

CARACTERIZACIÓN A FRACTURA DE LOS ACERO ESTRUCTURALES S355J2 Y S460M MEDIANTE EL USO DE PROBETAS MINI-C(T)

M. Sánchez^{1*}, S. Cicero¹, B. Arroyo¹

¹ Universidad de Cantabria, LADICIM (Laboratorio de Ciencia de Materiales e Ingeniería), Spain

* Persona de contacto: sanchezmam@unican.es

RESUMEN

Las probetas miniaturizadas, como las mini-C(T), son una alternativa sólida a la hora de caracterizar el comportamiento a fractura de materiales estructurales. Son especialmente útiles cuando existen restricciones relacionadas con la cantidad de material disponible, problemas de irradiación o heterogeneidades del material, entre otras posibles dificultades. Además, en aceros ferríticos-perlíticos, la caracterización a fractura es de particular interés dentro de la región de transición dúctil-frágil, realizándose a menudo a través de la definición de la Temperatura de Referencia (T_0) y la metodología de la Master Curve (MC). En este contexto, el uso de probetas mini-C(T) ha sido validado en numerosos aceros utilizados en la industria nuclear, pero su aplicación en otros tipos de aceros ferríticos-perlíticos es muy limitada. Con todo ello, este trabajo proporciona una visión general de los resultados de caracterización a fractura (T_0) en los aceros estructurales S355J2 y S460M, obtenidos mediante el uso de probetas convencionales estandarizadas (1T-C(T) y 0.6T-SE(B)) y probetas mini-C(T). Aquí se muestra cómo, para estos aceros estructurales en particular, el uso de probetas miniaturizadas proporciona estimaciones de T_0 que son comparables a los valores obtenidos con probetas convencionales de mayor tamaño.

PALABRAS CLAVE: Mini-C(T); Región Transición Dúctil Frágil; Temperatura de Referencia; Master Curve; Aceros Estructurales.

ABSTRACT

Miniaturized specimens, such as the mini-C(T), are a robust alternative for characterizing the fracture behavior of structural materials. They are particularly useful when there are constraints related to the amount of available material, irradiation issues, or material heterogeneities, among other possible concerns. Moreover, in ferritic-pearlitic steels, fracture characterization is of particular interest within the ductile-to-brittle transition region, and it is often conducted through the definition of the Reference Temperature (T_0) and the Master Curve (MC) methodology. The use of mini-C(T) test samples has been validated in various steels used in the nuclear industry, but its application in other types of ferritic-pearlitic steels is very limited. In this context, this work provides an overview of the fracture characterization results (T_0) in the structural steels S355J2 and S460M, obtained using conventional standardized specimens (1T-C(T) and 0.6T-SE(B)) and mini-C(T) test samples. It is demonstrated how, for these particular structural steels, the use of miniaturized specimens provides T_0 estimations that are comparable to values obtained with larger conventional specimens.

KEYWORDS: Mini-C(T); Ductile-to-Brittle Transition Region; Reference Temperature; Master Curve; Structural Steels

1. INTRODUCCIÓN

La Master Curve es actualmente una de las herramientas más ampliamente utilizadas para proporcionar una caracterización completa del comportamiento a fractura de la región de transición dúctil-frágil de los aceros ferríticos. La Master Curve permite, mediante el ensayo de pocas probetas (generalmente de 6 a 12), obtener la temperatura de referencia (T_0), que corresponde a la temperatura en la cual la mediana de la tenacidad a la fractura, $K_{Jc(\text{med})}$, para probetas 1T (25.4 mm) de espesor, es igual a $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ [1,2]. Típicamente, T_0 se determina utilizando probetas de fractura de gran tamaño (por ejemplo, SE(B) o C(T)), o en su defecto probetas

