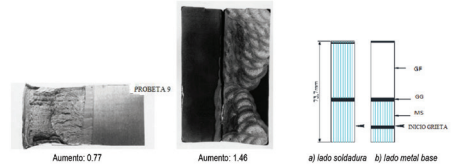


Análisis de la tenacidad a la fractura en la zona afectada por el calor (ZAC) de un acero HSLA



Analysys of the fracture toughness in the heat affected zone (HAZ) of one HSLA steel



Manuel Viseras Pico¹, María Carmen Carnero^{2,3}, Rafael González-Palma¹ y Aurelio Muñoz Rubio¹

¹ Universidad de Cádiz. Campus Universitario de Puerto Real. Avda. Universidad de Cádiz, 10 - 11519 Puerto Real, Cádiz (España).

² Universidad de Castilla-La Mancha. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, Avda. Camilo José Cela, s/n, 13071 Ciudad Real (España).

³ Universidade de Lisboa. CEG-IST, Instituto Superior Técnico. Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-004 Lisboa (Portugal).

DOI: <https://doi.org/10.6036/10506> | Recibido: 24/feb/2022 • Inicio Evaluación: 01/mar/2022 • Aceptado: 16/may/2022

To cite this article: VISERAS-PICO, Manuel; CARNERO, María-Carmen; GONZALEZ-PALMA, Rafael; MUÑOZ-RUBIO, Aurelio. ANALYSIS OF THE FRACTURE TOUGHNESS IN THE HEAT AFFECTED ZONE (HAZ) OF ONE HSLA STEEL. DYNA September - October 2022. vol. 97, n.5, pp.543-548. DOI: <https://doi.org/10.6036/10506>

FINANCIACIÓN

Universidad de Castilla-La Mancha

ABSTRACT

- The original contribution of the experimental research described here is intended to ensure that the K_{IC} fracture toughness in the heat affected zone (HAZ) of USITEN 355 0.5 Ni Grade 1 steel produces a CTOD (δ) (Crack Tip Opening Displacement) within the standard values, making the steel compatible with the welding procedure used and the heat energy supplied, which is 2 kJ/mm, in order to confirm that the grain size braking mechanism carried out by the microalloying agents (V, Nb, Al) of the base metal are working as intended. A further aim is to ensure, as far as possible, a correlation between the welding parameters and the results obtained from the fracture tests, in such a way that, should the results of the tests be unsatisfactory, the appropriate solution can be applied to the weld so that the parameters that govern the fracture tests are acceptable. The work developed here is useful as a guide and reference for future research on fracture mechanics in microalloyed steels.
- **Keywords:** HSLA, Fracture toughness, CTOD, HAZ, heat input energy, SMAW.

RESUMEN

Con la aportación original del trabajo experimental de investigación aquí realizado, se pretende asegurar que la tenacidad a la fractura K_{IC} en la zona afectada por el calor (ZAC) del acero USITEN 355 0,5 Ni grado I, produce un CTOD (δ) (Crack Tip Opening Displacement) con valores dentro de la norma, haciendo compatible el acero con el procedimiento de soldadura utilizado y la energía calorífica aportada de 2 kJ/mm, comprobando que el mecanismo de frenado del tamaño de grano llevado a cabo por los microaleantes (V, Nb, Al) del metal base funcionan conforme lo previsto. Además, se intenta asegurar, en la medida de lo posible, una correlación entre los parámetros de soldadura y los resultados obtenidos en los ensayos de fractura, de tal forma que, si los resultados obtenidos en los ensayos no fueran satisfactorios, se pudiese aplicar la solución adecuada en el soldeo para que los parámetros que regulan los ensayos de fractura sean aceptables. El trabajo aquí desarrollado es útil como guía y referencia para futuros trabajos de

investigación de mecánica de la fractura en aceros microaleados.

Palabras clave: HSLA, Tenacidad a la fractura, CTOD, ZAC, energía calorífica aportada, SMAW.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros *High Strength Low Alloy* (HSLA) son utilizados para estructuras que requieren un alto grado de resiliencia y tenacidad a la fractura por estar sometidas a bajas temperaturas de transformación, que le confieren ductilidad a esas temperaturas [1], [2]. Para ello, se limita la energía calorífica aportada a 2 kJ/mm [3] en el panel soldado bajo el proceso de soldadura *Shield Metal Arc Welding* (SMAW), es decir, soldadura manual con electrodos con revestimiento básico. De este panel soldado se extraerán las probetas bajo las condiciones de diseño, que serán sometidas a ensayos de mecánica de la fractura, dureza y resiliencia, así como, análisis metalográfico mediante microscopía óptica. Los ensayos de mecánica de la fractura se llevarán a cabo en probetas en dos fases sin tratamiento térmico posterior a la soldadura. La primera fase es un ensayo de fractura por fatiga, llevado a cabo a temperatura ambiente, en el que se determinarán la longitud de grieta (a_c) [4], su velocidad de crecimiento (da/dN) y el factor de intensidad de tensiones (K_{rmax}) (aspecto que se ha analizado en Viseras et al. (2022) [5]). En la segunda fase del ensayo, que se llevará a cabo a una temperatura de -10°C , se determinarán la apertura de la grieta en su extremo *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) (δ) [6], [7] cuando la probeta es sometida a una carga P produciendo la extensión de la grieta y rotura de la probeta o bien la parada del ensayo, cuando no se llega a producir la rotura, alcanzando la máxima carga P [8]. El estudio metalográfico permitirá determinar los porcentajes de tamaño de grano que la grieta atraviesa en la máxima carga aplicada en su rotura, punto de iniciación de la grieta y longitud de microestructura que la grieta atraviesa, estudio comparativo en la ZAC del tamaño de grano con la longitud de la grieta y carga a la que es sometida. Este trabajo constituye la segunda parte de un ensayo de mecánica de la fractura CTOD; en la primera parte del ensayo se analiza la fractura por fatiga, cuyos resultados se pueden revisar en [5]. Estudios similares, pero con distintos aceros, han sido publicados en [9] y [10].

