

# Estudio de Tolerancia de Daño de Uniones Soldadas de Acero ASTM A36

Luis E. Cepeda, Héctor Hernández A.<sup>1</sup>

## RESUMEN

La tolerancia de daño en una soldadura, evaluada como un tamaño de grieta admisible, depende de la combinación de las propiedades mecánicas de tenacidad de fractura y resistencia de la correspondiente zona metalúrgica de estudio. Para unas condiciones dadas de trabajo, la tolerancia de daño aumenta con el incremento de la tenacidad de fractura en el caso que el modo de falla sea por fractura, o con el aumento de la resistencia al flujo plástico, en el caso que la falla sea por colapso plástico. La falla por colapso plástico se ve favorecida por una tenacidad de fractura alta, una resistencia baja y un espesor de soldadura pequeño.

Para los procesos y condiciones de soldadura empleados en este trabajo, se encuentra que a temperatura ambiente la zona de fusión y la zona afectada por el calor presentan mayor tenacidad de fractura que el metal base sin una variación sensible de la resistencia, lo cual se traduce en una tolerancia de daño mayor en esas zonas. En la región de la temperatura de transición para el proceso de arco manual, la tenacidad de fractura de la zona de fusión y de la zona afectada por el calor es mayor que la tenacidad de fractura del metal base, mientras que para el proceso de arco sumergido sucede lo contrario.

## INTRODUCCIÓN

UNA soldadura es una área potencial de nucleación de una fractura porque en ella pueden encontrarse discontinuidades; estas son inclusiones de escoria, porosidades, socavaciones, penetración incompleta, falta de fusión, grietas de solidificación y grietas por hidrógeno. Estas discontinuidades son sitios potenciales de iniciación de una fractura en componentes estructurales soldados, especialmente con carga fluctuante de fatiga.

El efecto de la presencia de una discontinuidad en el modo de falla y en la capacidad de soporte de carga de una unión soldada depende del tipo de carga, de parámetros geométricos

y de la combinación de las propiedades de resistencia y tenacidad de la zona metalúrgica donde se encuentra la discontinuidad.

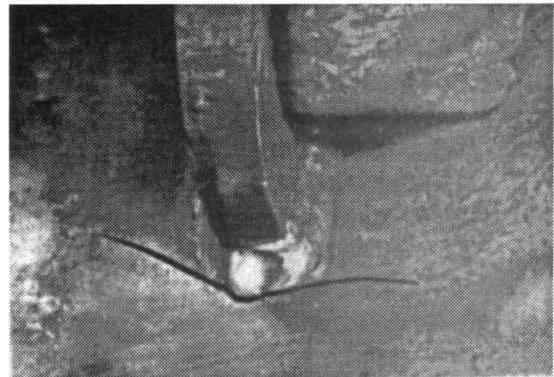


Figura 1. Grieta por fatiga en pie de soldadura en puente de arco.

En este trabajo se presenta un modelo de comportamiento hacia fractura de una unión soldada y un estudio de la combinación de las propiedades de tenacidad de fractura y resistencia, en una unión soldada en platinas de acero ASTM A36, de modo que con base en los resultados pueda realizarse una evaluación de tolerancia de daño en construcciones soldadas como puentes y edificios en los que se emplea este tipo de acero.

La parte experimental de este trabajo se efectúa en las diferentes zonas metalúrgicas que se presentan en una soldadura, las cuales son bien definidas en uniones soldadas a tope. En relación con el proceso de soldadura se emplean arco manual y arco sumergido porque estos procesos son de uso común en la industria nacional; el primero sobresale por su versatilidad y el segundo porque permite una alta rapidez de deposición del metal de soldadura. Las condiciones de soldadura son las de uso frecuente en construcciones soldadas en la industria.

La tenacidad de fractura se evalúa a temperatura ambiente mediante ensayos de abertura crítica en la punta de una grieta (CTOD), y en la región de la temperatura de transición con base en ensayos de impacto Charpy. La resistencia se evalúa mediante ensayos de tensión.

<sup>1</sup>Profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional.

## I. CRITERIOS DE FALLA

La falla final en una estructura con una discontinuidad tipo grieta se puede presentar por fractura o por colapso plástico. La fractura se da por un crecimiento de grieta con una deformación plástica pequeña en el frente de ésta, cuando el factor de intensidad de esfuerzo aplicado se hace igual a un valor crítico conocido como tenacidad de fractura. Por otra parte, la falla por colapso plástico, que tiene lugar con una deformación plástica extensa en el frente de grieta, se supone que se presenta cuando el esfuerzo en la sección residual resistente alcanza un valor crítico de flujo plástico.

