

## Predicción numérica de la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) durante el proceso de soldeo SMAW en el acero al Cr-Mo-V(\*)

Z. Mazur<sup>\*,\*\*\*</sup>, O. Salazar<sup>\*\*</sup>, G. González<sup>\*\*\*</sup> y G. Urquiza<sup>\*,\*\*\*</sup>

**Resumen** La fisuración de las uniones por soldeo que operan a temperaturas y presiones elevadas es un problema considerable. La eficacia de estas uniones, tanto durante el proceso de soldeo como durante su operación, depende de manera estricta de la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) del metal base, la cual para una composición química dada del material es una función de los parámetros de soldeo y la geometría de la unión. Se presenta una metodología de predicción de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano de la ZAC, en un cordón de soldadura aplicado al acero de baja aleación 1,25Cr-1Mo-0,25V por el proceso SMAW. Las bases para el desarrollo del algoritmo fueron las ecuaciones clásicas de transferencia del calor para determinar los ciclos térmicos de soldeo, metalurgia básica, incluyendo diagramas de fases y cinética de crecimiento de granos, y relaciones empíricas para describir la correlación de los variables de soldeo y las dimensiones del cordón de soldadura.

**Palabras clave** Microestructura de la ZAC. Simulación numérica. Aceros al Cr-Mo-V. Soldeo SMAW. Cordón de soldadura.

### Numerical prediction of the microstructure of weld heat-affected zone (HAZ) in SMAW weld deposits on Cr-Mo-V steel

**Abstract** Cracking associated with welds operating in high temperatures and high pressure, is a problem of consideration. The performance of welded joints, both during fabrication and operation depends strictly upon the microstructure of the heat-affected zone (HAZ), which, in a steel of a given composition, is a function of welding conditions and joint geometry. The methodology of prediction of the dimensions of the zones containing different sizes in the HAZ grain of a single-bead weld of 1.25Cr-1Mo-0.25V steel using SMAW deposition process is described. The standard heat-flow equations have been used to determine weld thermal cycles in conjunction with basic metallurgy including phases-transformation, grain growth kinetics and empirical equations to describe the effects of welding variables on weld bead dimensions.

**Keywords** HAZ microstructure. Numerical simulation. Cr-Mo-V steel. SMAW welding. Single-bead weld.

## 1. INTRODUCCIÓN

El refinado de una estructura metalúrgica es comúnmente considerado como un beneficio para un material de interés y es, a menudo, un propósito deseado como un medio para obtener las propiedades mecánicas necesarias. En la zona afectada por el

calor (ZAC) de la unión por soldeo, la obtención de los granos refinados ofrece, adicionalmente, una mayor resistencia a la fisuración durante el proceso de fabricación (proceso de soldeo y tratamiento térmico post soldadura) y puede mejorar la eficacia de la unión durante la operación. La microestructura de la ZAC, en los aceros al Cr-Mo-V

(\*) Trabajo recibido el día 24 de Julio de 2000 y aceptado en su forma final el día 9 de Julio de 2001.

(\*) Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira 62490 Temixco, Morelos, México. E-mail: mazur@iie.org.mx

(\*\*) Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca, Toluca, Estado de México, México.

(\*\*\*) Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.

aplicados para los componentes principales de turbinas de vapor y de gas (rotores, carcassas, válvulas, tubería), consta típicamente de una banda de bainita de granos gruesos inmediatamente adyacente a la línea de fusión del metal base, banda de granos finos y banda intercrítica (bainita decorada), que contiene una mezcla de ferrita y bainita<sup>[1]</sup>. Debido a la alta temperatura de operación de los componentes anteriormente mencionados, éstos presentan fragilidad de revenido después de un período prolongado de operación. El material con fragilidad de revenido puede ser muy difícil de soldar, porque puede presentar alta sensibilidad para la fisuración en caliente y para fisuración durante la eliminación de las tensiones después de soldeo.

Las fisuras están relacionadas directamente con el alto porcentaje de la bainita de grano grueso en la ZAC. Las fisuras transversales de la soldadura y circunferenciales del metal base se presentan como grietas totalmente intergranulares por la termofluencia, debido a la imposibilidad de acomodar las deformaciones por las regiones de bainita de grano grueso de baja ductilidad<sup>[2]</sup>. Las fisuras microscópicas circunferenciales pueden presentarse en un período corto durante el ciclo de tratamiento térmico de eliminación de las tensiones en la ZAC del metal base. Por falta de fisuras pueden presentarse las microcavidades de termofluencia en los límites de granos. La propagación de las fisuras se presenta en forma intergranular en las regiones de granos gruesos, donde cada daño (microcavidad) es, típicamente, mayor que en las regiones de granos finos. Las fisuras transversales pueden presentarse durante el servicio en las soldaduras aparentemente sanas después de períodos del orden de 5.000 hasta 20.000 h (en ocasiones hasta 40.000 h). Estas fisuras se inician, típicamente, en las regiones de soldadura que contienen granos gruesos columnares. Los dos tipos de fisuras hacen necesarias reparaciones muy costosas y requieren programas especiales de control de las soldaduras durante la operación de las turbinas; por ello, evitar su aparición se convierte en el objetivo principal.

