon Press, Vol. 2, pp. 1393, (1984).
- /3/ Thompson, A.W., Ashby, M.F., Scripta Metall., 18, pp. 127, (1984)
- /4/ Lane, G.S., "The use of the Scanning Electron Microscope", Hearle, J.W.S., Sparrow, J.T. y Cross, P.M., ed, Pergamon Press, pp.219, (1972)
- /5/ Marini, B., Mudry, F., Pineau, A., Eng. Fract. Mech., 22, pp. 989, (1985).
- /6/ Rice, J.R., Johnson, M.A., "Inelastic Behaviour of Solids", M. Kanninen, W.G. Adler, A.R. Rosenfield y R.I. Jaffee, eds., McGraw-Hill, New York, pp.641, (1970).

TABLA 1 - Caracterización de las probetas axisimétricas utilizadas en la medición de las cavidades

Probeta	Temp. (°C)	$\frac{\sigma_m}{\sigma}$	$\bar{\epsilon}_f$
0	20	0'66	0'821
1-1	20	1'04	0'480
1-C*	100	1'03	0'419
3-0	20	1'67	0'179
3-2*	180	1'67	0'178

TABLA 2 - Resultados de los parámetros medidos en las probetas axisimétricas

Probeta	nº cavidades	d (µm)	2h (µm)	w (µm)	2h/w	2h/d	w/d
0	15	3'6 <sup>±</sup> 0'6	33'4 <sup>±</sup> 10'8	16'2 <sup>±</sup> 3'0	2'00 <sup>±</sup> 0'34	9'0 <sup>±</sup> 2'1	4'6 <sup>±</sup> 0'8
1-1	32	6'8 <sup>±</sup> 1'3	34'0 <sup>±</sup> 5'6	27'2 <sup>±</sup> 4'1	1'28 <sup>±</sup> 0'14	5'6 <sup>±</sup> 0'7	4'3 <sup>±</sup> 0'5
1-C*	23	7'8 <sup>±</sup> 1'8	35'5 <sup>±</sup> 6'8	34'9 <sup>±</sup> 7'0	1'10 <sup>±</sup> 0'14	4'6 <sup>±</sup> 0'7	4'7 <sup>±</sup> 0'5
3-0	22	5'6 <sup>±</sup> 1'3	22'5 <sup>±</sup> 6'2	28'7 <sup>±</sup> 5'6	0'82 <sup>±</sup> 0'18	4'1 <sup>±</sup> 0'7	5'5 <sup>±</sup> 0'7
3-2*	28	6'3 <sup>±</sup> 1'1	28'5 <sup>±</sup> 5'1	34'5 <sup>±</sup> 5'5	0'82 <sup>±</sup> 0'08	4'6 <sup>±</sup> 0'6	5'7 <sup>±</sup> 0'5

TABLA 3 - Resultados de los parámetros medidos en probetas compactas

Temp. (°C)	d (µm)	w (µm)	w/d
-40	4'6 <sup>±</sup> 0'6	23'3 <sup>±</sup> 3'4	5'4 <sup>±</sup> 0'7
20	6'0 <sup>±</sup> 1'0	25'1 <sup>±</sup> 3'5	5'0 <sup>±</sup> 0'6
150	6'3 <sup>±</sup> 0'9	29'4 <sup>±</sup> 3'7	5'0 <sup>±</sup> 0'5

