

"ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TENACIDAD A ROTURA FRÁGIL DE UN ACERO
BAINÍTICO A 533B EN LA ZONA DE TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL"

Viviente Solé, J.L., Menchaca Falcón, H., Rodríguez Ibabe, J.M. y
Gil Sevillano, J.

CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa)
Apartado, 1555. 20080 - SAN SEBASTIAN

Resumen.- Se han realizado 49 ensayos de medida de K_{Ic} correspondientes a rotura frágil por descohesión de un acero bainítico A533B a tres temperaturas, -70, -40 y -10°C, contenidas en el intervalo de transición dúctil-frágil, utilizando probetas CT de 25 mm de espesor con entallas laterales y orientación T-S. La dispersión de los valores obtenidos es muy grande. Las distribuciones de K_{Ic} a cada temperatura admiten un buen ajuste mediante funciones de Weibull de dos parámetros con parámetro de forma $m \approx 4$. Este resultado concuerda con las predicciones teóricas de modelos de fractura basados en las hipótesis de fallo global por fallo del "weakest link" microestructural.

Abstract.- Toughness for brittle (cleavage) propagation in a bainitic A 533B steel has been measured at three temperatures (-70, -40 and -10°C) in the ductile-to-brittle transition temperature range. A total of 49 values of K_{Ic} have been obtained with side-notched 25mm CT specimens of T-S orientation. The variability of toughness at each temperature is large and it is well represented by two-parameter Weibull functions of shape parameter $m \approx 4$. Such result agrees with the prediction of fracture models based on the "weakest-link" concept.

1. INTRODUCCION

Aunque el tratamiento probabilístico de la tenacidad de los materiales frágiles (cerámicas y vidrios) está enormemente desarrollado, la tenacidad de los metales se ha enfocado generalmente de manera determinista y sólo en los últimos años los tratamientos estadísticos están adquiriendo verdadero auge. Sin embargo la dispersión de los valores experimentales de la tenacidad de los metales puede ser importante. Tal es el caso de la tenacidad a la rotura frágil de los aceros en la zona de transición.

Generalmente se ha supuesto una distribución normal como representativa de la dispersión observada en la tenacidad. No obstante, las largas colas de la distribución, junto con su simetría respecto a la media, dan como resultado unas predicciones para la probabilidad de

fractura en el límite inferior de tenacidad sin sentido físico o muy conservativas [1].

1.1 El modelo del "weakest link"

Independientemente del "efecto tamaño" derivado de la contribución de las capas superficiales de la probeta a la tenacidad (pérdida de constreñimiento), los valores de tenacidad obtenidos en la región de transición a partir de probetas muy pequeñas presentan una mayor dispersión que en el caso de las probetas grandes [2, 3]. Landes y Schaffer [2] propusieron un modelo que se basa en la estadística de los extremos y que sugiere que pueden usarse los valores de tenacidad obtenidas de probetas pequeñas para caracterizar la tenacidad de grandes estructuras. Parten de la base de que la tenacidad de un lote de material es variable, siendo diferente a través

de todo el material y en particular a lo largo del frente de grieta. Además plantean que la tenacidad de la fractura de cualquier probeta está gobernada por el punto o la zona de menor tenacidad a lo largo del frente de grieta. Las probetas más grandes tendrán una mayor probabilidad de contener una región de baja tenacidad. Las probetas pequeñas muestran una variación de la tenacidad y como promedio presentan una tenacidad mayor. Sin embargo, cuando se ensaya un gran número de probetas pequeñas, la tenacidad deberá manifestar una gran dispersión, yendo desde los valores cercanos a la tenacidad de la probeta grande hasta valores más elevados que la misma. Siguiendo el razonamiento anterior, Landes y Schaffer [2] recomendaron que los valores de tenacidad a la rotura frágil fueran tratados mediante modelos estadísticos de extremos, en particular mediante la distribución de Weibull, tan enormemente popular para la descripción de la resistencia de materiales intrínsecamente frágiles.

1.2 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull de tres parámetros es de la forma [4]

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(x-x_u)}{x_0} \right]^m \right\} \quad (1)$$

donde $F(x)$ es la función de distribución acumulada, x_u el parámetro de posición, x_0 el parámetro de escala y m el parámetro de forma. El parámetro de posición es el valor de x por debajo del cual la probabilidad de que ocurra un hecho es cero. Cuando dicho parámetro es cero, tenemos la llamada distribución de Weibull de dos parámetros.