El resto del artículo se organiza como se expone a continuación: En la sección 2 se describen los materiales y métodos empleados en la investigación. En la sección 3 se muestran los re-

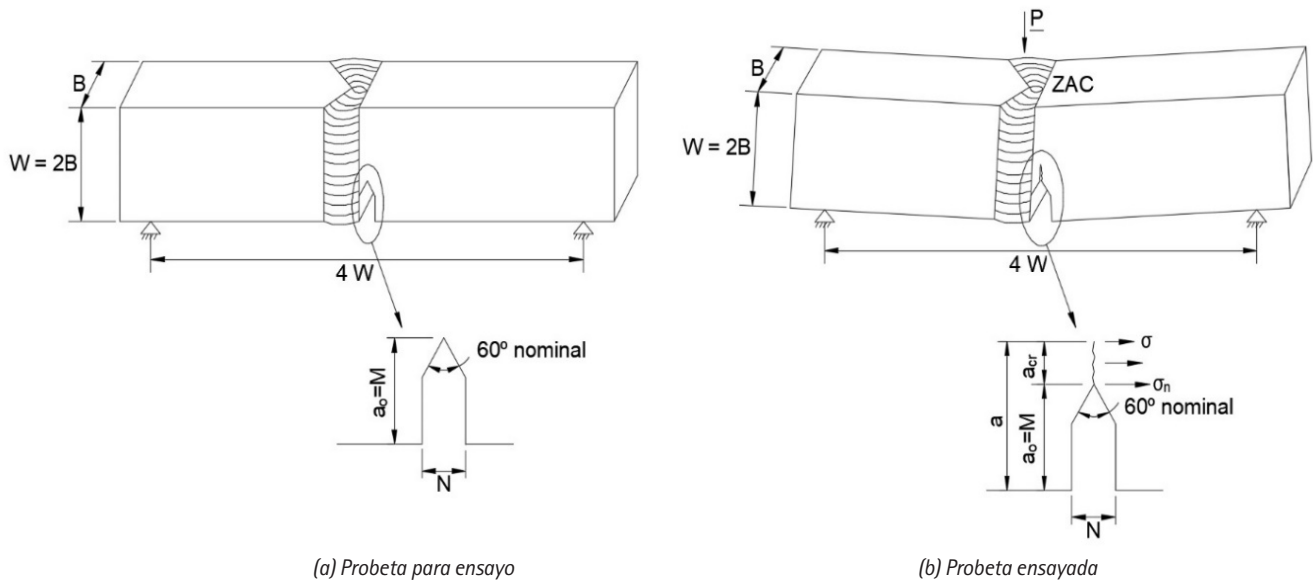


Fig. 1. Representación esquemática de la probeta en el ensayo de tenacidad a fractura CTOD

sultados de los ensayos de mecánica de la fractura CTOD, prueba previa de metalografía y ensayo metalográfico. En la sección 4 se recogen las principales conclusiones seguidas de las referencias y el material suplementario.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

El material utilizado en esta investigación es un acero USI-TEN 355 0,5 Ni. Este material se encuentra en total conformidad con los requisitos de Grado I, donde se especifican la composición química y propiedades mecánicas para las planchas de 75 mm de espesor (véase la sección de Material Suplementario), considerando que las propiedades corresponden a un acero normalizado sin tratamiento térmico, estas características son suministradas por el fabricante del acero, con el que se ha preparado un panel soldado bajo el proceso de soldadura antes indicado y del que se extraen las probetas a ensayar. Este acero pertenece al grupo de aceros HSLA, utilizados en estructuras sometidas a condiciones extremas de trabajo (Plataformas Off-shore, Construcción Naval y Obra Civil).

2.2. MÉTODOS

La investigación se ha efectuado en doce probetas que han sido extraídas de un panel soldado con una energía calorífica aportada de 2 kJ/mm, sin tratamiento térmico post-soldado [11]. Las probetas han sido obtenidas en la geometría preferida Bx2B, de conformidad con la norma BS5762:1979 [12], con las siguientes dimensiones:

- Longitud: L=600 mm.
- Ancho: W=150 mm.
- Espesor: B=75 mm.

Para proceder a los ensayos de mecánica de la fractura CTOD [13], en sus dos fases, prefisurado por fatiga [14] y ensayo de fractura, se han efectuado entallas en las probetas en la región de grano grueso de la ZAC próxima a la línea de fusión y de profundidad aproximadamente $B=W/2$, conforme la norma BS5762:1979 [12] (véase la Fig. 1).

3. RESULTADOS

3.1. ENSAYO DE MECÁNICA DE LA FRACTURA CTOD

Los ensayos de CTOD constan de dos partes. La primera parte es sobre los ensayos de fractura por fatiga, de la que se puede obtener información más detallada en la sección de material suplementario. La segunda parte es relativa a los ensayos de tenacidad a la fractura, que es la que se describe en este artículo.