Es decir, la falla por fractura se presenta cuando:

$$K_I(S, a, D) = K_C(M, T, \partial S / \partial t) \quad (1)$$

Donde:

$K_I$ : factor de intensidad de esfuerzo que depende del esfuerzo nominal aplicado  $S$ , del tamaño de grieta  $a$  y de las dimensiones del componente  $D$ .

$K_C$ : tenacidad de fractura del material que es influenciada por la microestructura  $M$ , la temperatura  $T$  y la rapidez de aplicación de carga  $\partial S / \partial t$ .  $K_C$  tienden a disminuir con el aumento del espesor; al valor mínimo se le denomina  $K_{IC}$ .

Por lo general  $K_I(S, a, D)$  es de la forma:

$$K_I = \beta S \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Donde:

$\beta = f(a/w)$  factor adimensional,

$S$  = esfuerzo nominal remoto aplicado

$a$  = dimensión característica del tamaño de grieta, (ver figura 2)

Por tanto, el esfuerzo nominal remoto de falla por fractura  $S_c$  es:

$$S_c = \frac{K_c}{\beta \sqrt{\pi a}} \quad (3)$$

Para una placa con una grieta central pasante (ver figura 2):

$$\beta = [\sec(\pi a / 2w)]^{1/2} \quad (4)$$

Donde:

$a$  = semilongitud de grieta

$w$  = semiancho de la placa.

El esfuerzo nominal remoto de falla por colapso plástico  $S_{col}$  para el caso de placa con una grieta central pasante es:

$$S_{col} = [1 - a/w] S_f \quad (5)$$

Donde  $S_f$  es el esfuerzo crítico de falla por flujo plástico en la sección residual resistente.

Como una primera aproximación, el esfuerzo de falla por flujo plástico se supone que es el promedio de la resistencia a fluencia y la resistencia a tensión:

$$S_f = \frac{S_{ys} + S_u}{2} \quad (6)$$

El esfuerzo de flujo plástico calculado con la relación anterior se limita a un valor de  $1,2 S_{ys}$  [3].

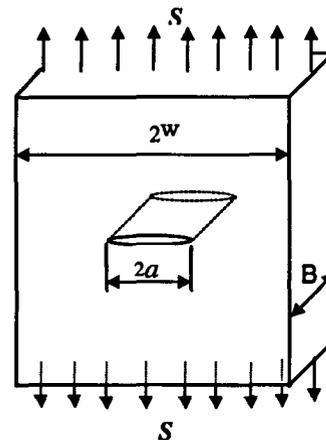


Figura 2. Grieta central pasante en placa sometida a carga de tensión.

## II. MODELO DE COMPORTAMIENTO FRACTOMECAÁNICO DE UNA UNIÓN SOLDADA

En esta sección se plantea un modelo de estudio fractomecánico considerando discontinuidades tipo grieta, como una falta de penetración. En este modelo teórico, para una discontinuidad dada, se considera que la falla se produce por fractura si el esfuerzo nominal remoto de falla por fractura es menor que el esfuerzo nominal remoto de falla por colapso plástico,  $S_c < S_{col}$ . Por el contrario, la falla se presenta por colapso plástico si el esfuerzo de falla por colapso plástico es menor que el esfuerzo de falla por fractura,  $S_{col} < S_c$ .

El efecto de una discontinuidad tipo grieta en una unión soldada, depende de su ubicación, orientación, parámetros geométricos, tipo de carga y de la combinación de las propiedades mecánicas de resistencia y tenacidad de la zona metalúrgica en que se encuentra la discontinuidad. Para mostrar

un método de análisis fractomecánico, a continuación se considera el caso típico de una unión soldada a tope, soportando una carga de tensión normal al cordón de soldadura, con una falta de penetración central, como se muestra en la figura 3. Para este caso, según la ecuación ( 5 ), el esfuerzo nominal remoto de falla por colapso plástico es:

$$S_{col} = [S_f]_f (1 - a/w) \quad (7)$$

Donde  $[S_f]$ , es el esfuerzo de flujo plástico de la zona de fusión. Suponiendo, conservativamente, que la falta de penetración se comporta como una grieta, el esfuerzo nominal remoto de falla por fractura, de acuerdo con la ecuación ( 3 ), es:

$$S_c = \frac{[K_c]_f}{\beta \sqrt{\pi a}} = \frac{[K_c]_f}{\sqrt{\pi a} [\sec(\pi a / 2w)]^{1/2}} \quad (8)$$

Donde

$[K_c]_f$  = tenacidad de fractura de la zona de fusión

$\beta = [\sec(\pi a / 2w)]^{1/2}$

$a$  = semilongitud de la discontinuidad

#### A. MODO DE FALLA

De acuerdo con los criterios de falla considerados en este trabajo, la soldadura falla por colapso plástico si  $S_{col} < S_c$  o por fractura si  $S_c < S_{col}$ . Para cuando  $S_{col} = S_c$ , idealmente se presenta una transición del modo de falla, (ver figura 3.)