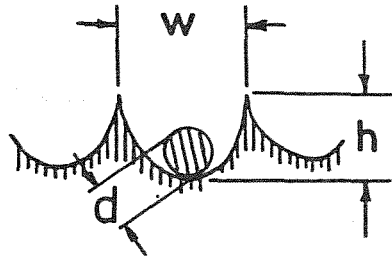


Fig.1 Esquema de una cavidad

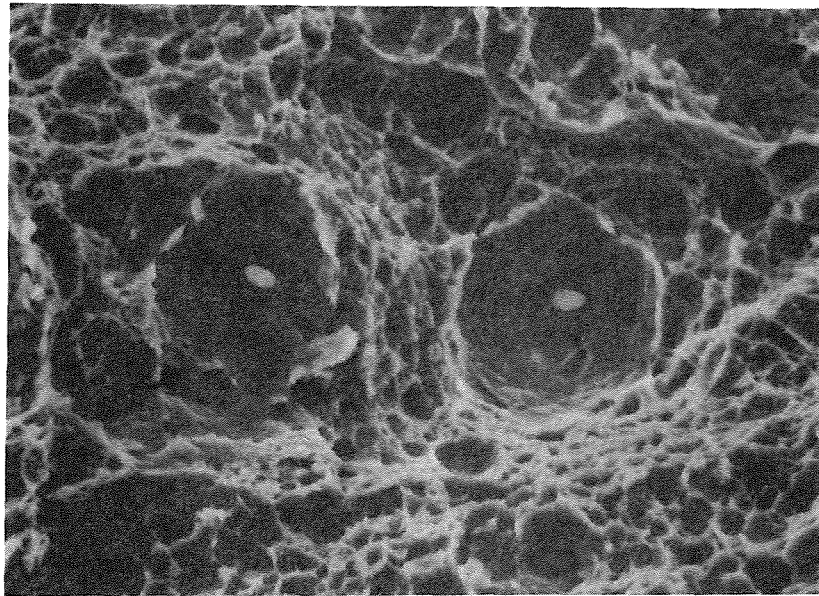


Fig.2 - Cavidades formadas a partir de inclusiones (x1250)

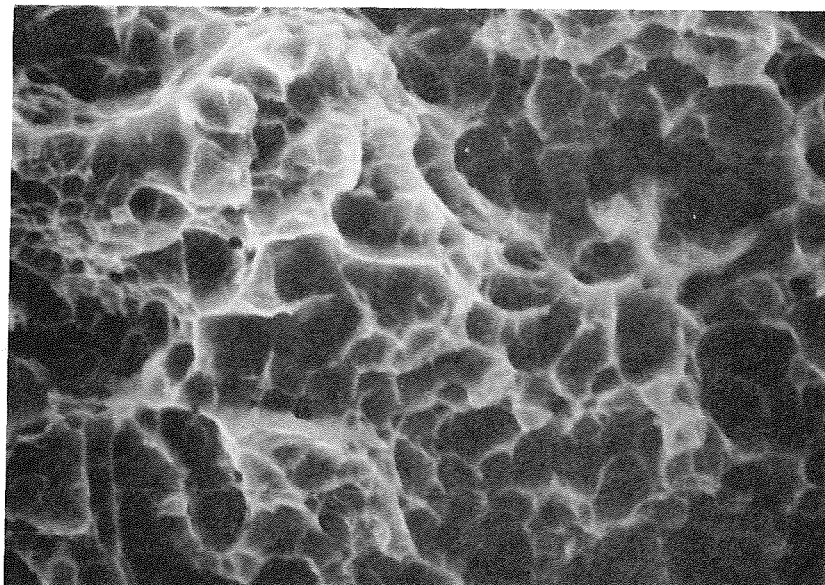


Fig.3 - Cavidades formadas a partir de carburos (x5000)