Los resultados obtenidos en la segunda parte del ensayo, tenacidad a la fractura (CTOD) [7], [13] que se lleva a cabo con una carga fija P sin vibración y con una temperatura de -10 °C, se muestran en la Tabla 1 [14]. El crecimiento estable es $\delta_{CE} = a_f - a$. La longitud de grieta (a) es la suma de la entalla mecanizada (a_0) más la fractura por fatiga a_f , es decir: $a = a_0 + a_f$ [15]. V_p representa la apertura plástica en la boca de la grieta (véase la Fig. 2). P es la fuerza aplicada a la probeta hasta el final del ensayo. K_{fmax} es el factor de intensidad de tensiones en la fractura por fatiga, prefisurado por fatiga, según la primera parte del ensayo de CTOD efectuado. K_{IC} es la tenacidad a la fractura siendo una propiedad de cada material. En este caso de valor variable en la ZAC. Los CTOD elástico y plástico vienen dados por las ecuaciones:

$$\delta_e = \frac{K_{IC}^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E}; \delta_p = \frac{r \cdot (W-a) \cdot V_p}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a + Z}; \delta = \delta_e + \delta_p; K_{IC} = \frac{Y P}{B \cdot \sqrt{W}}$$

$Y=f(a/W)$, según la norma BS5762:1979 [12]; a es la longitud de la grieta en el prefisurado por fatiga tomada del ensayo. V_p es la apertura de la boca de la grieta, tomada del ensayo; $r=0,4$ (factor rotacional determinado experimentalmente), viene dado por la norma; $Z=3$ mm, es la altura de las cuchillas donde se apoya el sensor para la apertura de la grieta, siendo $V_g = V_p + V_e$ la apertura total (elástica +plástica) determinada en la gráfica del ensayo (véase la Fig. 3).

Aunque no existe una relación directa, se puede apreciar en la Tabla 1 que los mayores valores de crecimiento estable δ_{CE} , se corresponden con mayores valores de CTOD (δ), como es el caso de las probetas 2 y 8, debido a que existe una menor longitud de grieta, que produce un mayor valor de δ_{CE} y una mayor apertura de grieta antes de alcanzar la máxima tenacidad a la fractura (K_{IC}), llegando a un valor máximo de carga en el ensayo sin que se produzca la fractura [16], [17], [18]. Comparando los valores del factor de intensidad de tensiones K_{fmax} de la Tabla 1 con la tenacidad a la fractura K_{IC} se aprecia que ambos valores difieren en una cuantía importante, así como la comparación del límite elástico σ_{ys} con la tensión aplicada

Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B (mm)	75,0	74,7	75,0	76,0	75,2	75,6	75,8	75,6	74,5	76,6	75,8	75,9
W (mm)	151,0	151,8	151,8	151,2	150,9	150,7	150,6	149,7	150,7	150,2	150,7	151,9
$a_0=M$ (mm)	69,94	69,93	70,00	69,82	69,75	69,74	69,73	69,40	69,31	69,62	69,74	70,03
a_{cr} (mm)	4,56	2,57	3,60	4,58	4,65	4,46	4,27	3,10	4,69	4,88	5,46	4,27
a (mm)	74,5	72,5	73,6	74,4	74,4	74,2	74,0	72,5	74,0	74,5	75,2	74,3
a_f (mm)	75,0	75,3	73,9	74,4	74,7	74,3	74,0	76,1	74,1	74,8	75,2	74,3
$\delta_{CF}=a_f-a$ (mm)	0,5	2,8	0,3	0,0	0,3	0,1	0,0	3,6	0,1	0,3	0,0	0,0
P (10 ³ N)	444,0	570,0	432,0	424,0	410,0	408,0	298,0	574,0	408,0	418,0	380,0	358,0
V_p (mm)	2,92	17,60	1,96	1,72	1,44	1,20	0,16	14,16	1,28	1,68	0,52	0,32
σ_{ys} (MPa)	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405
σ_{cr} (MPa) (***)	271,75	344,39	297,35	265,51	267,24	270,97	276,93	318,15	267,96	259,05	250,07	273,03
δ_e (mm) (*)	0,14	0,23	0,12	0,12	0,12	0,11	0,06	0,25	0,12	0,12	0,10	0,08
δ_p (mm) (*)	0,82	4,94	0,57	0,49	0,41	0,34	0,05	3,84	0,36	0,47	0,14	0,09
δ (mm) (**)	0,96	5,17	0,69	0,61	0,53	0,45	0,11	4,09	0,48	0,59	0,24	0,18
K_{fmax} (MPa m ^{1/2})	46,08	43,84	44,80	45,12	45,76	45,44	45,44	44,48	46,08	45,44	46,40	44,8
K_{IC} (MPa m ^{1/2})	158,74	204,13	154,08	149,54	146,27	144,90	105,60	204,54	147,04	149,31	138,27	125,54
Tipo de fractura (**)	u	m	u	u	u	u	c	m	u	u	c	u
Valida BS5762	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	No

(*) Son los componentes elásticos (δ_e) y plásticos (δ_p) de la tenacidad a la fractura CTOD respectivamente.

(**) El símbolo «u» es usado cuando hay evidencia importante de que un pop-in o una fractura inestable es precedida de un alargamiento dúctil, por el contrario, «m» indica que la máxima fuerza fue alcanzada. «c» indica una fractura inestable por clivaje; este criterio únicamente se utiliza cuando no hay evidencia de un crecimiento de grieta lento y estable (desgarro dúctil).

(***) Crack Tip Opening Displacement (CTOD). Desplazamiento de apertura de la grieta (componente elástica más componente plástica)

Tabla 1. Tabla de datos del ensayo la tenacidad a la fractura CTOD

en el extremo de la grieta σ_{cr} , es decir, la grieta se propaga a valores inferiores al límite elástico lo que implica un resultado positivo al no producirse en ningún caso el colapso plástico [19]. Todos los valores corresponden a los resultados de los ensayos en la ZAC.