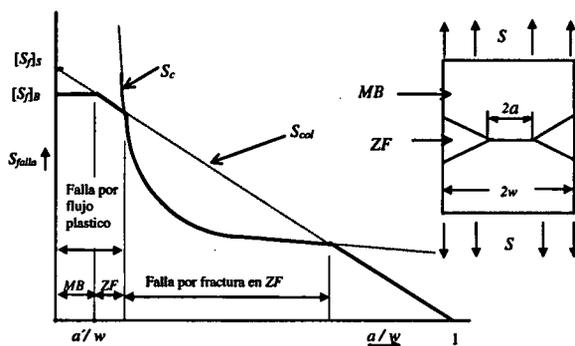


Figura 3. Diagrama de resistencia residual de unión soldada con discontinuidad central. Para un tamaño de grieta dado, el esfuerzo de falla ZF es la zona de fusión se denomina resistencia residual. MB es el metal base.

Entonces, de las ecuaciones ( 7 ) y ( 8 ), la transición se presenta cuando:

$$[S_f]_f (1 - a/w) = \frac{[K_c]_f}{\sqrt{\pi a} [\sec(\pi a / 2w)]^{1/2}} \quad (9)$$

Reorganizando términos, se tiene que la transición del modo de falla se presenta cuando:

$$\frac{[K_c]_f}{[S_f]_f \sqrt{w}} = (1 - a/w) \left[ \frac{\pi a}{w} \sec(\pi a / 2w) \right]^{1/2} \quad (10)$$

De manera que la falla por colapso plástico es favorecida por una tenacidad de fractura elevada, una resistencia baja y un espesor de soldadura pequeño (ver figura 4)

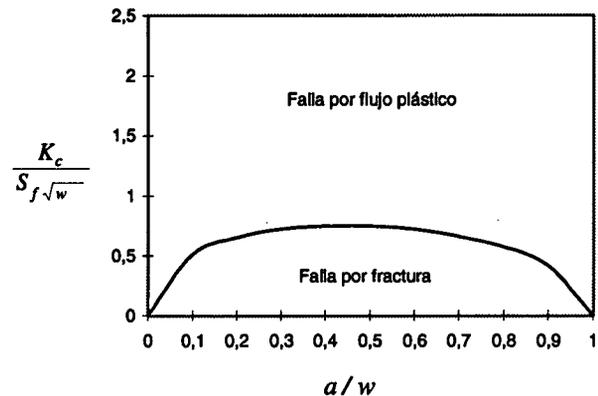


Figura 4. Diagrama de falla para discontinuidad central en la dirección del espesor.

Frecuentemente, el esfuerzo de flujo del metal de soldadura es mayor que el esfuerzo de flujo del metal base; de manera que, una discontinuidad puede ser lo suficientemente pequeña para que la falla por colapso plástico se presente en el metal base antes que en la zona de fusión. La transición de la zona de falla se presenta cuando:

$$[S_f]_B = [S_f]_f (1 - a/w) \quad (11)$$

Donde  $[S_f]_B$  y  $[S_f]_f$  son la resistencia al flujo plástico del metal base y de la zona de fusión, respectivamente.

Reorganizando términos se tiene:

$$\frac{a'}{w} = 1 - \frac{[S_f]_B}{[S_f]_f} \quad (12)$$

Donde  $a'$  es el tamaño de discontinuidad en la zona de fusión para el cual se tiene una transición de zona de falla por colapso plástico, de la zona de fusión al metal base, de modo que, para una discontinuidad de un tamaño menor que  $a'$  la falla se presenta por el metal base (ver figura 3)

B. TAMAÑO CRÍTICO DE GRIETA

De las ecuaciones ( 7 ) y ( 8 ), para unas condiciones dadas de trabajo, el tamaño de grieta crítica de falla es:

$$a_{col} = w[1 - S / S_f] \quad \text{Para una falla por colapso plástico} \quad (13)$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_c}{\beta S} \right)^2 \quad \text{Para una falla por fractura} \quad (14)$$

Donde  $a_{col}$  y  $a_c$  son el tamaño crítico de grieta de falla por colapso plástico y por fractura, respectivamente.