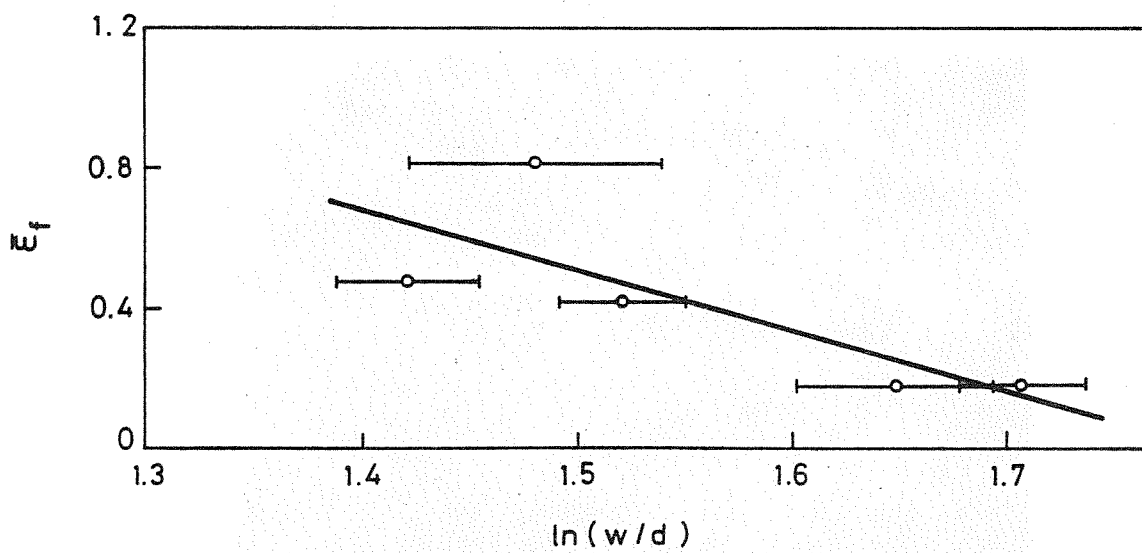
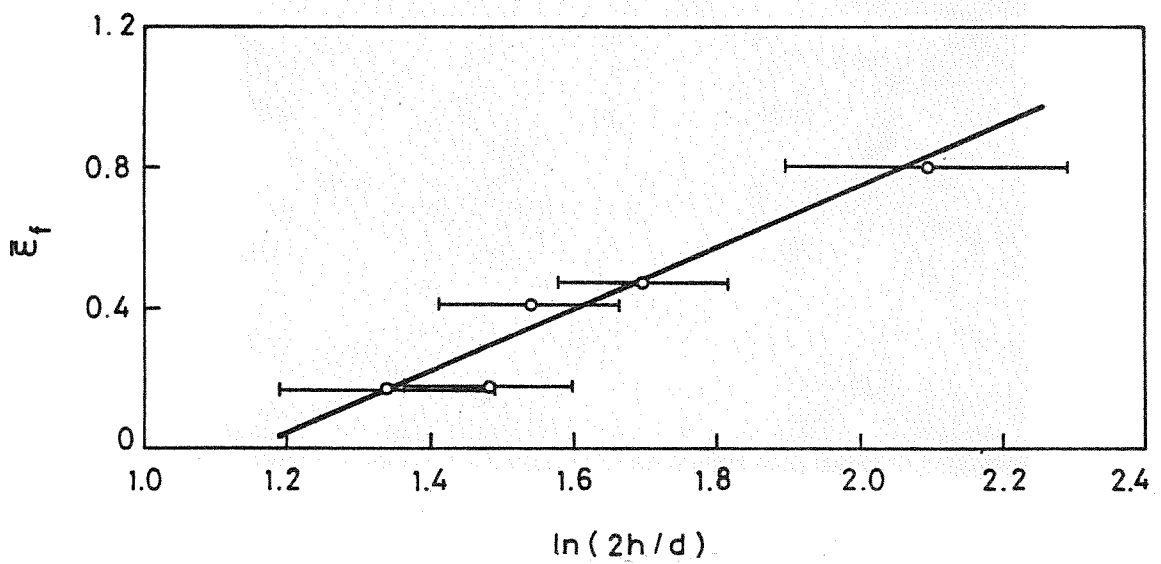