En la Fig. 2 se puede apreciar la sección de la entalla durante la prueba CTOD donde se han incluido los valores de V_p , W , a , $r(W-a)$ y z . En la Fig. 3 se indican las áreas elástica y plástica, el desplazamiento plástico V_p y el desplazamiento total de la galga V_g [14/16]. El desplazamiento elástico viene dado por la diferencia $V_e = V_g - V_p$, en el que el término plástico supone un aparente centro de rotación, mecanismo de bisagra bajo la grieta, durante la porción plástica del ensayo, donde r toma el valor de 0,4. Siendo

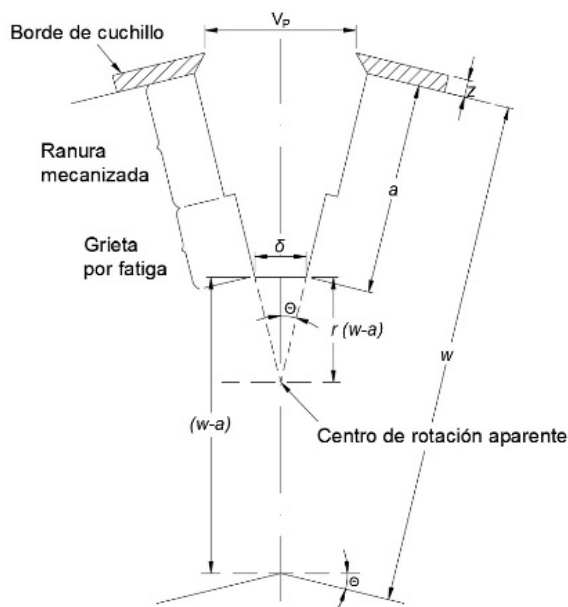


Fig. 2. Ensayo de flexión en tres puntos CTOD

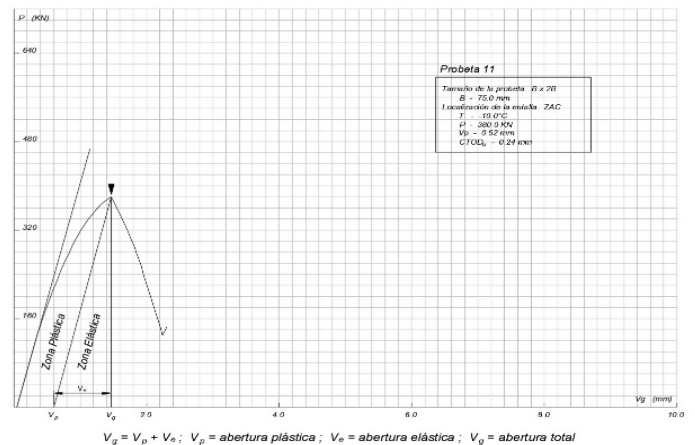


Fig. 3. Diagrama de carga (P) frente al desplazamiento total de apertura de la grieta (V_g), registrado durante el ensayo de la probeta 11.

$\delta = \delta_e + \delta_p$ el desplazamiento de apertura de la grieta por fatiga.

Cooper *et al.* [20] trabajaron en los efectos de la temperatura y la velocidad de carga sobre la apertura de la grieta δ . Como se podría esperar, los efectos de la temperatura, velocidad de carga y el espesor de la probeta son similares a los efectos de estos parámetros sobre el resultado de los ensayos de K_{IC} o ensayo Charpy (CVN) [21], [22], es decir, incrementando la temperatura, el valor de δ aumenta [23] mientras que, con el incremento de la velocidad de carga o el espesor, los valores de δ decrecen.

La Fig. 3 representa el diagrama de carga frente al desplazamiento total de apertura de la grieta obtenido para la probeta 11. Se puede apreciar la carga P máxima aplicada (380 kN) y cómo determinar los desplazamientos de apertura de la grieta V_p y V_g para calcular los CTOD plásticos y elásticos. En este caso el resultado del CTOD viene determinado por δ_e (véase la Tabla 2).

De los resultados obtenidos del ensayo [24] se aprecia que los valores correspondientes a las probetas 7 y 12 son inferiores a lo

requerido por la norma BS5762:1979 [12], tanto plástico como elástico. La probeta 7 registra una fractura inestable para una carga de 298 kN, la menor carga aplicada en las doce probetas, con el valor más bajo de tenacidad a la fractura $K_{Ic}=105,60 \text{ MPa m}^{1/2}$. Como se mostrará en la Tabla 2, en estas probetas, la grieta atraviesa las mayores longitudes de microestructura en zonas próximas a LF como la región de grano grueso (GG) en la ZAC o en el metal de soldadura (MS) por proximidad a esta región, lo que justifica, en ambos casos, la baja tenacidad a la fractura [8]. En las restantes probetas, se obtuvieron valores de δ aceptables, por encima de los 0,2 mm. Las probetas 2 y 8 alcanzaron los valores máximos de carga aplicada, 570 kN y 574 kN respectivamente, y proporcionaron los valores mayores de CTOD (δ) y de tenacidad a la fractura (K_{Ic}). Como consecuencia de ello se obtuvieron los menores valores de longitudes de grieta crítica (a_{cr}) con 2,57 mm y 3,10 mm respectivamente; esto produjo que se liberara menos tensión en su extremo, dando los mayores valores de σ_{cr} de 344,39 MPa y 318,15 MPa respectivamente, siendo sus crecimientos estables (δ_{ce}) los mayores, con valores de 2,8 mm y 3,6 mm, llegando en ambos casos, a la máxima carga aplicada sin producir la rotura de las probetas.