Charpy pre-agrietados. Dicho esto, el enfoque de la Master Curve no establece ningún espesor específico de probeta, permitiendo así la implementación de probetas miniaturizadas. Un ejemplo serían las probetas C(T) de espesor 0.16T (o probetas mini-C(T)) (e.g., [3–5]), cuyas dimensiones típicas son $10 \times 9.6 \times 4 \text{ mm}^3$, y que pueden obtenerse por ejemplo a partir de mitades ya ensayadas de probetas Charpy. De esta manera, a partir de la mitad de una probeta Charpy fracturada, se pueden llegar mecanizar hasta 4 probetas mini-C(T). Los resultados de T_0 determinados a través de probetas mini-C(T) ya han sido ampliamente validados en aceros nucleares tanto en condiciones irradiadas como no irradiadas, sin embargo, su aplicación en aceros estructurales es limitada.

En este contexto, este trabajo pretende comparar los valores de T_0 obtenidos utilizando probetas convencionales (tanto C(T) como SE(B)), con los resultados obtenidos mediante probetas mini-C(T). El análisis se realiza con los aceros estructurales S355J2 y S460M, ampliamente utilizados en aplicaciones de ingeniería civil. El objetivo es determinar si la precisión de los resultados obtenidos a través de probetas mini-C(T) es (al menos) tan buena como los obtenidos en acero de grado nuclear.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El acero S355J2 fue suministrado en forma de chapa laminada de 25 mm de espesor, mientras que el acero S460M se suministró en chapa laminada de 15 mm de espesor. Por este motivo la caracterización a fractura de la región de transición se realizó mediante probetas convencionales 1T-C(T) en el caso del acero S355J2, y 0.6T-SE(B) en el caso del S460M. Las tablas 1 y 2 recogen las composiciones químicas de los aceros S355J2 y S460M, respectivamente. La Tabla 3 presenta las propiedades a tracción a temperatura ambiente y las temperaturas de referencia (T_0) obtenidas con probetas convencionales para ambos aceros.

Tabla 1. Composición química del acero S355J2 (wt. %).

C	Si	P	S	Cr	Mn
0.200	0.320	0.012	0.008	0.050	1.390
Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti
0.090	0.060	0.120	0.020	0.014	0.022

Tabla 2. Composición química del acero S460M (wt. %).

C	Si	P	S	Cr	Mn
0.120	0.450	0.012	0.001	0.062	1.490
Ni	Cu	V	Nb	Al	Ti
0.016	0.011	0.066	0.036	0.048	0.003

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los aceros estudiados a temperatura ambiente (TA).

Material	$\sigma_{y,TA}$ (MPa)	$\sigma_{u,TA}$ (MPa)	$\epsilon_{max,TA}$ (%)	T_0 (°C)	Tipo probeta
S355J2 [6]	376	558	15	-133	1T-C(T)
S460M [7]	473	595	30.0	-92	0.6T-SE(B)

La caracterización de la región de transición dúctil-frágil mediante probetas convencionales se realizó en trabajos anteriores [6] para el S355J2 y [7] para el S460M, de acuerdo a la normativa ASTM E1921 [1]. Aquí basta con señalar que para el acero S355J2 se realizaron un total 13 ensayos, a tres temperaturas diferentes (-100, -120 y -150 °C), resultando una T_0 de -133 °C. Por otro lado, para el

acero S460M, se llevaron a cabo 14 ensayos, de nuevo a tres temperaturas diferentes (-100, -120, -140 °C), calculando una T_0 de -92 °C.

Este trabajo se centra en la caracterización a fractura empleando el método de la Master Curve junto con probetas mini-C(T), siguiendo nuevamente las indicaciones de la ASTM E1921 [1]. El procedimiento de la Master Curve requiere de un único parámetro del material, K_0 (el parámetro de escala), para ser definido. Además, K_0 solo depende de la temperatura de referencia del material (T_0), que como ya se explicó anteriormente, representa la temperatura a la cual la mediana de la tenacidad a fractura ($K_{Jc,med}$), en probetas de espesor 1T (25.4 mm), es 100 MPa√m. Una vez definida la T_0 para el material a analizar, la Master Curve se puede calcular para cualquier probabilidad de fallo (P_f) utilizando la ecuación:

$$K_{Jc,Pf} = 20 + \left[\ln \left(\frac{1}{1-P_f} \right) \right]^{1/4} \cdot \{11 + 77 \cdot \exp[0.019 \cdot (T - T_0)]\} \quad (1)$$