Entonces, para unas condiciones dadas de trabajo, cuando un tamaño de grieta es menor que el tamaño de grieta crítica no se presenta falla. Luego de las ecuaciones ( 13 ) y ( 14 ) se tiene que la tolerancia de daño aumenta con el incremento de la resistencia al flujo plástico en el caso que la falla sea por colapso plástico o con el aumento de la tenacidad de fractura en el caso que la falla sea por fractura.

III. TENACIDAD DE FRACTURA CTOD

Cuando en un componente actúa una carga de tensión perpendicular al plano de una grieta se produce un desplazamiento normal entre las superficies de una grieta.

El desplazamiento entre superficies de grieta en los extremos originales de ésta es conocido como CTOD,  $\delta_p$  (ver figura 5)

Se presenta una falla de crecimiento de una grieta cuando  $\delta_p$  se hace igual a un valor crítico  $\delta_c$ . Este valor crítico de crecimiento de grieta es conocido como **tenacidad de fractura CTOD**, el cual es otro parámetro fractomecánico que mide la resistencia a la fractura por crecimiento de una grieta.

La tenacidad de fractura en uniones soldadas de aceros estructurales frecuentemente se caracteriza por un valor crítico  $\delta_c$  de CTOD, porque este parámetro de tenacidad de fractura es válido para un comportamiento elástico, elástico-plástico o plástico.

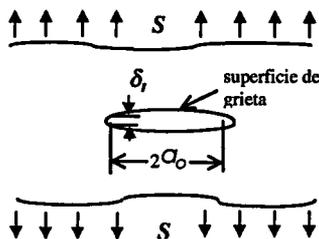


Figura 5. Desplazamiento de superficies de grieta por efecto de un esfuerzo de tensión aplicado.

IV. TAMAÑO DE GRIETA ADMISIBLE

De acuerdo con el documento PD 6493 del Instituto Británico de Normalización, el tamaño máximo admisible de grieta equivalente  $\bar{a}_m$  es dado por [2]:

$$\bar{a}_m = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_c}{S} \right)^2 = \frac{\delta_c E}{2\pi (S / S_{ys})^2 S_{ys}} \quad \text{Para cuando } (S / S_{ys}) \leq 0,5 \quad (15)$$

$$\bar{a}_m = \frac{\delta_c E}{2\pi [S / S_{ys} - 0,25] S_{ys}} \quad \text{Para cuando } (S / S_{ys}) > 0,5 \quad (16)$$

Donde E es el módulo de elasticidad

La dimensión de grieta admisible calculada con las ecuaciones ( 15 ) y ( 16 ) se debe verificar por colapso plástico, de manera que la relación  $S / S_{col}$  no debe tener un valor mayor de 0,8. De estas relaciones se observa que, para unas condiciones dadas de trabajo, el tamaño máximo admisible de grieta aumenta proporcionalmente con la tenacidad fractura.

V. CORRELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DE FRACTURA DE IMPACTO CHARPY Y LA TENACIDAD DE FRACTURA

Con el fin de estimar la tenacidad de fractura con base en los resultados de ensayos de impacto Charpy, se han establecido correlaciones empíricas entre la energía de fractura de impacto Charpy y la tenacidad de fractura en la región de temperatura de transición. En este trabajo se emplean las correlaciones de Barsom y Rolfe:

$$K_{ID} = 37,14(CVN)^{1/2} \quad (17)$$

$$K_{IC} = 21,82(CVN)^{3/4} \quad (18)$$

Donde:

$K_{ID}$  y  $K_{IC}$  = tenacidad de fractura dinámica y estática, respectivamente, en  $\text{kgf/mm}^{3/2}$

CVN = la energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy en J.

VI. INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA DE UNIONES SOLDADAS EN LA TENACIDAD

En una unión soldada por fusión, donde el calor de soldadura se produce por un arco eléctrico se distinguen tres zonas con propiedades metalúrgicas específicas que son: zona de fusión (ZF), zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base (MB).

### A. METAL BASE ,MB

En construcciones soldadas, como puentes y edificios, se emplean aceros al carbono con un contenido de carbono máximo de 0,35%, con una estructura de laminación en caliente de ferrita y perlita.

