

## **COMPORTAMIENTO DE LA MICROESTRUCTURA Y ANCHO DE LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE DURANTE SOLDADURA DE ACERO 4130 ENDURECIDO**

### **STUDY OF MICROSTRUCTURE AND WIDTH IN HEAT AFFECTED ZONE IN WELDING OF A 4130 HARDENED STEEL**

*Jorge Guerra-Álvarez<sup>1\*</sup>, Juan A. Pozo-Morejón<sup>2</sup>, Amado Cruz-Crespo<sup>2</sup>  
y Jorge V. Miguel-Oria<sup>2</sup>*

---

<sup>1</sup> Empresa Fabric Aguilar Noriega, Calle A no. 39 e/c, Arroyo Carrascal y Carretera a Planta Mecánica, Zona Industrial Noroeste, Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Marzo 23, 2018; Revisado: Octubre 3, 2018; Aceptado: Diciembre 21, 2018

---

#### **RESUMEN**

En el presente trabajo se estudió el comportamiento del ancho y microestructura de la zona afectada térmicamente (ZAT) en función de la corriente y la temperatura de precalentamiento en la soldadura con electrodo fusible y protección gaseosa (GMAW) de un acero 4130 endurecido. La variación de la corriente y la temperatura de precalentamiento, manteniendo constante la velocidad de soldadura, se realizó en base a un diseño de experimentos de tipo factorial. Fue realizado el análisis metalográfico de una muestra del metal base y de muestras extraídas de los cordones sobre chapa, obtenidos para cada condición experimental. Fueron, también, obtenidos los perfiles de dureza para cada condición de ensayo. A partir de los perfiles de dureza fue definido el ancho de la ZAT como el intervalo con valores bajos de dureza. Como resultado del trabajo se establece una relación cuantitativa que evidencia que el aumento de la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento provocan un aumento del ancho de la ZAT, por lo que la mejor condición es la menor corriente y sin precalentamiento. Se concluye también que la ZAT presenta tres subzonas con microestructuras diferentes.

**Palabras clave:** acero aleado; GMAW; microestructura; ZAT.

---

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

---

\* Autor para la correspondencia: Jorge Guerra-Álvarez, Email: [jorge@plantamec.co.cu](mailto:jorge@plantamec.co.cu)

## **ABSTRACT**

In present work, the width and microstructure behavior of the thermally affected zone (TAZ) was studied as a function of electrical current and preheating temperature in welding with a fused electrode and gaseous protection (GMAW) of a hardened 4130 steel. Current variation and preheating temperature, keeping the welding speed constant, was carried out based on a factorial experiments design. Metallographic analysis of a sample of base metal and samples extracted from the strands on sheet metal, obtained for each experimental condition, was carried out. The hardness profiles also were obtained for each test condition. From the hardness profiles the width of the TAZ was defined as the interval with low hardness values. As a result of the work, a quantitative relationship is established which shows that welding current increase and preheating temperature cause an increase in TAZ width, so that the best condition are lowest current and without preheating. It is also concluded that the TAZ presents three subzones with different microstructures.

**Key words:** alloy steel; GMAW, microstructure; TAZ.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para la fabricación de equipos de usos disimiles que soportan impactos a elevada velocidad, son utilizados los blindajes homogéneos, aunque se pueden usar otros tipos, como los compuestos por más de un elemento de blindaje. Los aceros empleados generalmente para este fin son de baja aleación, con tratamientos térmicos de temple y revenido bajo, logrando máxima dureza en todo el espesor. Se conoce, además, que la principal problemática durante la soldadura de los aceros para blindaje la constituye su tendencia a la fisuración en frío, teniendo en consideración la alta dureza alcanzada, además de la degradación producida por el reblandecimiento de la zona afectada térmicamente (ZAT), lo que puede afectar su resistencia al impacto (Martínez y col., 2011, Alkemade, 1996, MIL-DTL-12560K (MR), 2013).

La literatura reporta que la ZAT de una unión soldada sobre estos aceros consta de tres subzonas. Una primera al borde del cordón, con alta dureza y formada de martensita transformada que sufre un calentamiento por encima de  $A_{C3}$ , otra a continuación denominada intercrítica, la cual es calentada entre  $A_{C1}$  y  $A_{C3}$ , donde ocurre el mayor reblandecimiento y la martensita se transforma parcialmente en otros compuestos de menor dureza y más estables, y una tercera calentada por debajo de  $A_{C1}$ , denominada subcrítica, con estructura de martensita sobre revenida con diferentes valores de dureza, dependiendo de la temperatura de revenido alcanzada. A lo largo de esta última zona la dureza se va recuperando hasta llegar al valor inicial del metal base (Castilla y Unfried, 2008; Mazuera y col., 2011).