3.2. PRUEBA PREVIA DE METALOGRAFÍA. VALORACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

La valoración del tamaño de grano se ha llevado a cabo mediante el método de Heyn conforme la norma ASTM 112-13 (2004) [25]. Los tamaños de grano se clasificaron en las categorías y regiones de la ZAC según la distancia a la LF y la temperatura pico (T_p) alcanzada [26] (Apartado A4 de material suplementario).

En la Fig. 4 se representan los detalles metalográficos de la probeta 9. En la Fig. 4 (a) se muestra la sección transversal de esta probeta 9 después de la fractura, en la que se puede apreciar el tipo de fractura que ha ocurrido durante el ensayo por fatiga. Si la sección tiene un color gris plomizo es indicativo de una fractura plástica y dúctil, que tiene lugar cuando se alcanza el valor crítico. Si la sección presenta un aspecto brillante indica que se ha producido una fractura frágil sin que se haya alcanzado el valor crítico, cuya propagación se ha producido por un desgarre laminar [27], [28]. En la Fig. 4 (b) se puede apreciar la entalla mecánica que se hace en la línea de fusión con objeto de facilitar el prefisurado por fatiga. Debido a la irregularidad de dicha línea que separa el metal aportado de la ZAC, a veces dicha entalla penetra en la soldadura. La Fig. 4 (c) representa esquemáticamente las regiones de la ZAC atravesadas por la grieta en el 80% central del espesor de la probeta, desde el lado de la soldadura con un 4% de grano grueso

atravesado por la grieta y desde el lado del metal base con un 5% de grano grueso atravesado por la grieta. La flecha indica el comienzo de la grieta a 62 mm de la cara de la soldadura iniciándose en el metal de soldadura (MS), dada su proximidad a la LF.

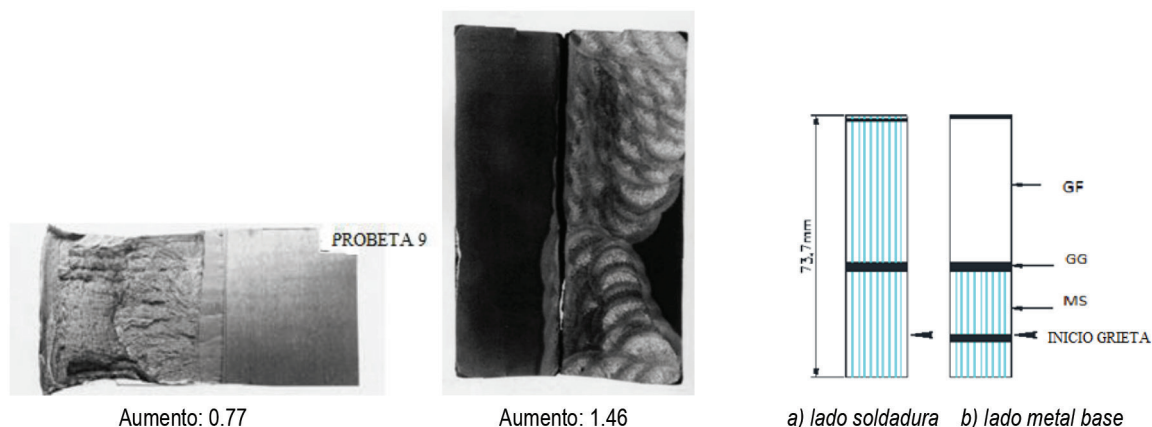
En todos los casos la entalla mecanizada fue colocada en la ZAC, adyacente a la LF (véase la Fig. 1 (a)), de dimensiones $a_0=M$ que consistió en una entalla de $N=2,5 \text{ mm}$ de ancho [12] y profundidad aproximada de 70 mm, acabada en un perfil en V a 45° para facilitar el comienzo de la grieta por fatiga [29] (véase la Fig. 1 (b)). Dado que el panel fue ensayado en condiciones *as welded*, sin tratamiento térmico post soldeo, se aplicó una precompresión lateral de la probeta de 0,5% del espesor de esta, para asegurar su cumplimiento conforme la norma BS5762:1979 [12] y una mejor observación del crecimiento estable (δ_{ce}). Esta compresión fue aplicada antes del prefisurado por fatiga. La prueba de tenacidad a la fractura CTOD se llevó a cabo de acuerdo con la norma BS5762:1979 [12].

3.3. ENSAYO METALOGRÁFICO

En la Tabla 2 se indican los porcentajes de microestructura atravesados por la grieta en el 80% del espesor, tanto del lado del metal base (LMB) como del lado del metal de soldadura (LMS), medidos en el 80% de su espesor, así como las longitudes de microestructura atravesado por la grieta en las distintas regiones de la ZAC.

Los resultados obtenidos en el ensayo metalográfico por microscopía óptica se muestran en las Tablas en la que se relaciona la microestructura interceptada por la grieta en una sección de la probeta tomada por su extremo en todo el espesor (Tabla A5) y en el 80% del mismo (Tabla 2), así como su punto de iniciación, como establece la norma (Tabla A6).