### B. ZONA DE FUSIÓN, ZF

Durante el proceso de solidificación se tiene una transformación de metal líquido a sólido, la cual se inicia en forma epitaxial, de modo que la estructura y la orientación cristalográfica del metal base en el límite de fusión continúa en el metal de soldadura. Subsecuentemente procede un crecimiento de grano competitivo, aproximadamente en la dirección del gradiente máximo de temperatura en la pileta de soldadura, lo cual conduce a la formación de granos de austenita columnares de tamaño grande (ver figura 6 (a)) los que por el enfriamiento particularmente rápido en una soldadura se transforman en condiciones fuera de equilibrio, dando origen a una mezcla compleja de dos o más de los siguientes microconstituyentes[3]: (a) ferrita en borde de grano *GF*; (b) ferrita poligonal *PF*; (c) ferrita con una segunda fase alineada *AC*; (d) ferrita acicular *AF*, (ver figura 6(a)); (e) bainita y martensita. La presencia de estos microconstituyentes [3] depende primordialmente de la composición química del metal de soldadura y de la velocidad de enfriamiento. La composición química de la *ZF* es influenciada por la composición del *MB*, por efecto de dilución de éste en la zona de fusión.

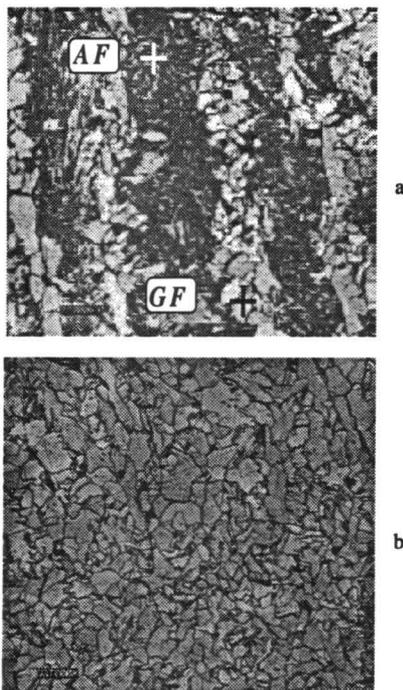


Figura 6. Estructura en la zona de fusión de unión soldada de acero ASTM A36: (a) columnar; (b) columnar recrystalizada. 200X.

### C. ZONA AFECTADA POR EL CALOR, ZAC

Es una zona adyacente al metal fundido donde el calor de soldadura causa una alteración de la microestructura del metal base por transformaciones en estado sólido. Por lo general, en esta zona se encuentran subzonas sucesivas a partir del límite de fusión, que son: (a) de grano grueso, (b) de grano fino, y (c) de transformación parcial [5].

### D. EFECTO DE VARIOS PASES

En una soldadura realizada en varios pases, la estructura columnar de la *ZF* y la estructura de grano grueso de la *ZAC* de un determinado pase, pueden ser reemplazadas por estructuras de tipo equiaxial más finas, debido al ciclo térmico generado por un nuevo pase. Las zonas de un pase donde tiene lugar estas transformaciones son conocidas como zonas recrystalizadas, (ver figura 6(b))

### E. INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Por lo general en la zona de fusión la resistencia a fluencia aumenta y la temperatura transición de la tenacidad al impacto disminuye con la reducción del tamaño de grano ferrítico. En la zona de fusión, un contenido alto de ferrita acicular beneficia tanto la resistencia como la tenacidad, debido a que este microconstituyente está formado por listones finos entrecruzados, lo cual da una resistencia elevada a la propagación de grietas por clivaje; por el contrario, la ferrita en borde de grano (*GF*), la ferrita con una segunda fase alineada, la bainita superior y la martensita van en detrimento de la tenacidad porque ofrecen trayectorias que facilitan la propagación de grietas. También se ha establecido que la tenacidad se ve favorecida por la reducción del tamaño de grano promedio de la austenita primitiva y por la reducción del tamaño de grano ferrítico.

En la región de grano grueso de la *ZAC*, frecuentemente se encuentra que la tenacidad se empobrece, especialmente a una temperatura baja. En una soldadura con varios pases, la tenacidad del metal de soldadura y de la *ZAC* pueden mejorar por efecto de revenido o de refinamiento de grano causado por pases subsecuentes. Por lo general, la recrystalización de la estructura columnar de la *ZF* mejora la tenacidad [4]

## VII. PARTE EXPERIMENTAL

De acuerdo con el modelo fractomecánico considerado en este trabajo, para efectuar una evaluación de tolerancia de daño

de una unión soldada es necesario determinar las propiedades mecánicas de tenacidad y resistencia. En tal sentido, en esta sección se presentan los resultados de los ensayos de resistencia y tenacidad de fractura realizados en las diferentes zonas metalúrgicas de las uniones soldadas consideradas en este estudio.

**A. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA**

Se hacen cordones de soldadura en posición plana a tope, en platinas de acero ASTM A36 de 400 x 100 x 12,7 mm, empleando los procesos de arco sumergido, AS, y arco manual, AM. Para arco sumergido los consumibles seleccionados de acuerdo con la norma AWS A5.17 son electrodo EL12 y fundente aglomerado básico F6A2. En la soldadura de arco manual, el pase de raíz se realizó con electrodo AWS E6010 y los pases de relleno con AWS E7018.