La ZAT en su totalidad es la región de mayor riesgo ante los impactos a alta velocidad, a causa del reblandecimiento que experimenta el acero bajo el efecto del ciclo térmico. Por lo anterior, siempre se pretende que el ancho de la ZAT sea lo menor posible. Si bien es cierto, que la literatura especializada establece que la menor energía de entrada disminuye el ancho de la ZAT, no existen evidencias de publicaciones que muestren la dependencia cuantitativa de este parámetro geométrico de la unión, respecto a la

corriente y la temperatura de precalentamiento para la soldadura GMAW de un acero 4130 en estado de máxima dureza.

El objetivo del presente trabajo consiste, en establecer la relación cuantitativa que vincula el valor de la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento en la soldadura GMAW del acero AISI 4130 (30XMA), de medio carbono y baja aleación, con tratamiento a máxima dureza, con el ancho de la ZAT. Se evalúa también el comportamiento de la microestructura de las diferentes subzonas de la ZAT.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Caracterización del acero**

La tabla 1, muestra el rango especificado de composición química de un acero AISI 4130 (30XMA), la cual se corresponde con el sistema C – Cr – Mo, Cary (1994); (Sorokin y col., 2001). Este acero fue sometido, previo a la soldadura, a un tratamiento térmico de temple y revenido que garantizó una dureza de partida de 440 a 455 HV 500.

**Tabla 1.** Composición química del acero, en por ciento de masa

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
0,28-0,33	0,20-0,35	0,4-0,6	0,8-1,1	0,15-0,25

El metal de aporte utilizado para la realización de la unión soldada, es un alambre tubular de alta resistencia del tipo *metal cored*, OK TUBROD 110 MC, que garantiza una resistencia típica de 850 MPa y una elongación relativa típica de 18 % (ESAB, 2014). Según AWS, este aporte es clasificado como E 110 C G (ESAB, 2014). De acuerdo con ESAB el metal de aporte debe ser aplicado en base a las siguientes indicaciones generales: empleo de corriente directa, electrodo conectado al positivo, gas de protección 75 % Ar + 25 % CO<sub>2</sub>, soldadura en todas las posiciones y garantiza un hidrógeno difusible menor que 4 ml/100 g de metal depositado.

### **2.2 Planificación experimental**

Se han considerado como variables independientes “Xi”, la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento. La corriente, de acuerdo con el fabricante del electrodo OK TUBROD 110 MC, debe enmarcarse en el intervalo de 150 a 330 A, para un diámetro del electrodo de 1,2 mm, por lo que se decide que esta variable asuma estos valores extremos y un nivel medio de 240 A (ESAB, 2014). En el caso de la temperatura de precalentamiento, esta no debe superar la temperatura de revenido de 200 °C, ya que es la que garantiza la dureza requerida para soportar impactos a elevada velocidad. Por ello, se decide establecer como valor máximo de temperatura de precalentamiento, 200 °C, y como valor mínimo la ambiente, 30 °C cuando no hay precalentamiento, y un valor medio de 115 °C.

El diseño del tipo factorial posibilitará correlacionar estas variables independientes con las variables dependientes, asociadas a propiedades que se obtienen en la ZAT (ancho de la ZAT en este caso). El número de experimentos a realizar es de 9, calculado a partir de  $N=3^k$ , para tres niveles y un “k” número de variables independientes, según se observa en la Tabla 2.

Como variable dependiente se consideró el ancho de la ZAT. Ello obedece a que la ZAT constituye la región más sensibilizada frente a los impactos.

**Tabla 2.** Matriz experimental del diseño

No	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	+	+	330	200
2	+	-	330	30
3	-	+	150	200
4	-	-	150	30
5	+/-	+/-	240	115
6	+	+/-	330	115
7	-	+/-	150	115
8	+/-	+	240	200
9	+/-	-	240	30

Donde:

X<sub>1</sub> – es la corriente de soldadura en Amperes

X<sub>2</sub> – es la temperatura de precalentamiento en grados Celsius

### **2.3. Realización y caracterización de los depósitos**

Las chapas fueron cortadas con dimensiones de 200x200x6 mm. Para la realización de la soldadura, se fijó la pistola de soldadura semiautomática sobre un tractor de oxicorte, de manera que se garantizara una velocidad de soldadura y una distancia pieza – boquilla de contacto constante. Fueron realizados depósitos sobre chapas, empleando la combinación de variables de entrada que muestra la Tabla 2, con un flujo de gas de protección (argón 75 % + CO<sub>2</sub> 25 %) de 18 L/min. La temperatura de la unión fue medida con un pirómetro infrarrojo, con resolución de ± 0,1 °C. La distancia a la que se realizó la medición de la temperatura fue de 10 a 20 mm del borde del cordón, como se recomienda por norma (NC-ISO 13916, 2004).