En la Tabla 1 se puede apreciar que las probetas 1, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11 y 12 tienen las menores tensiones críticas aplicadas (σ_{cr}) donde la grieta crítica es mayor (a_{cr}) con valores de CTOD no muy altos y atraviesan las mayores longitudes de grano grueso más metal de soldadura (MS+GG) en la ZAC, véase Tabla 2. Las probetas 7 y 12 con menores valores de CTOD, $\delta_c=0,11$ y $\delta_u=0,18$, iniciaron la grieta en la región de grano grueso (véase Tabla A6), atravesando sus mayores longitudes de microestructura en las regiones MS+GG, obteniendo bajos valores de CTOD (δ) y, como consecuencia, un menor valor de tenacidad a la fractura K_{Ic} [32] (véase Tabla 1). Por el contrario, aquellas probetas que tuvieron menores longitudes de grieta atravesando las regiones de MS+GG, como son las probetas 2 y 8, obtuvieron los mejores resultados de CTOD ($\delta_m = 5,17 \text{ mm}$) y ($\delta_m = 4,09 \text{ mm}$), (ver Tabla 2), llegando a



MS: Metal de soldadura; GG: Grano grueso; GF: Grano fino; IC: Región intercrítica.

Fig. 4. Detalles metalográficos para la probeta 9 con proceso de Soldadura SMAW, posición de soldadura 2G y energía calorífica aportada de 2 kJ/mm.

Probeta	CTOD δ (mm) a -10°C	% Grano Grueso en ZAC dentro 80% espesor de probeta			Lado Metal Aportado (soldadura) Longitud de la microestructura atravesada por la grieta por fatiga (mm)					Lado Metal Base (ZAC) Longitud de la microestructura atravesada por la grieta por fatiga (mm)				
		LMS	LMB	Validación	MS	GG	GF	IC	MB	MS	GG	GF	IC	MB
		1	$\delta_u=0,96$	15	14	Q	33,2	14,0	26,6	0,0	0,0	32,7	11,6	28,9
2	$\delta_m=5,17$	44	29	V	20,8	30,5	22,0	0,0	0,0	19,0	28,5	26,2	0,0	0,0
3	$\delta_u=0,69$	18	24	V	33,9	13,9	26,2	0,0	0,0	28,3	17,7	27,8	0,0	0,0
4	$\delta_u=0,61$	23	16	V	9,5	24,5	40,9	0,8	0,0	9,3	19,1	47,3	0,0	0,0
5	$\delta_u=0,52$	31	44	V	27,7	25,9	20,7	0,0	0,0	17,3	34,8	21,9	0,0	0,0
6	$\delta_u=0,45$	17	17	V	29,0	11,5	34,0	0,0	0,0	22,7	11,6	40,1	0,0	0,0
7	$\delta_c=0,11$	19	27	V	40,7	16,3	14,9	0,0	0,0	38,1	22,7	11,4	1,8	0,0
8	$\delta_m=4,09$	26	28	V	16,2	23,3	34,0	0,0	0,0	8,4	24,9	38,7	0,0	0,0
9	$\delta_u=0,48$	4	5	NV	30,8	3,1	39,8	0,0	0,0	29,0	2,9	41,3	0,5	0,0
10	$\delta_u=0,59$	3	4	NV	25,9	1,5	46,6	0,0	0,0	22,2	3,2	46,8	1,8	0,0
11	$\delta_c=0,24$	7	13	NV	63,2	9,3	2,4	0,0	0,0	55,6	14,3	4,6	0,0	0,0
12	$\delta_u=0,18$	7	12	NV	40,1	4,8	30,0	0,0	0,0	36,3	6,9	31,4	0,0	0,0

LMS: Lado Metal Soldadura; LMB: Lado Metal Base; MS: Metal Soldadura; MB: Metal Base (zona no afectada por el calor); GG: Grano Grueso; GF: Grano Fino; IC: Región Intercrítica.

V: Válido tanto por la regularidad del frente de la grieta por fatiga como por el porcentaje mínimo alcanzado del 15% de la estructura del grano grueso en la ZAC atravesado por la grieta dentro del 80% de la zona central del espesor de la probeta; NV: No válido, al no alcanzarse el porcentaje mínimo del 15% del grano grueso atravesado por la grieta, dentro del 80% de la zona central del espesor de la probeta; Q: Cuestionable en cuanto el mínimo porcentaje alcanzado del 15% del grano grueso atravesado por la grieta, dentro del 80% de la zona central del espesor de la probeta.

Tabla 2. Detalles del examen de metalografía óptica. Porcentaje de grano en la ZAC en el 80% del espesor y longitudes de grietas en regiones de la ZAC.

carga al máximo valor sin que se produjera la rotura y, como consecuencia, los mejores valores de tenacidad a la fractura K_{Ic} , una mayor tensión crítica (σ_{cr}) [30], [31] y la menor longitud de grieta crítica (a_{cr}). (véase la Tabla 1).

4. CONCLUSIONES

4.1. RESUMEN DE LOS ENSAYOS

- Las probetas que mostraron valores de CTOD (δ) y tenacidad a la fractura (K_{Ic}) más bajos se relacionan con fracturas inestables en las que la grieta atravesó mayores longitudes de microestructura en zonas próximas a LF, como la región de GG en la ZAC. Esto justifica la baja tenacidad a la fractura en esta región.
- Las probetas que alcanzaron los valores máximos de carga aplicada proporcionaron los mayores valores de CTOD (δ) y de tenacidad a la fractura (K_{Ic}). Como consecuencia, en estas probetas se obtuvieron los menores valores de longitudes de grieta crítica (a_{cr}), lo que originó que se liberara menos tensión en el extremo de la grieta, dando los mayores valores de (σ_{cr}), siendo sus crecimientos estables (δ_{cc}) los mayores y, llegando a la máxima carga aplicada sin producir la rotura de las probetas.
- La investigación se aplica a un material elastoplástico como es el acero por lo que la tensión aplicada en el extremo de la grieta queda restringida al límite de fluencia, debido a la zona plástica que rodea el extremo de la grieta. El tamaño de esta zona plástica viene dado por la expresión de Irwin [32], con un diámetro que representa una pequeña cantidad comparada con el espesor de las probetas, no obstante, la tensión aplicada por encima del límite de fluencia se alcanzaría únicamente al comienzo de la extensión de la grieta, que fue donde la tensión quedó frenada por la plasticidad. El resto de los valores de crecimiento de la grieta proporcionaron valores de tensiones aplicadas inferiores al límite de fluencia.