Además, cuando T_0 se calcula mediante ensayos con probetas de un espesor distinto a 1T (25.4 mm), la Master Curve propone una corrección para convertir el valor real de K_{Jc} en el equivalente $K_{Jc(1T)}$ correspondiente. Para ello se utiliza la siguiente ecuación (siendo B el espesor real de la probeta ensayada):

$$K_{Jc(1T)} = 20 + [K_{Jc} - 20] \left(\frac{B}{25.4} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Las probetas mini-C(T) de este trabajo fueron extraídas de los remanentes de las probetas de fractura convencionales ensayadas (i.e., 1T-C(T) y 0.6T-SE(B)). Para ambos aceros se obtuvieron un total de 19 probetas mini-C(T), que fueron fabricadas siguiendo la geometría mostrada en la Figura 1. Es importante tener en cuenta que las probetas mini-C(T) siguen la misma orientación que las probetas de gran tamaño (i.e., T-L) y que además el material empleado no ha sufrido ningún tipo de plastificación proveniente de los ensayos originales.

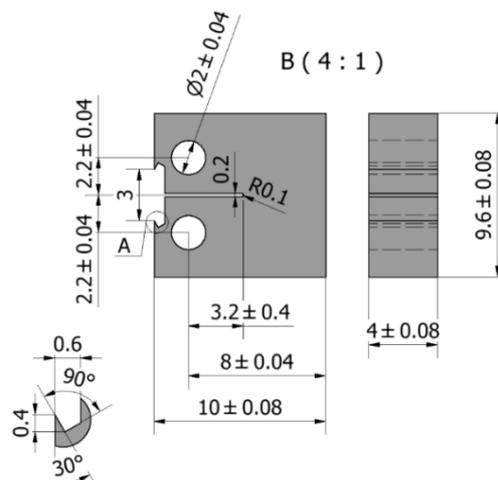


Figura 1. Dimensiones (mm) de las probetas mini-C(T) empleadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tablas 4 y 5 recogen los resultados de $K_{Jc,0.16T}$ obtenidos en los diferentes ensayos realizados con probetas mini-C(T) (4 mm de espesor, 0.16T)) para los aceros S355J2 y S460M, respectivamente. En las mismas tablas se añaden los principales datos necesarios para realizar el análisis de la Master Curve, incluyendo la conversión de resultados de 0.16T a valores equivalentes de 1T ($K_{Jc,1T}$) y la medición de las longitudes iniciales de la fisura (a_0). Además, la tabla recopila los valores correspondientes de K_{Jc} límite ($K_{Jc,limit}$) establecidos por la ASTM E1921 [1] (ver ecuación (3)) utilizados para la censura de datos. Los valores de δ_i se refieren a la condición censurada/no censurada del resultado de la prueba, con $\delta_i=1$ para resultados no censurados y $\delta_i=0$ para los censurados.

$$K_{Jc,limit} = \left(\frac{E \cdot b_0 \cdot \sigma_y}{30 \cdot (1 - \nu^2)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Donde b_0 es el ligamento remanente y ν es el coeficiente de Poisson. Es importante destacar que en el caso del S355J2, 16 ensayos fueron válidos, ya que 2 probetas tenían un valor de a/W ligeramente superior a 0.55 (límite de la norma) y otra se encontraba fuera del rango de temperaturas establecido por la ASTM E1921 ($T_0 \pm 50^\circ C$) [1]. El acero S460M presenta únicamente 6 ensayos válidos debido a que la gran mayoría presentaban un valor $a/W > 0.55$.