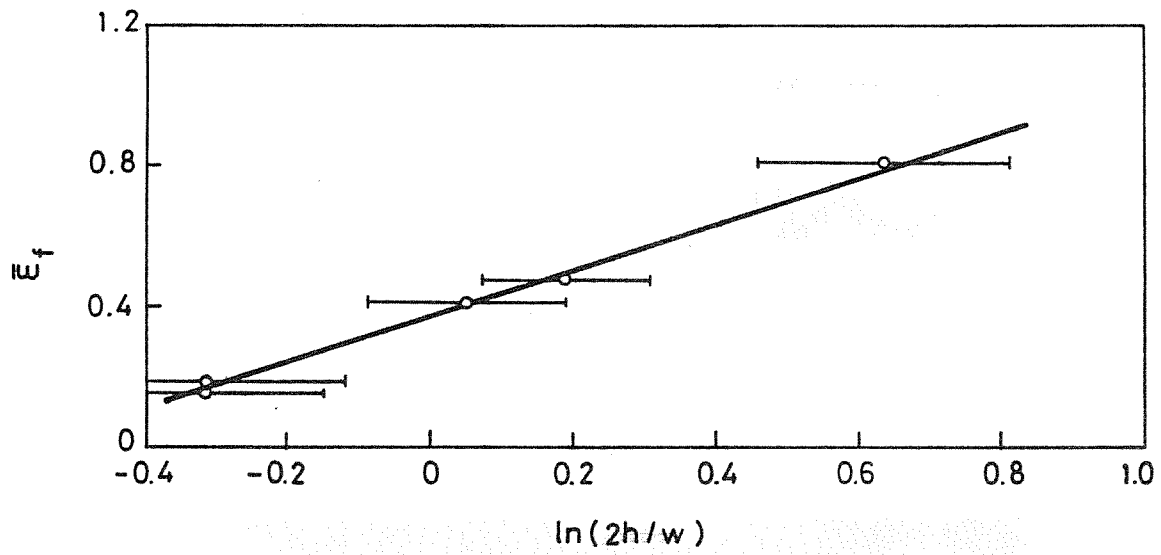