El fin de este trabajo es determinar por medio de experimento la variación de la geometría del cordón de soldadura aplicado al acero 1,25Cr-1Mo-0,25V por soldeo SMAW y la microestructura de la ZAC, en función del calor aportado y temperatura de precalentamiento/interpasada. Los resultados empíricos serán utilizados para predicción numérica de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano de la ZAC, en función de los parámetros de soldeo. En la siguiente

etapa se desarrollará un modelo por ordenador para controlar/simular la microestructura de la ZAC en las soldaduras de multipasadas de dos capas en el acero al 1,25Cr-1Mo-0,25V con el propósito de obtener el refinamiento de los granos de la bainita gruesa de la ZAC y evitar los efectos nocivos de esta zona, anteriormente mencionados, sobre la eficacia de la unión por soldeo durante la operación.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En una placa gruesa de 70 mm de espesor de dimensiones 450 mm × 100 mm fabricada en acero fundido de baja aleación, de acuerdo con la especificación ASTM A356 Gr 9 (1,25Cr-1Mo-0,25V), se aportaron los cordones experimentales de soldadura como se presenta en la figura 1. La composición química del material usado en el experimento correspondía a la especificación ASTM A356 Gr 9. El contenido de los elementos, conforme con esta especificación y con base en el análisis químico de la muestra tomada, se presenta en la tabla I. El material objeto de la investigación se aplica,

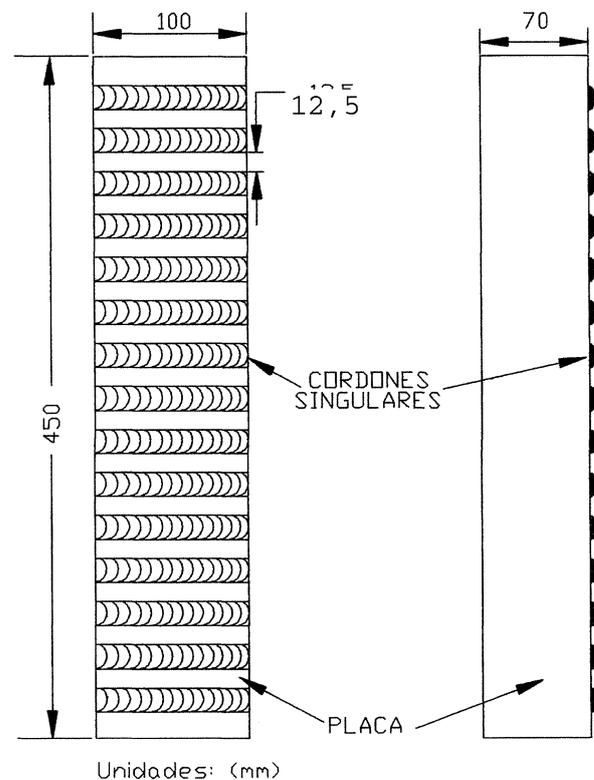


Figura 1. Cordones experimentales de soldadura.

Figure 1. Experimental single-bead welds.

**Tabla I.** Composición química del acero fundido al 1,25Cr-Mo-0,25V expresado en peso

Table I. Chemical analysis of 1.25Cr-1Mo-V cast steel, wt-%

Elemento	ASTM A 356 Gr 9	Material usado en el experimento
C	0,13 - 0,20	0,18
Mn	0,50 - 0,90	0,85
Si	0,20 - 0,60	0,30
S	0,030 max	0,022
P	0,035 max	0,026
Mo	0,90 - 1,20	0,98
Cr	1,00 - 1,50	1,37
V	0,20 - 0,35	0,23

típicamente, para fabricar carcasas de alta presión y válvulas de turbinas de vapor.

Un esquema simplificado del cordón de soldadura presentado en la figura 2 se usó para evaluar cada prueba de la aportación de soldadura. Consiste en las dimensiones básicas del cordón de soldadura y los gradientes isotérmicos relativos asociados con la zona afectada por la temperatura del metal base. Dicho esquema representa el metal de soldadura y región de la ZAC, la cual experimentó

varios ciclos térmicos con una progresiva disminución de las temperaturas pico en las distancias, incrementándose en la línea de fusión. Las dimensiones del cordón de soldadura se obtuvieron de las mediciones experimentales de los cordones aportados, aplicando un intervalo en los parámetros de soldeo. Las dimensiones básicas de interés son el ancho del cordón de soldadura ( $a$ ), penetración del cordón ( $p$ ) y altura del cordón ( $h$ ) (Fig. 2). Los aportes de soldadura se efectuaron con el electrodo E 8018 B2L, conforme con la especificación AWS SFA-5.5 de los siguientes diámetros: 2,4, 3,2, 4,0 y 4,8 mm. Los electrodos se secaron durante 1 h a 350 °C y mantenidos a 150 °C antes de su uso. La temperatura de precalentamiento durante el proceso de aporte fue 250 °C, con una temperatura máxima de interpasadas de 300 °C.