- De la observación por microscopía óptica se llega a la conclusión que en las probetas en las que la grieta atravesó un mayor porcentaje de MS+GG se obtuvieron menores valores de CTOD y, consecuentemente, menor tenacidad a la fractura. Por el contrario, en aquellas probetas en las que la grieta atravesó un mayor porcentaje de grano fino se obtuvieron mayores valores de CTOD (δ), por tanto, mayor valor de tenacidad a la fractura (K_{Ic}). Esta correlación permite confirmar los valores de tenacidad a la fractura en función de los resultados de la microscopía óptica. No todas las probetas cumplieron el requerimiento de la norma ASTM: E112-13:2004, que pide que al menos un 15% de la grieta atraviese la región de GG en el 80% central del espesor de las probetas.
- Debido a la baja energía calorífica aportada (2 kJ/mm) en la soldadura de las probetas, se obtuvo un valor aceptable de tenacidad a la fractura (CTOD $\delta > 0,2$ mm) [33],[34] excepto en las probetas 7 y 12, que mostraron tener un bajo valor de tenacidad a la fractura, proporcionando un CTOD de 0,11 mm y 0,18 mm respectivamente, que se justifica por el alto porcentaje de microestructura de grano grueso atravesado por la grieta en ambas probetas.

4.2 CONCLUSIONES PRINCIPALES

Las principales conclusiones que se obtienen de los ensayos efectuados en esta investigación son:

- Gracias a la tecnología de la adición de microaleantes, el tamaño de grano en las regiones próximas a la LF alcanza un diámetro aceptable que impide una mayor longitud de grieta crítica (a_{cr}). Esto permite un factor de intensidad de tensiones ($K_{Ic,max}$) en la fractura por fatiga, un crecimiento estable de la grieta (δ_{cc}), una tenacidad a la fractura K_{Ic} y de CTOD (δ) con valores aceptables.
- Se comprueba que una baja energía calorífica aportada (2 kJ/mm), como la obtenida en el proceso SMAW, funciona en la soldadura de estos aceros microaleados, donde los carbonitruros formados por los microaleantes frenan el

tamaño de grano produciendo una mayor tenacidad a la fractura, a bajas temperaturas, aún a pesar del bajo contenido en carbono.

- 3.- De los resultados de estos ensayos de CTOD, así como los obtenidos en los de resiliencia y dureza, el consumible de soldadura con el procedimiento de soldadura utilizado queda homologado para la soldadura de estos aceros USI-TEN 355 0,5 Ni Grado I, en espesor de 75 mm.
- 4.- El procedimiento aquí seguido es válido para futuros trabajos de fractura por fatiga y tenacidad a la fractura elasto-plástica, sobre todo para aceros que requieren una buena tenacidad a bajas temperaturas en condiciones de servicio.