Wallin [5] señaló explícitamente por primera vez que todo modelo de la tenacidad de un material estadísticamente homogéneo, basado en la hipótesis del "weakest link", que suponga campos de tensiones y deformaciones geoméricamente semejantes en el contorno de la grieta y normalizables utilizando el factor J (ó K^2) para las distancias, conduce a una distribución de la tenacidad del tipo "Weibull de dos parámetros" con el parámetro de forma $m=2$ (distribuciones de J_c ó CTOD) ó $m=4$ (distribuciones de K_{Ic}):

$$F(K_{Ic}) = 1 - \exp (-B K_{Ic}^4 \psi) \quad (2)$$

donde B es la longitud del frente de la grieta y ψ una constante del material para la temperatura, velocidad y geometría de los ensayos considerados. Un desarrollo teórico riguroso conducente a la ec. (2) ha sido realizado por Slatcher [6]. Un resultado experimental acorde con la ec. (2) supone una fuerte indicación de

que la fractura macroscópica del material está determinada por un suceso elemental de rotura a escala microestructural que responde a un esquema tipo "weakest link". Es el caso de la tenacidad a rotura frágil en la zona de transición de un acero con estructura bainítica, que se describe a continuación.

2. MEDIDAS EXPERIMENTALES

La composición del material utilizado, un acero A533B con estructura bainítica revenida, se detalla en la Tabla 1.

TABLA 1. Composición Química (% en peso)

0,18 C, 1,41 Mn, 0,24 Si, 0,56 Ni, 0,18 Cr, 0,49 Mo, 0,021 Al, 0,005 S, 0,009 P, 0,17 Cu, < 0,005 V.

2.1 Ensayos de fractura

Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E813 [7]. Se utilizaron probetas compactas de tracción con orientación T-S, de 25 mm de espesor y provistas de entallas laterales de 2.5 mm de profundidad.

Las probetas se ensayaron con una máquina servohidráulica de 100 kN de capacidad, INSTRON 1342, bajo control de posición, con una velocidad del actuador de $0,01 \text{ mm s}^{-1}$. En cada ensayo se registró la carga, el desplazamiento y la apertura de los labios de la fisura sobre la línea de carga hasta el instante de fractura frágil. En algunos casos, el ensayo se detuvo antes de producirse la fractura frágil. La apertura se midió directamente con un extensómetro tipo "clip". Las probetas se ensayaron dentro de una cámara ambiental Instron 3110 a tres temperaturas diferentes dentro de la zona de transición: -70, -40 y -10°C.

2.2 Resultados

En las Tablas 2, 3 y 4 se representan los valores de tenacidad a fractura frágil, K_{Ic} , junto con los valores de la integral J y del crecimiento estable, Δa (antes de la fractura frágil ó al detener el ensayo). Las tablas incluyen también 5 valores de tenacidad obtenidos previamente a -70 y -40°C con este mismo material e idénticas características de los ensayos [8].

En la Tabla 4 se señalan con un asterisco los ensayos de integral J que incumplen la condición de espesor mínimo de la norma ASTM E813, $B \geq 15 J / \sigma_0$ [7]. Los valores de $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_{uts})/2$ se obtuvieron a cada temperatura mediante ensayos de tracción.

TABLA 2. Ensayos realizados a -70°C $\sigma_0=602$ MPa

Ref.	Δa (mm)	J (KJ/m ²)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
A1	0,133	185,34	197,29
A3	0,108	138,94	170,81
A4	0,151	198,67	204,26
A5	0,202	253,57	230,76
A16	0,112	176,04	192,27
A18	0,007	10,59	47,16
A20	0,077	131,11	165,93
A22	0,208	254,98	231,40
A23	0,069	112,51	153,71
A29	0,016	63,58	115,55
H5	0,011	53,32	105,82
H11	0,084	104,93	148,44
H19	0,06	105,02	148,51
I05	0,05	122,4	160,7
I06	0,18	215,0	213,0
I07	0,125	169,1	188,9
I08	0,009	33,0	83,5