Las series de cordones de soldadura se aportaron para investigar el efecto de parámetros de soldeo sobre las dimensiones del cordón y la ZAC, junto con la microestructura generada en la ZAC. Varias combinaciones de los parámetros de soldeo aplicados durante la aportación se presentan en la tabla 2. La tensión de soldeo durante la aplicación se mantuvo invariable con valor de 20 V. Los parámetros de soldeo se registraron frecuentemente, midiendo la intensidad, la tensión y la velocidad de soldeo. Según estos parámetros se calculó la aportación del calor. La aportación efectiva del calor está definida por la ecuación (1):

$$q = \frac{\eta VI}{v} \text{ (J/mm)} \quad (1)$$

donde:

$\eta$ : eficiencia del arco

$V$ : tensión de soldeo, (V)

$I$ : intensidad de soldeo, (A)

$v$ : velocidad de soldeo, (mm/s)

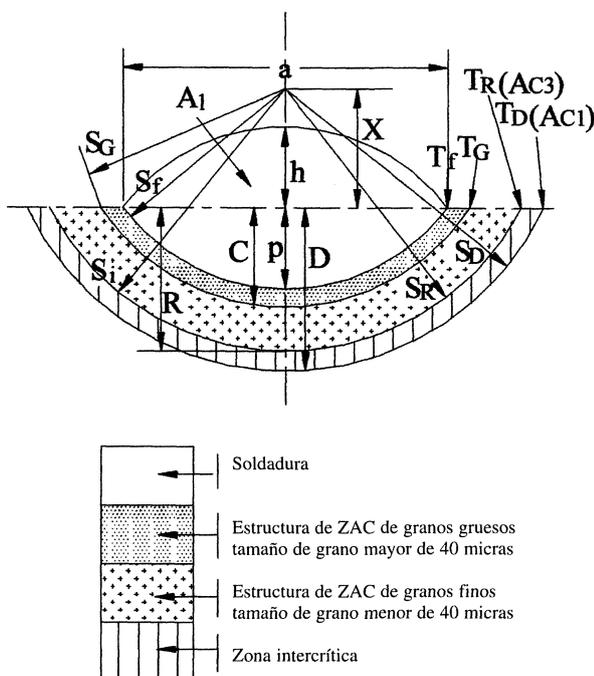
**Figura 2.** Esquema simplificado del cordón de soldadura.

Figure 2. Simplified scheme of single-bead weld.

**Tabla II.** Parámetros de soldeo y de la zona afectada por el calor

*Table II. Parameters of welding and heat affected zone*

No	d <sub>a</sub> mm	I A	v mm/s	q J/mm	a mm	p mm	h mm	A <sub>1</sub> mm <sup>2</sup>	G mm	C mm	D mm	D-p, mm
1	2,4	70	2,52	417	7,05	1,22	2,02	8,91	0,158	1,62	4,42	3,2
2	2,4	70	4,35	241	6,05	0,98	1,58	6,03	0,126	1,28	3,88	2,9
3	2,4	90	6,74	200	6,52	1,31	1,86	7,56	0,114	1,56	3,61	2,3
4	2,4	90	8,33	162	6,34	1,18	1,83	7,25	0,099	1,38	2,78	1,6
5	2,4	90	10,26	132	5,33	0,72	1,51	5,04	0,083	0,98	2,32	1,6
6	3,2	90	2,68	504	10,22	1,75	2,68	17,27	0,176	2,00	3,95	3,2
7	3,2	100	4,57	328	9,26	1,68	1,65	9,90	0,144	2,08	4,28	2,6
8	3,2	100	7,25	207	4,37	0,63	1,47	3,95	0,114	0,93	3,03	2,4
9	3,2	130	8,54	228	7,25	1,44	1,33	6,24	0,126	1,74	3,84	2,4
10	3,2	130	9,86	198	6,24	0,81	1,89	7,33	0,114	1,11	3,01	2,2
11	4,0	120	1,89	952	13,68	2,93	3,66	31,52	0,228	3,33	7,03	4,1
12	4,0	120	3,64	495	7,44	1,28	2,62	11,92	0,176	1,48	4,68	3,4
13	4,0	140	5,21	403	8,69	1,52	2,44	13,29	0,158	1,92	4,32	2,8
14	4,0	180	7,78	347	6,83	0,85	2,33	9,77	0,144	1,15	3,25	2,4
15	4,0	180	9,36	288	7,55	1,32	2,09	9,90	0,126	1,52	3,72	2,4
16	4,8	180	2,24	1205	12,76	2,68	3,48	25,54	0,286	3,38	8,08	5,4
17	4,8	180	3,47	778	11,97	2,47	2,61	20,00	0,264	3,37	6,57	4,1
18	4,8	200	5,93	506	8,03	1,19	2,07	10,50	0,176	1,59	5,59	4,4
19	4,8	220	8,13	406	8,64	0,86	1,76	9,78	0,158	1,46	4,86	4,0
20	4,8	220	9,62	343	6,28	1,20	1,98	7,70	0,158	1,60	4,40	3,2

Donde:

- No: número del cordón
- d<sub>a</sub>: diámetro del electrodo
- I: intensidad
- v: velocidad de soldeo
- q: aportado del calor
- a: ancho del cordón
- p: penetración

- h: altura del cordón
- A<sub>1</sub>: área del cordón
- G: tamaño de gran grueso en ZAC
- C: profundidad de ZAC grosera
- D: profundidad de refinación de A<sub>c3</sub>
- D-p: ancho de ZAC

como referencia para distinguir entre los granos gruesos y granos finos en la ZAC. Los trabajos anteriores<sup>[4]</sup> indican que, en la primera aproximación, las dimensiones del cordón de soldadura pueden relacionarse con la aportación efectiva del calor (q). La variación del ancho a del cordón, penetración p y altura h del cordón relacionada con la aportación efectiva del calor, obtenida de los resultados del experimento, se presenta en las figuras 3-5.