REFERENCIAS

- [1] González-Palma R, Suárez-Bermejo JC, Vicario FJ, Muñoz A. Procesos metalúrgicos de aceros microaleados de alta resistencia 450 EMZ tipo II en la zona afectada térmicamente debido al efecto multipasada en soldaduras por arco sumergido. *Rev. Metal.* 2006. Vol. 42. p. 256-269.
- [2] BS4360 Specification for weldable structural steels. Published July 1986 replaced by BS4360:1990.
- [3] Yang X, D X, Liu X, Wang D, Li C. Effects of heat input on microstructure and fracture toughness of simulated coarse-grained heat affected zone for HSLA steels. *Materials Characterization.* 2019. Vol. 155. Article 109818. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109818>.
- [4] Bäcklund J, Blom AF, Beevers CJ. Fatigue Threshold Fundamental and Engineering Applications. *Engineering Materials Advisory Services Ltd, United Kingdom, vol. I and II, 1982.*
- [5] Viseras M, Gonzalez-Palma R, Carnero-Moya M, Tornell-Barbosa, M. Micro-crack analysis in the study of fatigue fracture in the HAZ in the high yield strength micro-alloyed steels. *DYNA.* 2022. Vol. 97(1). p. 46-52. <https://doi.org/10.6036/10139>.
- [6] British Standard 7448: Part I. Method for determination KIC Critical CTOD and critical J values of metallic materials.
- [7] ASTM: E1290-99, Test method for crack tip opening displacement (CTOD). Fracture toughness measurement.
- [8] Zrilic M, Grabulov V, Burzic Z, Arsic M, Sedmak S. Static and impact crack properties of a high-strength steel welded joint. *International Journal of Pressure Vessels and Piping.* 2007. Vol. 84(3). p. 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.09.021>.
- [9] Viseras Pico M, González-Palma R, Carnero MC, Escobar CL, Almorza D. Fatigue Fracture, CTOD, and CVN Testing in Heat-Affected Zone of High Strength Low Alloy Steels, Advanced Models and Tools for Effective Decision Making Under Uncertainty and Risk Contexts. Chapter 4, IGI Global, 67, 2021. <https://doi.org/104018/978-1-7998-3246-1>.
- [10] González-Palma R, Carnero MC, López Escobar C, Almorza D, Mayorga P. Compatibility Welding Parameters with the Results Obtained in testing of Fracture Mechanics in HSLA steel. *Optimum Decision Making in Asset Management.* Chapter 8, IGI Global 2017. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0651.5CH8>.
- [11] Dirisu P, Ganguly S, Mehmanparast A, Martina F, Williams S. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components. *Materials Science and Engineering: A.* 2019. Vol. 765. Article 138285. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138285>.
- [12] British Standard, Methods for Crack Opening Displacement (COD) (Testing) BS5762: 1979, Methods for Crack Opening Displacement C.O.D. (Testing) Do:19, 1.972., Methods for Plane Strain Fracture Toughness Kic Testing Dd3:1.971.
- [13] British Standard 7448: Part I. Method for determination KIC Critical CTOD and critical J values of metallic materials.
- [14] Barsom J, Rolfe M, Stanley T. *Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics.* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1977.
- [15] Pengfei C, Wanlin G. Crack tip opening displacement-based description of three-dimensional creep crack border stress fields for partially penetrating cracked specimens. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021. Vol. 241. Article 107425. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107425>.
- [16] Sawada T, Kawamori T, Matsunaga M, Fujiyasu Y, Ueki Y. An experimental study for identifying crack initiation forces in single-lap bonded joints. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021. Vol. 241. Article 107372. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107372>.
- [17] Delgado ER, Pérez JE, Castrodeza EM. Analysis of the S_{po} method for geometries where η_{po} depends on a/W. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021. Vol. 241. Article 107416. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107416>.
- [18] Kawabata T, Tagawa T, Kayamori Y, Ohata M, Yamashita Y, Kinouchi M, Yoshinari H, Aihara S, Minami F, Mimura H, Hagihara Y. Applicability of new CTOD calculation formula to various a/W conditions and BxB configuration. *Engineering Fracture Mechanics.* 2017. Vol. 179. p. 375-390. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.027>.
- [19] Zhang Y, Shuai J, Lv Z, Xu K. Investigation of the effects of material parameters on the relationship between crack tip constraint and CTOD fracture toughness. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 2020. Vol. 108, Article 102615.
- [20] Cooper R, Silva JH, Ftrevisan RE. Influencia del Precalentamiento en las Propiedades de Uniones Soldadas de Acero Api 5L-X80 Soldadas con Alambre Tubular Autoprotegido, Metal. 2004. Vol. 40. p. 280-270.
- [21] Wang C, Tong Z, Zhong W, Lin H, Ning G, Zhang C, Yu B, iXu S, Yang W. A method for directly measuring fracture toughness and determining reference temperature for RPV steels by Charpy impact test. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021. Vol. 243, Article 07526. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107526>.
- [22] Jorge JCF, de Souza LFG, Mendes MC, Bott IS, Araújo LS, dos Santos VR, Rebelo JMA, Evans GM. Microstructure characterization and its relationship with impact toughness of C-Mn and high strength low alloy steel weld metals – a review. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021. Vol. 10. p. 471-501. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.006>.
- [23] Rezaeian A, Keshavarz M, Hajjari E. Mechanical properties of steel welds at elevated temperature. *Journal of constructional steel research.* 2020. Vol. 167. Article 105853. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105853>.
- [24] Ribeiro HV, Baptista CA, Lima MS, Torres MA, Marcomini JB. Effect of laser welding heat input on fatigue crack growth and CTOD fracture toughness of HSLA steel joints. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021. Vol. 11. p. 801-810.
- [25] Standard Method for Estimating the Average Grain Size of Metals, ASTM: E 112-13. American National Standards Institute. 2004.
- [26] Filipon IB, Grand V, Murgas B, Gaillac A, Nicolay A, Bozzolo N, Bernacki M. Grain size characterization in metallic alloys using different microscopy and post-processing techniques. *Materials Characterization.* 2021. Vol. 174, Article 110977. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110977>.
- [27] Rescalvo JA. Principios de La Mecánica de La Fractura. *Revista Metalurgia Cim.* 1981. Vol.17(2).
- [28] Irwin GR. Structural aspects of brittle fracture. *Apple Mater Res.* 1964. Vol. 3. p. 65-81.
- [29] Shi YW, Han ZX, Zhou NN, Li J. The significance of crack depth in fracture toughness specimens for HSLA steel welds. *Engineering Fracture Mechanics.* 1992. Vol. 41(1). p.143-151. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(92\)90102-K](https://doi.org/10.1016/0013-7944(92)90102-K).
- [29] Leiva R, Donoso JR, Muehlich U, Labbe F. Un Enfoque de dos parámetros para el Análisis del efecto del cordón de soldadura sobre el constreñimiento. *Rev. Metal.* 2004. Vol. 40. p. 280-287.
- [30] Zhang C, Gong B, Deng C, Wang D. Computational prediction of mechanical properties of a C-Mn weld metal based on the microstructures and micromechanical properties. *Materials Science and Engineering: A.* 2017. Vol. 685(8). p. 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.023>.
- [31] Zafra A, Álvarez G, Belzunce J, Alegre JM, Rodríguez C. Fracture toughness of coarsed-grain heat affected zone of quenched and tempered CrMo steels with internal hydrogen: Fracture micromechanisms. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021. Vol. 241. Article 107433. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107433>.
- [32] Irwin GR. *Appl. Mater Res,* 1964. Vol. 3.
- [33] The Engineering Equipment and Materials Users Association. *Construction Specification for Fixed Off-Shore Structures in The North Sea.* E.E.M.U.A Publication 158. 1986.
- [34] Standard Metal of Testing for Plan Strain Fracture Toughness of Metals. *ASTM Standards.* Vol.03.01, Metals-Mechanical testings 1985.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/10506-1.pdf