Para la caracterización metalográfica y para la realización de los perfiles de dureza, se extrajeron las muestras mediante cortes transversales, de los depósitos correspondientes al plan experimental de la tabla 2. La preparación de muestras se realizó en correspondencia con la norma ASTM E-3, (2001). El ataque fue realizado con Nital al 2 %, en correspondencia con la Norma ASTM E-407, (1999). La observación y adquisición de las imágenes metalográficas se realizó por microscopía óptica, con un microscopio óptico Nephot 32. Fueron tomadas las imágenes micrográficas representativas de las diferentes subzonas de la ZAT. De manera similar fue preparada una muestra de metal base.

El ancho de la ZAT para los aceros de blindaje, se corresponde con el ancho de la zona adyacente al cordón, donde cae la dureza por debajo del nivel que muestra el metal base previo a la soldadura (Zalazar y col., 2009; Castilla y Unfried, 2008). En el presente trabajo, el ancho de la ZAT fue establecido a través de los valores del perfil de dureza. Se comenzó a medir el ancho de la ZAT a partir del borde del cordón (isoterma que se corresponde con la temperatura de sólido de la aleación), se extendió por una zona donde la dureza disminuye, y se consideró como punto final de dicha zona, aquel donde la dureza se recupera hasta el valor inicial que posee el metal base no afectado por el

calor, de aproximadamente 440 HV 500 (isoterma de inicio del sobrerrevenido). Para el acero abordado en el trabajo, esta dureza representa la obtenida producto del tratamiento térmico aplicado previo a la soldadura.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### ***3.1 Efecto de la corriente de soldadura y de la temperatura de precalentamiento sobre el ancho de la ZAT***

En la Tabla 3 se presentan los valores de dureza en función de la distancia para cada condición experimental de la Tabla 2, en base a lo cual fue establecido el ancho de la ZAT para cada condición de soldadura (Tabla 4).

A partir de las variables independientes (Tabla 2) y de la respuesta de ancho de la ZAT (Tabla 4), se realizó el análisis estadístico con el software STATGRAPHICS Centurión versión XV.1, obteniéndose la ecuación de regresión 1, en la cual resultan significativos los coeficientes de la corriente (Valor P de 0,0064) y la temperatura de precalentamiento (Valor P de 0,0006). Esta ecuación permite, en el rango de variación de las variables, predecir la magnitud del ancho de la ZAT en la soldadura GMAW de este tipo de acero de blindaje, a partir de las variables corriente de soldadura y temperatura de precalentamiento del procedimiento a emplear.

$$\text{Ancho ZAT} = 3,234 + 0,016 \cdot I_s + 0,027 \cdot T_{\text{Preca}} ; \text{ con } R^2_{\text{aj}} = 87,71 \% \quad (1)$$

La Figura 1 muestra que el aumento de ambas variables de entrada, corriente de soldadura y temperatura de precalentamiento, provoca el incremento del ancho de la ZAT. Lo anterior significa, que el aumento de ambas variables de entrada provoca que se aleje del borde de la soldadura la isoterma de inicio del sobrerrevenido de la estructura de partida del acero, con un cambio microestructural y de caída de la dureza. No obstante, es evidente en la Figura 1 que la temperatura de precalentamiento afecta en mayor medida la variación del ancho de la ZAT, lo que se corresponde con un mayor coeficiente de esta variable en la ecuación 1. Esto significa que, la disminución del gradiente térmico entre la zona fundida a alta temperatura y el metal base, producida por el aumento de la temperatura de precalentamiento de la pieza, influye en mayor medida en que se alejen las isotermas que limitan la ZAT, respecto al aumento del calor introducido en la soldadura GMAW, provocado por el incremento de la corriente.

Desde el punto de vista de la seguridad del equipo para soportar impactos a elevada velocidad, lo mejor entonces será soldar con la menor corriente (menor energía de entrada del proceso) y menor temperatura de precalentamiento, con vistas a minimizar el ancho de la ZAT (hasta 5,5 mm para estas condiciones) y consecuentemente no disminuir excesivamente la resistencia y dureza de la zona.