La relación de regresión lineal por mínimos cuadrados obtenida para a, p y h, con base en los resultados anteriormente mencionados, se expresa en las ecuaciones (2)-(4).

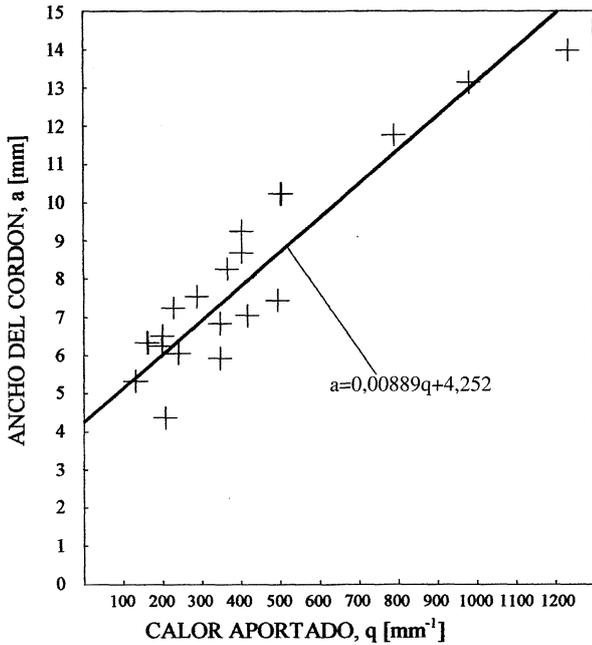
$$a = 0,00889q + 4,252 \text{ [mm]} \quad (2)$$

$$p = 0,00216q + 0,503 \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$h = 0,00211q + 1,298 \text{ [mm]} \quad (4)$$

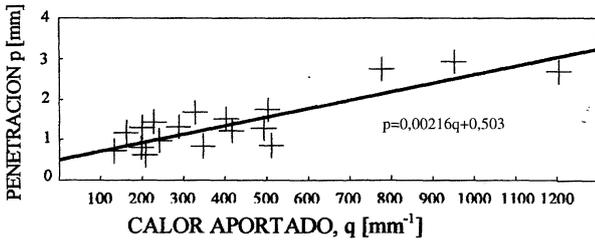
Estas relaciones tienen coeficientes de correlación 0,90, 0,74 y 0,78 respectivamente. Las dimensiones del cordón de soldadura son previstas de las ecuaciones (2 - 4), presentando la congruencia con los valores medidos. Se considera que las ecuaciones tienen validez para rangos de parámetros limitados. En este caso, cubren los intervalos de intensidad de 70 a 220 amperios, tensión de 20 voltios y velocidades de soldeo de 1,89 a 10,26 mm/s.

Partiendo de la figura 6 y suponiendo que la superficie del cordón de soldadura está formada por un arco de círculo, se desarrollaron y transformaron las siguientes ecuaciones para determinar el área del cordón:



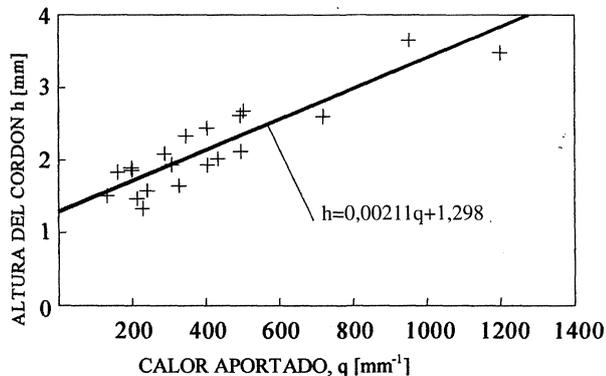
**Figura 3.** Variación del ancho del cordón de soldadura con la aportación efectiva del calor.

Figure 3. Variation of weld-bead width with effective heat input.



**Figura 4.** Variación de la penetración del cordón de soldadura con la aportación efectiva del calor.

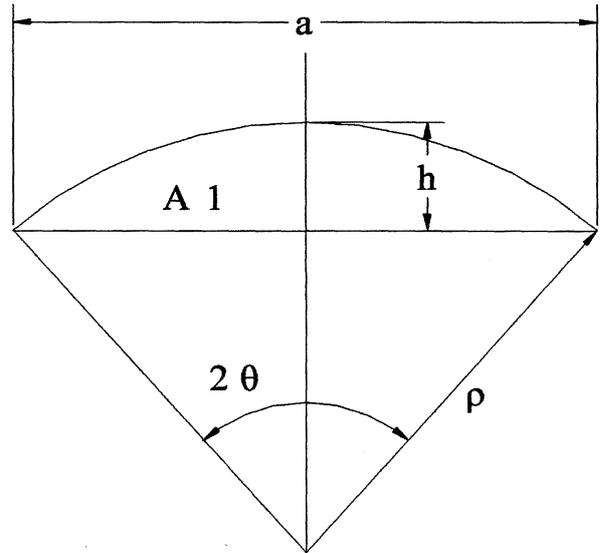
Figure 4. Variation of weld-bead penetration with effective heat input.