Fig. 4 - Relación entre los parámetros  $2h/w$ ,  $2h/d$  y  $w/d$  y la deformación macroscópica a la fractura,  $\epsilon_f$ .



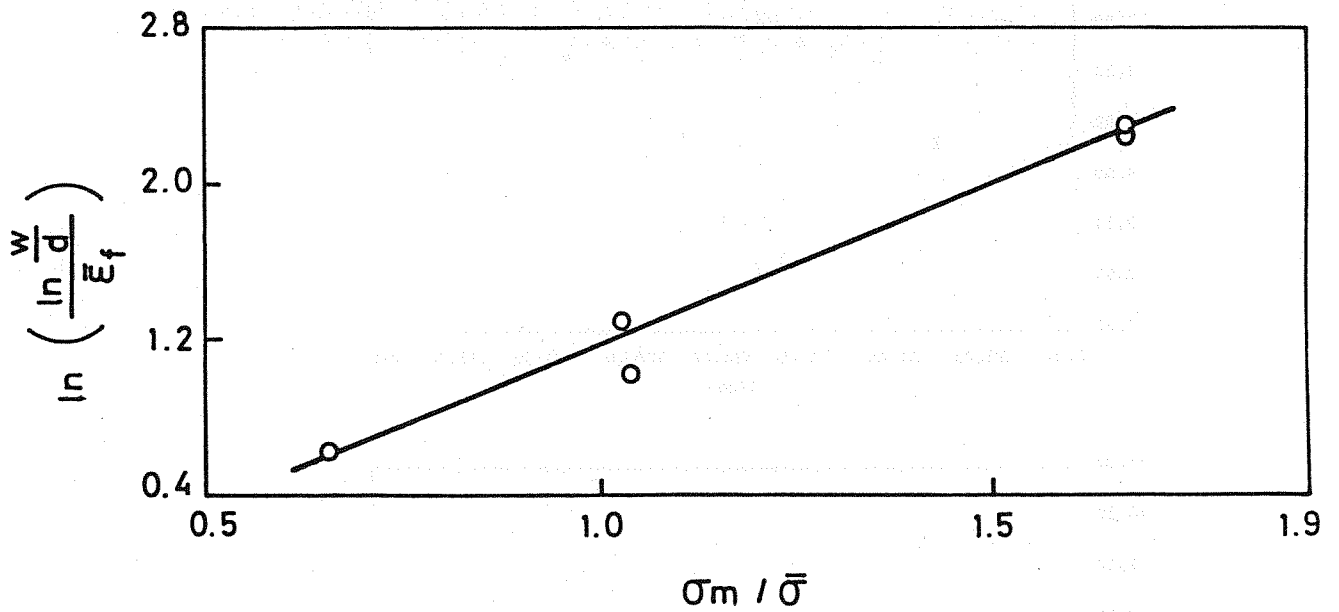


Fig. 5 - Relación entre  $w/d$  y  $\bar{\epsilon}_f$  teniendo en cuenta la triaxialidad de tensiones. El ajuste es apreciablemente mejor que el obtenido con el mismo parámetro en la Fig. 4.

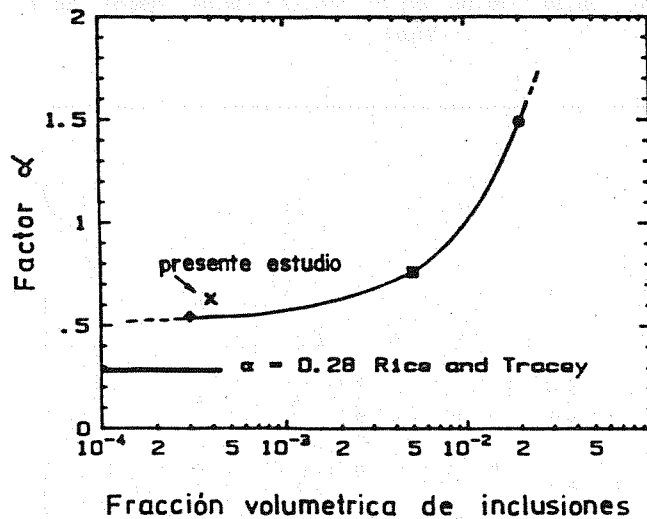


Fig. 6 - Dependencia del coeficiente  $\alpha$  de la ecuación de Rice y Tracey con la fracción volumétrica de inclusiones /5/, señalándose el valor obtenido en el presente estudio.