En arco sumergido se presenta una entrada de calor de 1,95 kJ/mm, y en arco manual de 1,2 kJ/mm. La mayor entrada de calor con el proceso de arco sumergido produce una zona afectada por el calor mucho más ancha que con el proceso de arco manual. La entrada de calor influye en las transformaciones microestructurales en la zona afectada por el calor ZAC y en el metal de fusión ZF, y por tanto, en las propiedades mecánicas de la junta. En el cuadro 1 se presentan las condiciones de soldadura.

CUADRO 1. CONDICIONES DE SOLDADURA.

Parámetro	Arco Sumergido	Arco Manual
Metal base	ASTM A36	ASTM A36
Posición de soldadura	Plana a tope	Plana a tope
Diseño de la junta	ca "V"	ca doble "V"
Fundente	F6A2 (aglomerado básico 760 Lincoln)	.....
Electrodo	EL12 de Ø 3/32" (2,38 mm) Bajo Mn	E6010 y E7018 de Ø 1/8" (3,175mm)
Voltaje	30 V	22-30 V
Amperaje	330 A CD (+)	130A CD (-)
Velocidad de soldadura	12 pulg/min (5,08 mm/s)	5,7 pulg/min (2,4 mm/s)
Número de pases	3	3
Precalentamiento, min	10°C (50°F)	10°C (50°F)

**B. ENSAYOS DE TENSION**

Se realizan ensayos de tensión en probeta plana en la unión soldada, de acuerdo con el código de construcciones soldadas AWS D1.1; la falla en estas probetas tiene lugar fuera de la soldadura. Además se hicieron ensayos de tensión en probeta cilíndrica reducida de Ø6 mm en el metal base y en el zona de fusión para cada proceso. Los resultados se presentan en el cuadro 2.

CUADRO 2. PROPIEDADES MECÁNICAS EN TENSION DE UNION SOLDADA DE ACERO A36.

	Unión Soldada <sup>a</sup>		Metal Base <sup>d</sup>		Zona de Fusión <sup>d</sup>		
	Resistencia a tensión <sup>b</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a fluencia (kgf/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a tensión (kgf/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento en 50 mm (%)	Resistencia a fluencia (kgf/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a tensión (kgf/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento en 50 mm (%)
[AM] <sup>c</sup>	48	41	55	18	45	55	18
[AS] <sup>e</sup>	47	35	49	22	39	52	21

<sup>a</sup> arco manual, <sup>b</sup> arco sumergido, <sup>c</sup> falla por metal base, <sup>d</sup> probeta cilíndrica de Ø 6mm, <sup>e</sup> probeta plana

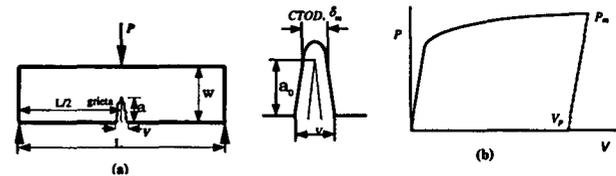


Figura 7 (a) Configuración de ensayo de tenacidad de fractura CTOD. (b) Diagrama autográfico de ensayo. Con los datos de carga máxima  $P_m$  y el correspondiente desplazamiento plástico  $V_p$  se calcula la tenacidad de fractura.

CUADRO 3. TENACIDAD DE FRACTURA CTOD, mm.

PROCESO	MB			ZAC			ZF		
Arco Sumergido	0,1184	0,1578	0,1285	0,1975	0,3041	0,2071	0,6544	0,7284	0,803
Arco Manual	0,1184	0,1578	0,1285	0,1946	0,4001	0,235	0,8769	0,9782	1,296

MB = Metal base ZAC = Zona afectada por el calor ZF = Zona de fusión

**C. ENSAYOS DE TENACIDAD DE FRACTURA CTOD.**

Las probetas se maquinan a un espesor de 10 mm a partir de los cupones de soldadura. Se entallan y preagrietan por fatiga de acuerdo con las recomendaciones dadas por la norma BS 5762 [1] En este trabajo se emplea la configuración de ensayo que se muestra en la Figura 7(a). Mediante el empleo de deformímetros eléctricos se obtiene un diagrama autográfico de fuerza aplicada  $P$  contra desplazamiento entre superficies de grieta, medido en la boca de ésta,  $V$ ; el ensayo se lleva hasta el primer punto de carga máxima [ $P_m$ ], de manera que se determina la tenacidad  $CTOD$  correspondiente a esta condición, a la cual se le da la notación  $\delta_m$ . Se efectúan tres ensayos por zona, tanto para el proceso de arco manual como para el de arco sumergido. En el cuadro 3 se presentan los resultados de los ensayos de tenacidad de fractura realizados de acuerdo con el procedimiento especificado por la norma BS 5762.