TABLA 3. Ensayos realizados a -40°C $\sigma_0=584$ MPa

Ref.	Δa (mm)	J (KJ/m ²)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
A2	0,184	237,61	223,38
A6	0,213	285,65	-
A8	0,241	224,34	217,05
A10	0,572	325,91	261,61
A11	0,066	136,26	169,16
A17	0,161	217,74	213,84
A26	0,171	228,0	218,82
A27	0,284	207,61	208,8
A28	0,329	271,87	238,94
A30	0,573	378,87	282,07
A33	0,664	479,21	317,23
A35	0,834	555,79	341,64
H3	0,253	300,6	-
H4	0,383	295,55	249,13
H15	0,287	225,96	217,83
H17	0,401	346,61	269,79
H18	0,264	234,94	222,12
H20	0,038	41,99	93,9
42	0,79	480,8	318,2

TABLA 4. Ensayos realizados a -10°C $\sigma_0=564$ Mpa

Ref.	Δa (mm)	J (KJ/m ²)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
A7	0,825	493,11	321,8
A9	1,615	642,2	367,22
A12*	2,624	848,17	422
A15	0,649	454	308,8
A19*	9,48	1764,3	608,7
A21*	2,328	780,71	-
A24	0,533	426,9	299,41
A25	0,885	544,5	338,15
A31	0,958	507,6	326,54
A32*	2,711	812,3	413,0
A34*	6,994	1302,1	-
H1*	3,399	1011,8	460,96
H6	0,668	411,9	294,12
H9*	6,411	1187,8	499,4
H10	1,667	724,57	390,1
H13*	4,925	1272,5	516,9
H16	1,792	705,0	384,77

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores de tenacidad obtenidos a cada temperatura presentan una gran dispersión. La variación de la tenacidad está asociada a la diferente propagación estable que muestran las probetas antes del fallo frágil. A mayor

propagación estable, mayor energía suministrada antes del fallo inestable.

3.1 Estudio estadístico

Si, a cada temperatura, ordenamos de menor a mayor los valores de tenacidad, podemos asignarles a cada uno un valor de probabilidad acumulada de fractura

$$P_f = (2i-1)/2N \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

donde N es el número total de ensayos. Estos valores se pueden ahora comparar con la probabilidad teórica de fallo que proporciona la distribución de Weibull. Es nuestro caso, N=17 para las tres temperaturas de ensayo. No obstante, los datos estrictamente a considerar en el ajuste a realizar a -10°C serán únicamente los nueve válidos.

En principio, sería deseable a efectos de diseño que la distribución a ajustar a los valores de K_{Ic} fuese la de tres parámetros (1) ya que así se podría obtener un valor de tenacidad mínima por debajo del cual la probabilidad de fractura sería cero. Empleando el método de máxima verosimilitud se realizó el ajuste para los ensayos efectuados a -70 y -40°C. Los parámetros de las distribuciones acumuladas de Weibull obtenidas se detallan en la Tabla 5. El parámetro de posición obtenido es en ambos casos negativo.

TABLA 5. Distribuciones acumuladas de Weibull de 3 parámetros

T(°C)	m	x_0 (MPa \sqrt{m})	x_u (MPa \sqrt{m})
-40	5.506	300.18	-38.06
-70	6.954	297.30	-115.07

Como se puede suponer, no tiene sentido físico hablar de valores negativos de tenacidad. Por lo tanto, es claro que la distribución de tres parámetros no resulta adecuada para describir los resultados experimentales.

Se procedió a hacer un ajuste de la distribución de Weibull de dos parámetros ($x_u=0$), empleando también el método de la máxima verosimilitud. Los valores obtenidos a -70 y -40°C se detallan en la Tabla 6. En la misma tabla se indican los parámetros de la distribución de Weibull ajustada a -10°C. A esa temperatura, dado el número pequeño de ensayos realizados, se consideró m=4 (su valor teórico [5]) y se determinó x_0 ajustando los nueve puntos válidos. El resultado es muy similar al que se obtiene incluyendo en un ajuste libre

los resultados inválidos (parámetros señalados con un asterisco en la tabla 6). La fig. 1 muestra gráficamente los resultados.