Tabla 4. Resultados de fractura usados para el análisis de la Curva Maestra para el S355J2. Valores de K_{Jc} en $MPa\sqrt{m}$.

Code	T (°C)	$K_{Jc,0.16T}$	$K_{Jc,limit}$	a_0 (mm)	δ_i	$K_{Jc,1T}$
02	-145	68.3	122.0	4.31	1	50.4
03	-155	66.6	127.1	4.27	1	49.4
05	-120	112.8	112.8	4.38	0	78.5
06	-130	115.2	115.2	4.40	0	80.0
07	-145	75.8	118.2	4.53	1	55.2
08	-145	56.5	124.3	4.17	1	43.0
09	-135	118.9	118.9	4.26	0	82.3
10	-145	98.4	121.6	4.33	1	69.4
11	-145	117.1	126.5	4.03	1	81.2
13	-145	107.4	120.4	4.40	1	75.0
14	-165	81.4	136.7	4.05	1	58.7
15	-145	64.0	120.9	4.37	1	47.7
16	-140	70.8	118.5	4.40	1	52.0
17	-140	108.4	118.7	4.39	1	75.7
18	-140	81.1	120.6	4.27	1	58.5
19	-155	83.9	129.1	4.16	1	60.2
20	-140	74.9	120.7	4.27	1	54.6
21	-140	81.2	115.9	4.56	1	58.5
22	-135	78.7	117.0	4.38	1	57.0

Tabla 5. Resultados de fractura usados para el análisis de la Curva Maestra para el S460M. Valores de K_{Jc} en $MPa\sqrt{m}$.

Code	T (°C)	$K_{Jc,0.16T}$	$K_{Jc,limit}$	a_0 (mm)	δ_i	$K_{Jc,1T}$
01	-100	269.0	127.1	4.54	0	84.4
02	-120	151.2	138.3	4.19	0	94.5
03	-130	224.7	134.5	4.55	0	92.1
04	-135	186.9	136.3	4.53	0	93.3
05	-145	99.3	142.2	4.40	1	70.0
06	-145	45.8	143.9	4.31	1	36.3
08	-140	166.4	137.7	4.54	0	94.1
09	-145	171.0	143.9	4.31	0	98.0
10	-150	100.9	141.9	4.51	1	70.9
11	-150	122.2	136.1	4.78	1	84.4
12	-155	95.2	139.6	4.71	1	67.4
13	-155	92.4	143.1	4.54	1	65.6
14	-155	47.1	143.7	4.51	1	37.1
15	-150	81.4	139.2	4.63	1	58.7
16	-150	70.1	143.2	4.44	1	51.5
17	-150	91.3	146.0	4.30	1	64.9
18	-150	76.6	140.0	4.60	1	55.6
19	-150	103.4	141.2	4.54	1	72.5
20	-150	104.0	137.8	4.70	1	72.9

T_0 fue finalmente determinado siguiendo la metodología multi temperatura definida en [1]. En este sentido, la T_0 para el acero S533J2 fue de $-105^\circ C \pm 6.9^\circ C$. Sin embargo, para el caso del S460M, debido al alto número de datos descartados, se determinó un T_{0Q} de $-123^\circ C \pm 10.2^\circ C$ (T_{0Q} indica que la temperatura de referencia obtenida no cualifica como T_0 según ASTM E1921). Si comparamos estos valores con los T_0 obtenidos con probetas convencionales (mostrados en la Tabla 3), el acero S355J2 presenta una diferencia de $+27.5^\circ C$, mientras que el acero S460M tiene una diferencia de $-30.4^\circ C$.

La literatura muestra cómo las probetas mini-C(T) obtenidas con acero nuclear presentan desviaciones de T_0 en el rango de $\pm 30^\circ C$ al compararlos con los valores de T_0 obtenidos con probetas convencionales [8]. En este sentido, los T_0 obtenidos con los aceros S355J2 y S460M se encuentran cerca de estos límites máximos. Las figuras 2 y 3 muestran el resultado de los análisis Master Curve, junto con los resultados experimentales individuales, para los aceros S355J2 y el S460M, respectivamente. Las ecuaciones de las diferentes curvas (5%, 50% y 95%) se derivan de la ecuación (1). Puede observarse cómo la metodología de la Master Curve proporciona en ambos casos un buen ajuste de los resultados experimentales.