**Figura 5.** Variación de la altura del cordón de soldadura con la aportación efectiva del calor..

Figure 5. Variation of weld-bead height with effective heat input.

Rev. Metal. Madrid 37 (2001)



**Figura 6.** Relaciones geométricas para determinación del área del cordón de soldadura.

Figure 6. Geometrical relationships to determine weld-bead reinforcement area.

$$A_1 = \frac{2\theta}{2\pi} \pi \rho^2 - \frac{1}{2} (\rho - h)a \quad (5)$$

$$\text{sen } \theta = \frac{a}{2\rho} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{a^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (7)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{4ah}{a^2 + 4h^2} \quad (8)$$

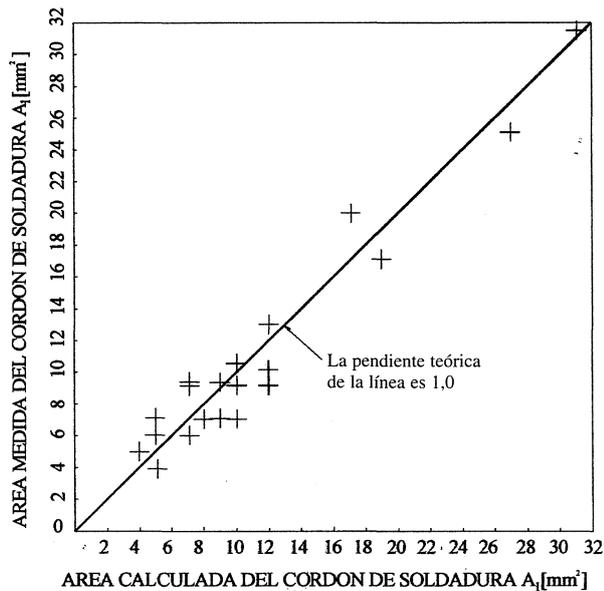
Sustituyendo de la serie McLaurin por:

$$\text{sen}^{-1} x = x + \frac{1}{6} x^3 \quad (9)$$

se obtiene:

$$A_1 = \frac{ah}{2} + \frac{1}{6} \frac{a^3 h}{(a^2 + 4h^2)} \quad (10)$$

Se midió el área de cada cordón de soldadura  $A_1$  (Tabla II) comparándola con el área calculada de la ecuación (10). En la figura 7 se presenta la comparación del área medida del cordón de



**Figura 7.** Comparación del área medida del cordón de soldadura frente a los valores calculados.

Figure 7. Comparison of measured and calculated weld-bead reinforcement area.

soldadura frente a los valores calculados de la ecuación (10). La concordancia entre los valores previstos (calculados) y medidos es muy ajustada y confirma la validez de la suposición anterior sobre la forma circular de la superficie de la sección del cordón de soldadura.

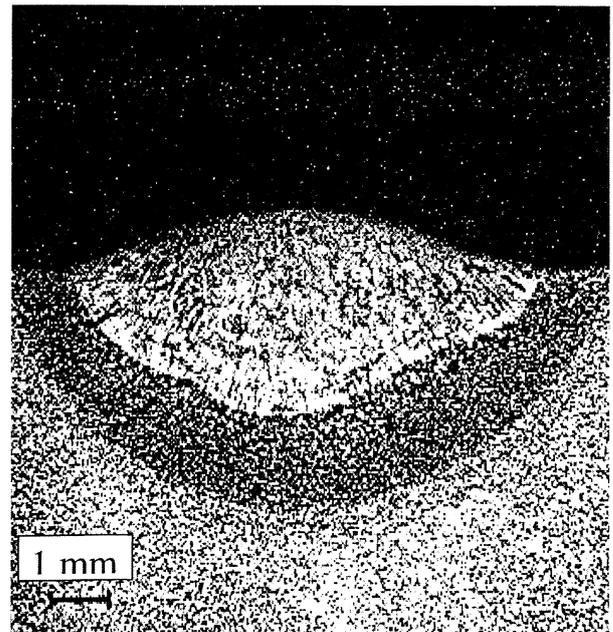
### 3. PREDICCIÓN NUMÉRICA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA ZAC

La ZAC de grano grueso de un cordón de soldadura consiste en la mezcla de ferrita y bainita (Fig. 8). El tamaño de granos de la ZAC es mayor en la línea de fusión y disminuye, progresivamente, con el aumento de la distancia de la línea de fusión hacia el interior de la placa base. Los ciclos térmicos de soldeo de una placa gruesa están determinados por la ecuación (11) [5 y 6], suponiendo que la zona afectada por la temperatura ZAC tiene forma circular, como se presenta en las figuras 2 y 9.

$$T = T_o + \frac{\phi}{2\pi kr} \exp(-\lambda v \zeta) \exp(-\lambda vr) \quad (11)$$

Donde:

- T: temperatura instantánea (°K)
- T<sub>o</sub>: temperatura inicial (temperatura de precalentamiento) (°K)
- φ: energía (potencia) del arco (J/s)



**Figura 8.** Microestructura en la ZAC de un cordón de soldadura en el acero al 1,25Cr-1Mo-0,25V.

Figure 8. Weld-bead cross section of 1.25Cr-1Mo-0.25V steel.