**D. ENSAYOS DE IMPACTO CHARPY**

Para estudiar la tenacidad a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente en el intervalo de la temperatura de transición, se determinan las curvas de energía absorbida versus

temperatura, correspondientes a la ZF, ZAC y MB, para ambos procesos. Para esto se maquinan 30 probetas de impacto Charpy CVN para cada caso, de acuerdo con la norma ASTM E 23-92 y las recomendaciones del código AWS D1.1- 94. Los ensayos se realizaron en el intervalo de temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $+30^{\circ}\text{C}$ , con un incremento de  $10^{\circ}\text{C}$ ; a cada temperatura se hacen tres ensayos. En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados gráficamente.

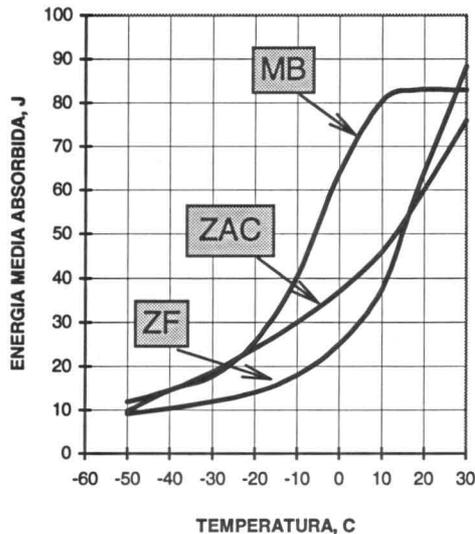


Figura 8. Curvas de energía absorbida (J) versus temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en ensayos de impacto CVN en unión soldada con arco sumergido.

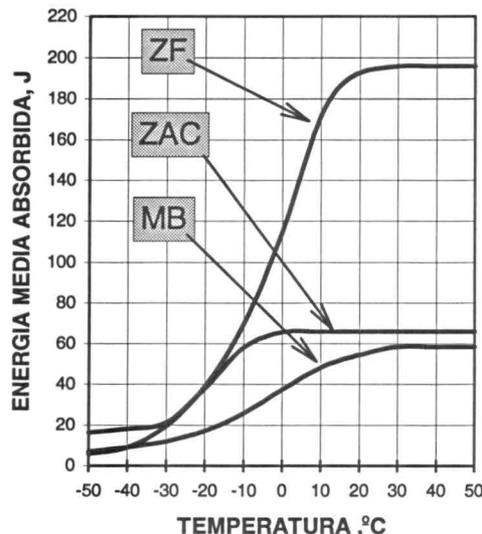


Figura 9. Curvas de energía absorbida versus temperatura en ensayos de impacto CVN en unión soldada con arco manual.

#### E. COMPOSICIÓN MICROESTRUCTURAL

En el Cuadro 4 se presenta la composición microestructural en las probetas de ensayos de tenacidad *CTOD* e impacto CVN.

CUADRO 4. COMPOSICIÓN MICROESTRUCTURAL

Composición global					
Zona de Fusión (%)			Zona afectada por el calor (%)		
[AM] [AS]	Columnar	Recristalizada	Recristalizada	Grano grueso	Columnar
	23	77	100	0	0
	42	58	59	39	2

Componente microestructural	Zona columnar	
	Arco Manual %	Arco sumergido %
GF	38	55
AC	24	5
PF(I)*	2	8
AF	36	32

\*Ferrita poligonal intragranular

#### VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los resultados de los ensayos de tensión, para ambos procesos, la zona de fusión presenta un nivel de resistencia ligeramente mayor al metal base, lo que quiere decir que en caso de una falla por colapso plástico, para unas mismas condiciones de trabajo, la carga de falla no es afectada sensiblemente por la zona de la unión soldada donde se encuentre una grieta.

De acuerdo con las curvas de energía absorbida versus temperatura, de los ensayos de impacto Charpy, (ver figuras 8 y 9) y teniendo en cuenta la ecuaciones ( 17 ) y ( 18 ), en la región de temperatura de transición para el proceso de arco manual, la zona de fusión y la zona afectada por el calor presentan mayor tenacidad de fractura que el metal base, lo cual favorece el modo de falla por colapso plástico en dichas zonas (ver figura 4 ), y según las ecuaciones ( 15 ) y ( 16 ) se tiene un tamaño admisible de grieta mayor, es decir, una tolerancia de daño mayor en esas zonas, para unas condiciones dadas de trabajo. Para el proceso de arco sumergido sucede lo contrario, de manera que la falla por fractura en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor se ve favorecida en comparación con el metal base. Por lo general, la tenacidad de fractura estática es mayor que la tenacidad de fractura dinámica como se ilustra en el cuadro 5.