TABLA 6. Distribuciones acumuladas de Weibull de 2 parámetros

T(°C)	m	x ₀ (MPa√m)
-10	4	470.21
-10*	4.539*	431.97*
-40	4.718	260.16
-70	3.849	178.40

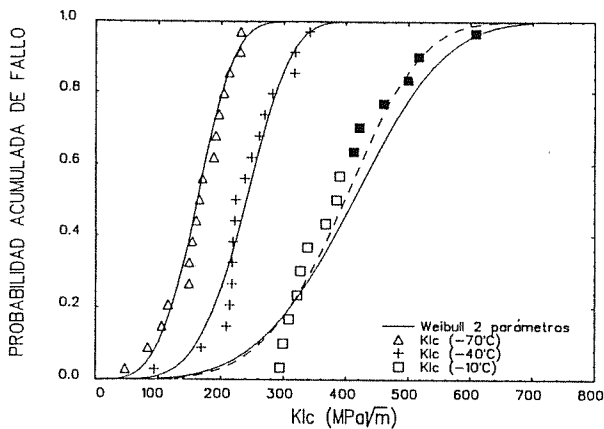


Fig. 1. Frecuencias acumuladas de tenacidad a la rotura frágil y curvas ajustadas de probabilidad de fractura para una distribución de Weibull de 2 parámetros. A -10°C, la línea llena corresponde al ajuste (con m=4) de los 9 datos válidos según ASTM E813; la línea discontinua corresponde al ajuste incluyendo todas las medidas (símbolos llenos, datos no válidos).

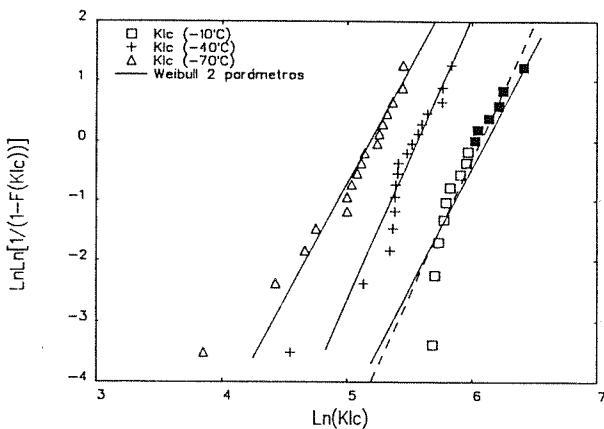


Fig. 2. Id. Fig. 1, en representación linealizada ("diagrama de Weibull").

Los resultados del parámetro de forma m para -70 y -40°C son bastante próximos al valor teórico de 4 [5]. Toda la discrepancia con respecto a esta constante sería atribuible, de acuerdo con simulaciones por computador de otros autores [5, 11], al número limitado de ensayos, sin recurrir, a una posible heterogeneidad del material, que puede perturbar seriamente la forma de la función de distribución, desviándola significativamente de la función de Weibull [6].

Cuando linealizamos la función de Weibull de dos parámetros, figura 2, podemos apreciar mejor las discrepancias entre los valores experimentales y el ajuste teórico.

La desviación del ajuste lineal es especialmente notoria para los niveles más bajos de tenacidad a cada temperatura de ensayo, con frecuencias de fractura para -70 y -40°C, superiores a las probabilidades de la predicción de Weibull, con el consiguiente riesgo si esas predicciones se usaran para diseño probabilístico (fig. 3).

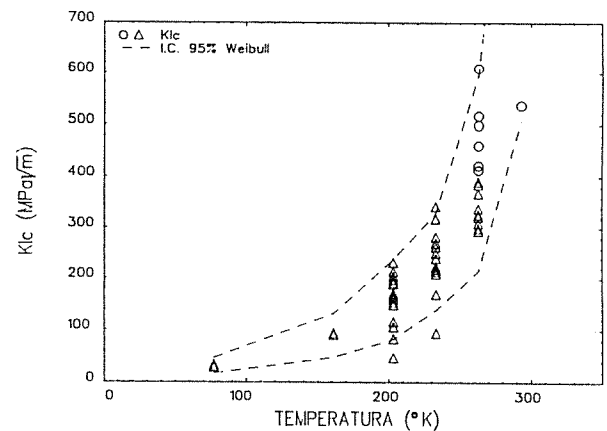


Fig. 3. Tenacidad (rotura frágil) del acero A 533B en función de la temperatura (desde 77°K a temperatura ambiente). Resultados experimentales (se incluyen datos medidos a dos temperaturas en la zona absolutamente frágil) y márgenes del 5 y 95% de probabilidad de fallo, derivados de los ajustes de funciones de Weibull.

Parece interesante intentar explicar el origen de esas desviaciones. Una primera explicación estaría basada en la presencia simultánea de dos poblaciones independientes de elementos microestructurales de fallo, conducentes a dos funciones ψ (ec. 2) diferentes, con predominio de una u otra según el volumen muestreado [9]. En el caso de este acero, existe la probabilidad de nuclear fallos de descohesión por rotura de carburos o por rotura de inclusiones no metálicas (mucho menos frecuentes que los primeros, pero de mayor tamaño medio).