φ: ηVI

λ:  $\frac{1}{2\alpha}$  (mm/s)

α: difusividad térmica

k: conductividad térmica (W/mm°K)

r: distancia (radio) del arco de soldeo a un punto de interés (mm)

ζ: x - vt (mm) distancia del arco de soldeo que se encuentra en movimiento al punto de interés (Fig. 9)

v: velocidad del arco de soldeo (mm/s)

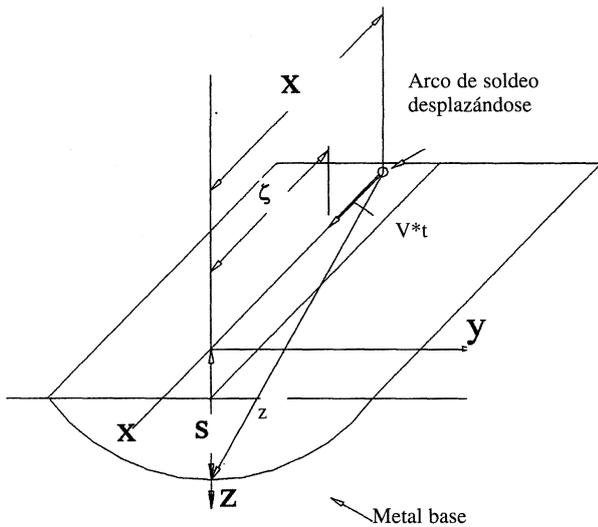
t: tiempo (s)

Cuando el arco de soldeo se encuentra exactamente en el punto de interés ζ = 0, la ecuación (11) toma la forma:

$$T = T_o + \frac{\phi}{2\pi kr} \exp(-\lambda vr) \quad (12)$$

y el radio S (Fig. 9) de los círculos que determinan los límites de varias zonas de la soldadura y ZAC se expresa en la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{r^2 - v^2 t^2} \quad (13)$$



**Figura 9.** Relaciones geométricas para determinar la temperatura instantánea en diferentes puntos del metal base durante el proceso de soldado.

Figure 9. Geometrical relationships to determine instant temperature in base metal during welding.

Sustituyendo de la serie McLaurin por:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} \quad (14)$$

se obtiene:

$$e^{(\lambda vr)} = 1 + \lambda vr + \frac{1}{2}(\lambda vr)^2 + \frac{1}{6}(\lambda vr)^3 \quad (15)$$

y la ecuación (12) toma la forma:

$$T = T_0 + \frac{\phi}{2\pi kr \left[ 1 + \lambda vr + \frac{1}{2}(\lambda vr)^2 + \frac{1}{6}(\lambda vr)^3 \right]} \quad (16)$$

Transformando la ecuación (16) se obtiene una ecuación del cuarto grado relativo a r:

$$r^4 + m_1 r^3 + m_2 r^2 + m_3 r + m_4 \quad (17)$$

donde:

$$B_1 = (T - T_0)\pi k \quad (18)$$

$$B_2 = \lambda v \quad (19)$$

$$m_1 = 3/B_2 \quad (20)$$

$$m_2 = 6/B_2^2 \quad (21)$$

$$m_3 = 6/B_2^3 \quad (22)$$

$$m_4 = -\frac{3}{B_1 B_2^3} \quad (23)$$

Resolviendo la ecuación (17) mediante la utilización del método Warmus<sup>[8]</sup>, se obtienen los valores de r en diferentes puntos del cordón/ZAC.

De acuerdo con el método Warmus la ecuación (17) se sustituye por:

$$(r^2 + M_1 r + \frac{1}{2} N_1)(r^2 + M_2 r + \frac{1}{2} N_2) = 0 \quad (24)$$

donde:

$$B = \frac{1}{2} m_1 \quad (25)$$

$$H = B^2 - m_2 \quad (26)$$

$$K = BH + m_3 \quad (27)$$

$$L = H^2 - 4m_4 \quad (28)$$

Para  $K \neq 0$ , que es el caso considerado, se tiene:

$$M_1 = B - \sqrt{Q} \quad (29)$$

$$N_1 = -\sqrt{QM_1} - H + \frac{K}{\sqrt{Q}} \quad (30)$$

$$M_2 = B + \sqrt{Q} \quad (31)$$

$$N_2 = \sqrt{QM_2} - H - \frac{K}{\sqrt{Q}} \quad (32)$$

Donde Q es la raíz positiva de la ecuación:

$$Q^3 - (B^2 + 2H)Q^2 + (2BK + L)Q - K^2 = 0 \quad (33)$$

La forma general de la ecuación (33) es:

$$(34) \quad aQ^3 + bQ^2 + cQ = 0 \quad (a \neq 0)$$

Sustituyendo:

$$Q = y - \frac{b}{3a} \quad (35)$$

se obtiene la ecuación:

$$y^3 + py + q = 0 \quad (36)$$

El operador  $\Delta$  se calcula de la ecuación:

$$\Delta = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 \quad (37)$$

Para  $\Delta > 0$ , que corresponde al caso considerado, se calcula la raíz real de la ecuación (36):

$$y_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \quad (38)$$

A continuación se calcula  $Q$  de la ecuación (35) y  $r$  de la ecuación (24), resolviendo las ecuaciones del segundo grado con los métodos conocidos.