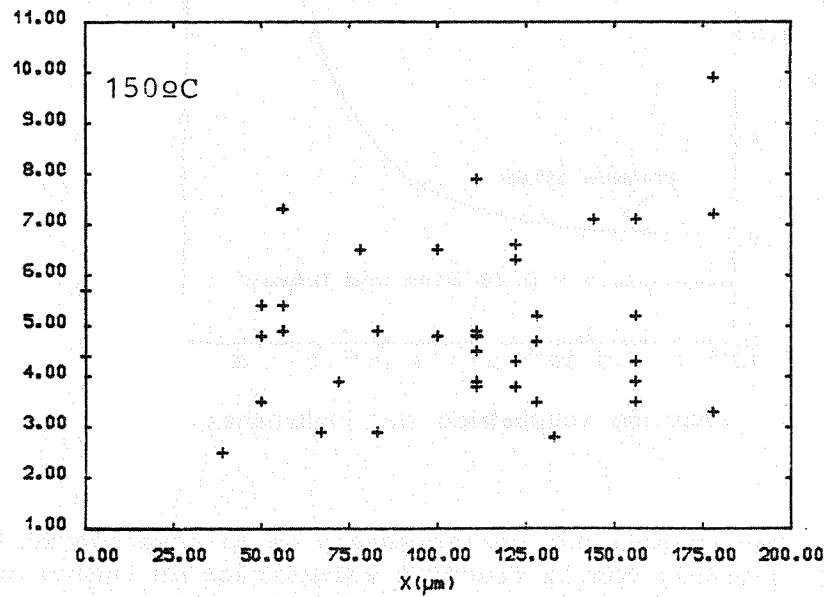
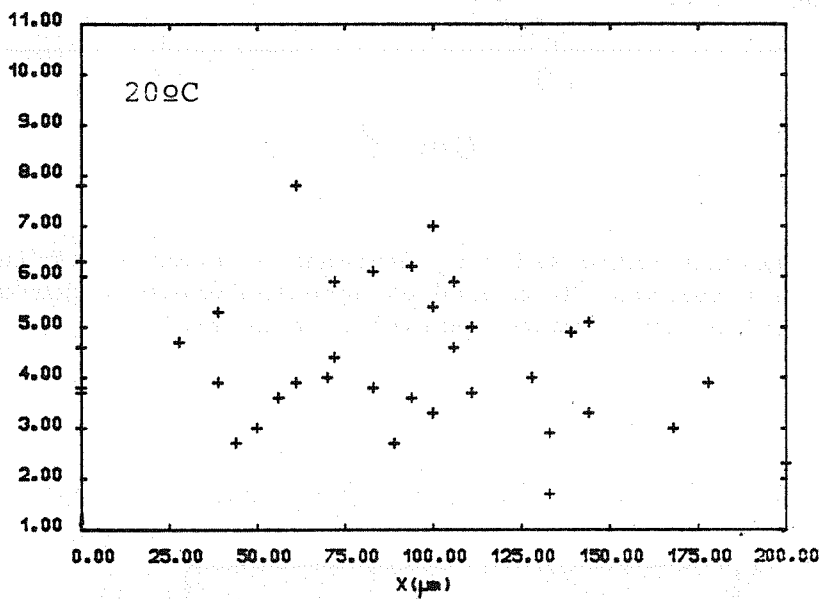
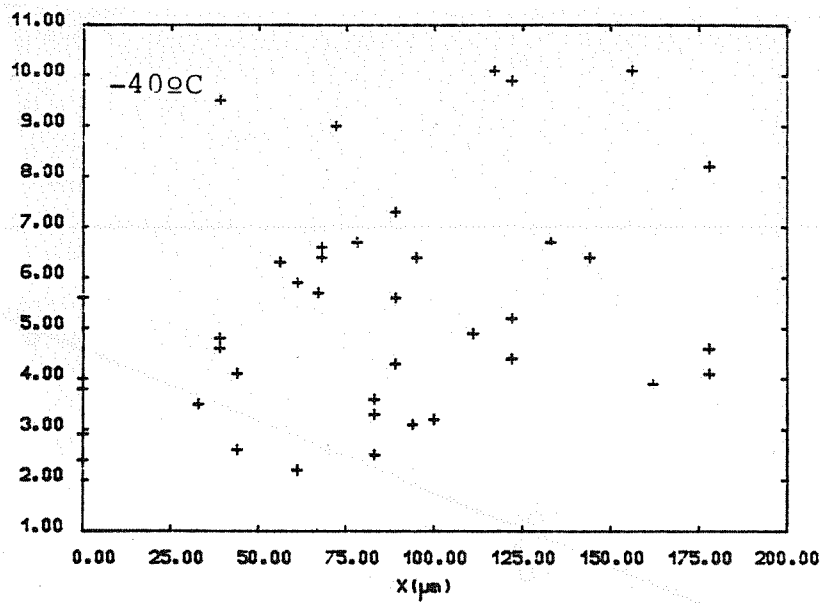


Fig. 7 - Valores de  $w/d$  medidos en función de la distancia al frente de fatiga para tres temperaturas, no apreciándose una dependencia entre la posición de la cavidad y  $w/d$ .