Una segunda explicación puede residir en que las hipótesis que determinan la ec. (2) no se cumplen estrictamente en el caso de una grieta que sufre propagación estable antes de la rotura frágil, es decir, en la zona de transición. Concretamente, a diferencia del caso estático, la semejanza geométrica de la zona plástica (volumen muestreado) con factor de escala proporcional a K no se cumple cuando la grieta avanza establemente, con la zona plástica penetrando en un nuevo material y abandonando parte de su antiguo volumen plástico, de acuerdo con la curva de resistencia. Existe un tratamiento estadístico de este proceso, basado en el concepto "weakest link", con una aproximación bidimensional [10]. Merecería un desarrollo más completo.

Finalmente, tampoco se puede descartar que las curvaturas de los diagramas de Weibull de la figura 2 sean meramente una consecuencia de la dificultad de medir con precisión la probabilidad de fractura en la zona de baja tenacidad con un número limitado de resultados experimentales [11].

4. CONCLUSIONES

- Las distribuciones de medidas de K_{Ic} de un acero A 533 B a temperaturas en el intervalo de la transición dúctil-frágil admiten un ajuste mediante funciones de Weibull de dos parámetros con parámetro de forma $m = 4$.
- Este resultado concuerda con las predicciones teóricas de modelos de fractura basados en la hipótesis de fallo global por fallo del "weakest link" microestructural.
- Es necesario estudiar con detalle las desviaciones observadas para valores muy bajos de tenacidad, cuyo origen podría ser estructural o ligado al proceso de rotura frágil con propagación estable previa. En ambos casos se viola en alguna medida la hipótesis básica conducente a probabilidades de Weibull con factor de forma $m = 4$.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto nº 7210/KE/931 (F5-5187) del Programa de Investigación "Acero" de la CECA (Comisión de las Comunidades Europeas, D.G. XII). El trabajo de uno de los autores (H.M.F.) ha sido posible mediante becas del Instituto de Cooperación Iberoamericana, Organización de Estados Americanos y Universidad de Navarra.

REFERENCIAS

- [1] Doig, P. (1985). "Evaluation of lower bound fracture toughness values using weibull analysis of single specimen data". Eng. Fract. Mech., 21, 963-967.
- [2] Landes, J.D. y Shaffer, D.H. (1980). "Statistical characterization of fracture in the transition region". "Fracture Mechanics: 12th Conference", ASTM STP 700, pp. 368-382.
- [3] Ohtsuka, N. (1984). "An interpretation of scatter and thickness effect on fracture toughness in the transition region". Proc. 4th Int. Conf. on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM 4), Vol. 2, pp. 117-1123. Carlsson, J. y Ohlson, N.G., eds. Pergamon Press, Oxford.
- [4] Shih, T.T. (1980). "An evaluation of the probabilistic approach to brittle design". Eng. Fract. Mech., 13, 257-271.
- [5] Wallin, K. (1984). "The scatter in K_{Ic} -results". Eng. Fract. Mechanics, 19, 1085-1093.
- [6] Slatcher, S. (1986). "A probabilistic model for lower-shelf fracture toughness - Theory and application". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 9, 275-289.
- [7] ASTM E813 (1981). "Standard Test for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of A.S.T.M. Standards, Part. 10, pp. 810-828.
- [8] Viviente, J.L., Martín, A., Rodríguez, J.M., Gil, J. y Fuentes, M. (1986). "Fractura dúctil de un acero A533B-1: Relación entre la tenacidad y el comportamiento microscópico". Anales de Mecánica de la Fractura, 3, 169-178.
- [9] Johnson, C.A. (1983). "Fracture statistics of multiple flaw distributions". "Fracture Mechanics of Ceramics", Vol. 5, p. 365. R.C. Bradt y col., eds., Plenum Press, New York.
- [10] Ehl, W., Munz, D. y Brückner, A. (1986). "Crack extension in the ductile-brittle transition". Proc. Int. Seminar on Local Approach of Fracture, p. 233. EDF, Moret-sur-Loing (Francia).
- [11] Faucher, B. y Tyson, W.R. (1988). "On the determination of Weibull parameters". J. Mater. Sci. Letters, 7, 1199-1205.