La posición de la línea de fusión  $S_f$ , se determinó calculando el valor  $r$  de la ecuación (24) y después el valor  $S_f$  de la ecuación (13) para el momento en que la temperatura pico  $T(t)$  alcanzó la temperatura de fusión  $T_f$ .

Para  $t = 0$  se tiene:

$$S = r; T = T_f; S = S_f$$

Donde:

$T_f$ : temperatura de fusión ( $T_f = 1.520$  °C)

$S_f$ : radio de círculo-límite de fusión (Fig. 2)

$T_0$ : temperatura de precalentamiento ( $T_0 = 250$  °C)

$$\alpha = 0,5\lambda^{-1} = 0,067 \left[ \frac{s}{mm^2} \right]^{[9]}$$

$$k = 0,05 \left[ \frac{Jmm}{mm^2 s^{\circ}K} \right]^{[9]}$$

El valor obtenido del radio límite de la zona de fusión  $S_f$ , se ajustó, después, para coincidir con la penetración  $p$ , del cordón de soldadura, calculada

de la ecuación empírica (3), y todas las dimensiones de la ZAC se calcularon, relativamente, a este valor. De la misma manera, se calculó el radio del círculo  $S_R = S_{Ac3}$  (Fig. 2) que determina la posición de la región de los granos finos de la ZAC (temperatura dinámica  $T_{Ac3}$ ) y el radio del círculo  $S_D = S_{Ac1}$  que determina el límite de la zona intercrítica (temperatura dinámica  $A_{c1}$  donde se inicia la austenitización).

Para obtener estos valores se sustituyeron en la ecuación (17):

$T = T_{Ac3} = 882$  °C y  $T = T_{Ac1} = 697$  °C, respectivamente, para el material 1,25CrMoV [11].

Utilizando una forma de ecuación (11)<sup>[10]</sup>, se tiene la expresión de la temperatura en función de tiempo que representa un ciclo térmico particular:

$$T = T_o + \frac{\phi}{2\pi kr} \exp[-\lambda v(r - vt)] \quad (39)$$

Para predecir el límite de la zona (banda) de los granos gruesos mayores de 40 ( $\mu$ m) de la ZAC (Fig. 2), se incorporaron los ciclos térmicos de soldeo dados por la ecuación (39) a la ecuación (40), lo cual permite determinar el crecimiento rápido de los granos de austenita que ocurre en la ZAC de las aleaciones ferríticas al Cr-Mo-V. Para pequeños granos iniciales, el tamaño final de grano  $G$  está dado por la siguiente ecuación:

$$G^{nN} = \sum_{t=t_{TA}}^{t=t_{TF}} A \exp \left[ \frac{-E_{APP}}{RT(t)} \right] \Delta t \quad (40)$$

Donde:

$t_{TA}$ : tiempo en que la transformación de la austenita durante el calentamiento está completada, (s)

$t_{TF}$ : tiempo en que la transformación de austenita al producto de transformación ferrítica durante el ciclo de enfriamiento está completada y el crecimiento de granos está terminado, (s)

$T(t)$ : temperatura dependiente del tiempo durante el ciclo térmico dada por la ecuación (39)

$E_{APP}$ : energía aparente de activación para el proceso de crecimiento de granos (kJ/mol)

$A$ : constante de crecimiento de granos ( $mm^{nN}s^{-1}$ )

$nN$ : exponente de crecimiento de granos determinada por el gradiente térmico en la ZAC  
 $R$ : constante de gas (J/°Kmol)  
 $\Delta t$ : incremento de tiempo (s) aplicado para integrar numéricamente la ecuación (40)

Los valores de las constantes metalúrgicas anteriormente listadas, aplicados para determinación del tamaño de granos  $G$  en la ZAC, se presentan en la tabla III.

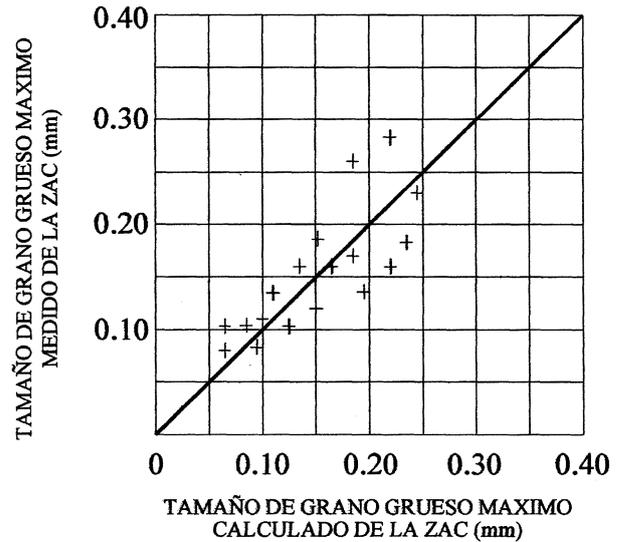
Los incrementos de tiempo,  $\Delta t$ , para integrar las ecuaciones (39) y (40) fueron de 0,01 s, y los incrementos del radio de granos gruesos,  $S_G$ , de 0,05 mm.