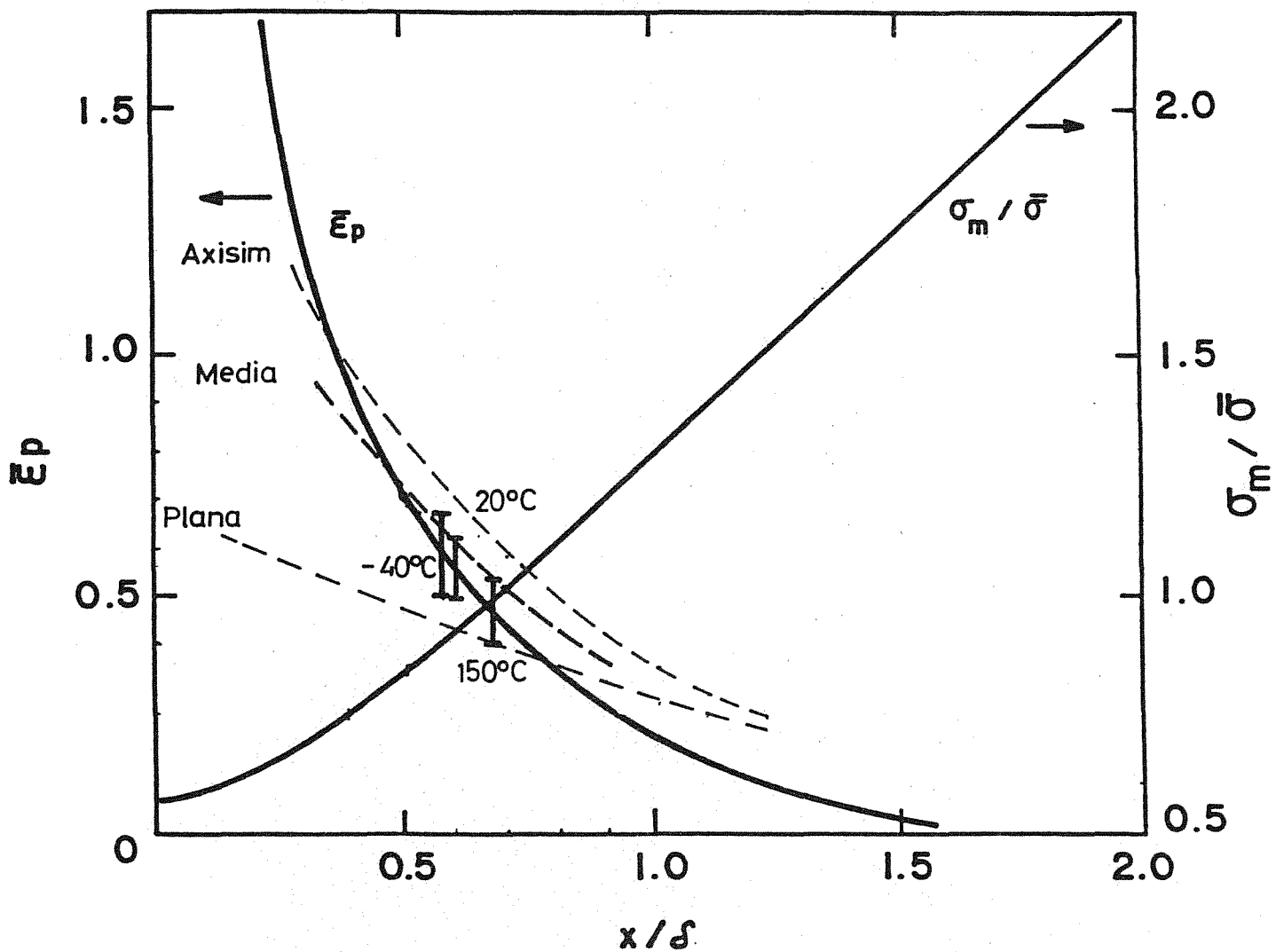


Fig. 8 - Intervalos determinados de  $\bar{\epsilon}_p$  para  $-40, 20$  y  $150^\circ\text{C}$  superpuestos a las curvas de Rice y Johnson /6/, señalándose las curvas experimentales de deformación efectiva para que se produzca la fractura dúctil, obtenidas con probetas planas y axisimétricas, así como la curva promedio de todos los ensayos.