CUADRO 5. TENACIDAD DE FRACTURA EN UNIÓN SOLDADA A  $-10^{\circ}\text{C}$  ESTIMADA CON BASE EN LA ENERGÍA MEDIA ABSORBIDA EN ENSAYO DE IMPACTO CVN.

	Arco manual			Arco sumergido	
	MB	ZF	ZAC	ZF	ZAC
CVN, J	28/40	70	60	18	30
$K_{IC}$ , $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$	266/347	528	470	191	280
$K_{ID}$ , $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$	197/236	311	288	158	204

$K_{IC} = 21,82 (\text{CVN})^{3/4}$        $K_{ID} = 37,24 (\text{CVN})^{3/2}$       , CVN en J

Comparando los dos procesos a temperatura ambiente, la zona de fusión del proceso de AM presenta una tenacidad de fractura *CTOD* mayor que la zona de fusión del proceso de AS. La tenacidad *CTOD* de la ZAC del proceso de arco manual

es ligeramente mayor que la tenacidad de la ZAC del proceso de arco sumergido, (ver cuadro 6).

De acuerdo con las ecuaciones ( 15 ) y ( 16 ) y teniendo en cuenta los valores de tenacidad de fractura *CTOD* ( véase cuadro 3), para unas condiciones dadas de trabajo, a temperatura ambiente, el *MS* y la *ZAC* de ambos procesos ofrecen una mayor tolerancia de daño que el *MB* como se ilustra en el cuadro 6.

De los datos que se presentan en el cuadro 7 se concluye que, a temperatura ambiente, mientras se presenta una variación notoria de la tenacidad de fractura a través de la unión soldada, la resistencia sólo presenta una ligera variación.

CUADRO 6. TAMAÑO EQUIVALENTE MÁXIMO ADMISIBLE DE GRIETA A TEMPERATURA AMBIENTE PARA UN ESFUERZO TÍPICO DE DISEÑO DE  $2/3 S_p$ .

	MB	Arco Manual		Arco Sumergido	
		ZF	ZAC	ZF	ZAC
$S_p$ , kgf/mm <sup>2</sup>	38	45	41,5	39	38,5
$\delta_m^*$ , mm	0,1349	1,05	0,2766	0,7286	0,2362
$\bar{u}_m$ , mm	27	178	51	142	47

\* Valor promedio de tres ensayos

CUADRO 7. RESUMEN DE PROPIEDADES FRACTOMECÁNICAS A TEMPERATURA AMBIENTE.

	Arco Manual		Arco Sumergido		
	MB	ZF	ZAC	ZF	ZAC
<i>CTOD</i> <sup>(1)</sup> , mm	0,1349	1,05	0,2766	0,7289	0,2362
<i>CVN</i> , J	57	192	67	57	59
$S_f^2$ , kgf/mm <sup>2</sup>	45	50	48	46	46

<sup>(1)</sup> Valor promedio de tres ensayos

\*  $\delta_m = (\delta_m + \delta_m) / 2$

En la *ZF* y en la *ZAC* con el proceso de arco manual se tiene una mayor proporción de estructura recristalizada que con el proceso de arco sumergido (ver cuadro 4).

Esto contribuye a que con el proceso de arco manual se tengan mayores valores de tenacidad que con el proceso de arco sumergido, tanto en la *ZF* como en la *ZAC*.

#### AGRADECIMIENTOS

A Eletromanufacturas S.A. por su cooperación técnica y bibliográfica y HB Estructuras metálicas por la elaboración de los cupones de uniones soldadas necesarios en la parte experimental de este trabajo.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. *British Standard Methods for crack opening displacement (COD) testing*. BS 5762, 1979
2. *BS PD 6493. Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints*, 1980
3. GARWOOD, S.J., GORDON, J.R. *Crack tip opening displacement (CTOD) methods for fracture assessments: Proposals for revisions to BS PD 6493*, 1988
4. HOEKSTRA, S. And SCHMIDT, Munning. *Microstructure and notch toughness of ferritic weld metal*. *Metal Construction*, 18 (12), 1986
5. LANCASTER, J.K. *Metallurgy of welding*. 4Ed. Allen & Unwin, 1987. pp. 162 - 173