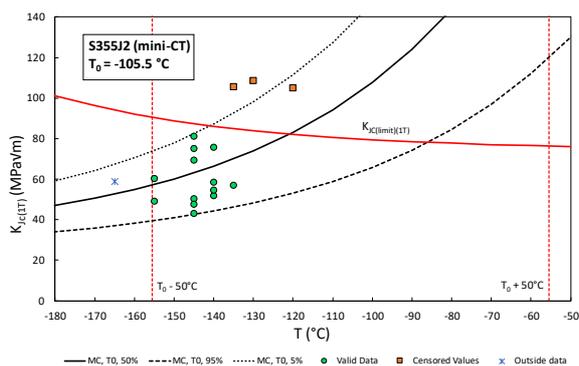


Figura 2. Análisis Master Curve con probetas mini-C(T) para el acero S355J2.

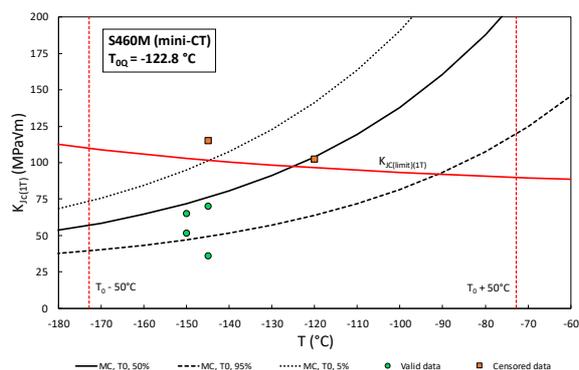


Figura 3. Análisis Master Curve con probetas mini-C(T) para el acero S460M.

Finalmente, las superficies de fractura de las probetas mini-C(T) fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). El objetivo era verificar que las premisas básicas del enfoque de la Master Curve se cumplían también en probetas mini-C(T): en primer lugar, que la fractura es causada por micromecanismos de clivaje siguiendo la teoría del eslabón más débil, implicando, entre otras cosas, que existe un solo punto de iniciación; en segundo lugar, que el punto de iniciación se encuentre alrededor de la mitad del espesor de la probeta, donde las condiciones de confinamiento son máximas (i.e., alta triaxialidad). Las Figuras 4 y 5 muestran un ejemplo de las superficies de fractura observadas en las probetas mini-C(T) para los aceros S355J2 y el S460M. En ellas se puede observar un solo punto de iniciación relativamente centrado. Este patrón se observó en todas las probetas sometidas al análisis fractográfico.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza la aplicación de la metodología de la Master Curve para la caracterización a fractura de los aceros estructurales de resistencia media S355J2 y S460M utilizando probetas mini-C(T) (0.16T o 4 mm de espesor). El programa experimental desarrollado con probetas mini-C(T) proporcionó un valor de T_0 de -105 °C para el S355J2 y un T_{0Q} de -123 °C en el caso del S460M. Estos resultados presentan una desviación

razonable con el valor de T_0 derivado de probetas convencionales (25 y 15 mm de espesor), indicando el potencial de esta geometría de probetas para caracterizar T_0 en aceros estructurales.

Finalmente, se ha observado que los micromecanismos de fractura observados en las probetas mini-C(T) analizados están en consonancia con los supuestos de la Master Curve.