El radio  $r$  de la distancia del arco de soldeo a punto de interés (Fig. 9) se calculó de la ecuación (41), obtenida por la transformación de la ecuación (13) para incrementos de tiempo y radio de granos gruesos anteriormente mencionados:

$$r = \sqrt{s^2 + v^2 t^2} \tag{41}$$

Se realizaron las iteraciones necesarias para obtener el tamaño de grano grueso  $G \geq 40 \mu\text{m}$ , y para este punto de la ZAC se calculó la temperatura  $T_{G \geq 40 \mu\text{m}}$  y el radio límite de la zona de granos gruesos  $S_{G \geq 40 \mu\text{m}}$  de acuerdo con la figura 2.

Finalmente, contando con todos los límites (radios) de las zonas de interés de la ZAC del cordón de soldadura, éste puede representarse en la figura 2. La comparación del tamaño máximo de grano grueso en la ZAC medido y calculado se presenta en la figura 10. La zona de granos gruesos definida arbitrariamente como granos mayores a  $40 \mu\text{m}$  corresponde a las temperaturas pico mayores a  $1.200^\circ\text{C}$ . La concordancia de los resultados es sufi-



**Figura 10.** Comparación del tamaño de grano grueso máximo en la ZAC, medido y calculado.

*Figure 10. Comparison of measured and calculated HAZ grain size.*

cientemente razonable, tomando en cuenta las dificultades derivadas de la medición del tamaño de granos en la ZAC de soldadura y ciertas suposiciones hechas sobre la cinética de crecimiento de granos en los aceros al Cr-Mo-V.

El nivel general de concordancia de las mediciones experimentales y cálculos de los valores de la geometría de un cordón de soldadura y dimensiones de la ZAC provee la información cuantitativa suficientemente confiable para las aportaciones de soldadura y sustenta el uso del modelo para investigaciones de los efectos para aportaciones de multipasadas. La precisión de predicción de la microestructura en la ZAC depende críticamente

**Tabla III.** Constantes metalúrgicas del acero al 1,25Cr-1Mo-0,25V

*Table III. Metallurgical constants of 1.25Cr.1Mo-0.25V steel*

Temperatura de fusión, $T_f$	1.520	(°C)
Temperatura dinámica de $A_{c1}$	697	(°C)
Temperatura dinámica de $A_{c3}$	822	(°C)
Energía aparente para crecimiento de granos, $E_{APP}$	380	(kJ/mol)
Exponente de crecimiento de granos, $nN$	2,73	(-)
Constante de crecimiento de granos, $A$	$2,43 \times 10^{13}$	( $\text{mm}^{nN} \text{s}^{-1}$ )
Constante de gas, $R$	8,3	(J/°K)
Temperatura de terminación de transformación austenítica durante calentamiento, $T_A$	950	(°C)
Temperatura de terminación de transformación ferrítica durante enfriamiento, $T_F$	550	(°C)
Tiempo en que la transformación austenítica está terminada, $t_{TA}$	10	(s)
Tiempo de terminación de transformación ferrítica, $t_{TF}$	30	(s)

de las dimensiones del cordón de soldadura, las cuales se determinan empíricamente.

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología de la predicción de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano de la zona afectada por la temperatura (ZAC), en un cordón de soldadura aplicado a una placa gruesa del acero de baja aleación 1,25Cr-1Mo-0,25V por el proceso SMAW, con base en el conocimiento de dimensiones del cordón de soldadura, variables del proceso de soldeo y metalurgia básica de la ZAC, permite calcular, de forma adecuada, la microestructura en la ZAC para determinados parámetros de soldeo.

Los resultados obtenidos de la predicción de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano en la ZAC de un cordón de soldadura sustentan el uso del modelo para simular la microestructura de la ZAC en las soldaduras de multipasadas con el propósito de obtener el refinamiento de los granos de la bainita gruesa de la ZAC y mejorar la eficacia de la unión durante el proceso de soldeo.

#### REFERENCIAS

- [1] B. CHEW y P. HARRIS, *Met. Constr.* 11, 5 (1979) 229-234.
- [2] P.J. ALBERRY y W.K.C. JONES, *Met. Technol.* 4, 7 (1977) 360-364.
- [3] N. CHRISTENSEN, V. DAVIES y K. GJERMUNDSEN, *Br. Weld. J.* 12, 2 (1965) 54-75.
- [4] P.J. ALBERRY y W.K.C. JONES, *Met. Technol.* 9, 10 (1982) 419-426.
- [5] D. ROSENTHAL, *Weld. J.* 20, 5 (1941) 220-234.
- [6] P.S. MEYERS, O.A. UYEHARA y G.L. BORMAN, *U.S. Weld. Res. Council Bull.* 123 (1967) 1-46.
- [7] S.S. GLICKSTEIN, H.S. FERGUSON, E. FRIEDMAN, C.E. JACKSON y S. KOU, *Welding Handbook*, American Welding Society, Miami, E.E.U.U., 1991, pp. 65-87.
- [8] R. ZUBER, *Métodos Numéricos y Programación*, Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Bydgoszcz, 1972, pp. 83-88.
- [9] P.J. ALBERRY, B. CHEW y W.K.C. JONES, *Prior Austenite Grain Growth in the Heat Affected Zone of 0.5CrMoV Steel*, Central Electricity Generating Board, Report R/M/R230, 1976, pp. 8-12.
- [10] A.P. BENNETT, Report RD/M/N509, Central Electricity Generating Board, 1970, pp. 6-14.
- [11] M. ATKINS, *Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels*, Metals Park, OH, The Society, E.E.U.U., 1986.