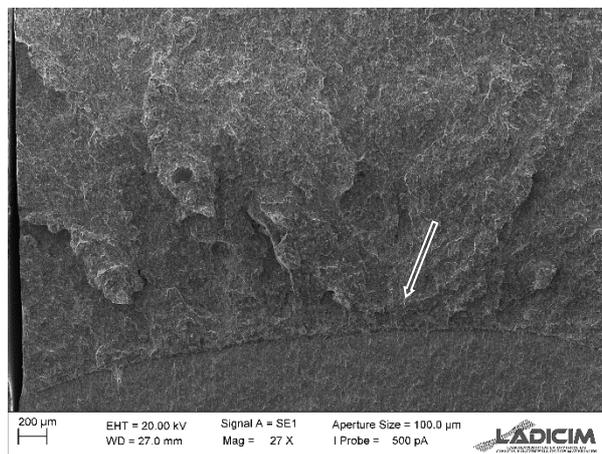


Figura 4. Ejemplo de la superficie de fracture observada en la probeta S355J2_13.

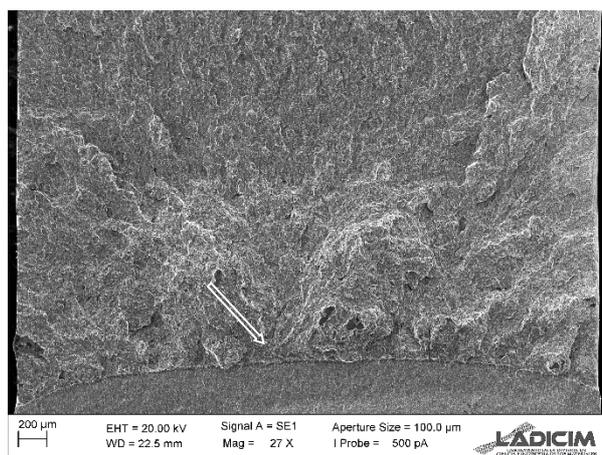


Figura 5. Ejemplo de la superficie de fracture observada en la probeta S460M_05.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación de: “Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement N° 900014.”

REFERENCIAS

- [1] ASTM E1921-21, *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range*, ASTM International, (2021) West Conshohocken, PA, USA.
- [2] Wallin, K. *The Master Curve Method: A New Concept for Brittle Fracture*, Int. J. Mater. Prod. Technol., (1999) 14, p. 342.

- [3] Yamamoto, M., Kimura, A., Onizawa, K., Yoshimoto, K., Ogawa, T., Chiba, A., Hirano, T., Sugihara, T., Sugiyama, M., Miura, N., and Soneda, N. *A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens: First Round Robin Test on Uniform Specimens of Reactor Pressure Vessel Material*, Proceedings of ASME PVP 2012 Conference (2012), pp. 73–79.
- [4] Miura, N., and Soneda, N. *Evaluation of Fracture Toughness by Master Curve Approach Using Miniature C(T) Specimens*, Proceedings of ASME PVP 2010 Conference (2010), pp. 593–602.
- [5] Chaouadi, R., Walle, E. V., Scibetta, M., and Gérard, R. *On the Use of Miniaturized Ct Specimens for Fracture Toughness Characterization of RPV Materials*. Proceedings of ASME PVP 2016 Conference (2016), pp. 1–10.
- [6] Cicero, S., Madrazo, V., García, T., Cuervo, J., and Ruiz, E. *On the Notch Effect in Load Bearing Capacity, Apparent Fracture Toughness and Fracture Mechanisms of Polymer PMMA, Aluminium Alloy Al7075-T651 and Structural Steels S275JR and S355J2*, Eng. Fail. Anal. (2013) 29, pp. 108–121.
- [7] Cicero, S., García, T., and Madrazo, V. *Application and Validation of the Notch Master Curve in Medium and High Strength Structural Steels*, J. Mech. Sci. Technol. (2015) 29(10), pp. 4129–4142.
- [8] Sánchez, M., Cicero, S., Kirk, M., Altstadt, E., Server, W., and Yamamoto, M. *Using Mini-CT Specimens for the Fracture Characterization of Ferritic Steels within the Ductile to Brittle Transition Range: A Review*, Metals (2023), 13(1).