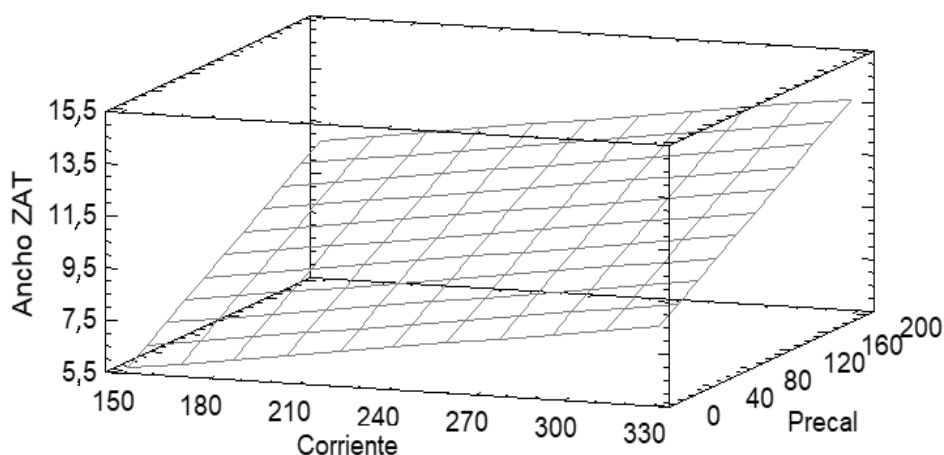
**Tabla 3.** Perfiles de dureza HV 500 de la ZAT

<i>Distancia (mm)</i>	<i>Dureza HV 500 para cada condición experimental</i>								
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
0	345	355	315	363	325	325	367	325	322
1	348	322	308	330	320	332	365	--	312
1,5	--	298	302	342	295	--	342	--	308
2	323	287	318	378	302	337	310	290	312
2,5	--	325	340	--	318	--	306	275	339
3	317	316	354	412	320	304	315	282	379
4	260	326	358	420	--	266	340	318	391
4,5	265	--	--	--	346	289	--	--	--
5	293	330	383	425	--	305	379	--	430
5,5	--	--	--	440	380	--	--	335	--
6	318	381	410	440	--	--	400	--	434
6,5	--	--	--	--	--	340	--	--	440
7	--	--	--	440	409	--	425	350	--
7,5	343	390	--	440	--	367	438	--	450
8	--	--	427	--	430	--	440	--	450
8,5	350	400	--	--	440	373	450	386	455
9	--	440	--	--	445	--	--	--	--
9,5	379	440	428	--	445	420	450	--	456
10	--	--	432	--	450	430	--	414	--
10,5	410	440	440	--	450	440	--	430	--
11,5	410	--	450	--	450	--	450	440	--
12	435	--	450	--	--	445	--	--	455
12,5	440	440	--	--	--	450	--	450	--
13	440	--	--	--	--	450	--	450	455

**Tabla 4.** Ancho de la ZAT

<i>Condición Experimental</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>Ancho ZAT (mm)</i>	12,5	9,0	11,5	5,5	10,0	12,5	8,5	12,5	8,5

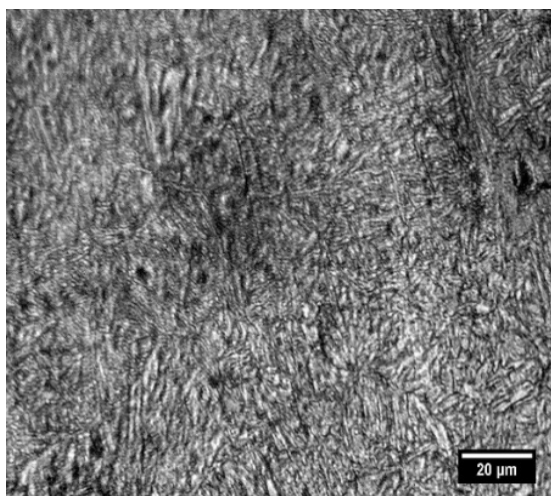
Se observa (Tabla 4), que la ZAT posee mayor ancho en la soldadura de este acero 4130 con tratamiento a máxima dureza (oscila entre 5,5 mm y 12,5 mm), en comparación a la que se produce durante la soldadura de este mismo material, pero con tratamiento a baja dureza, o de aceros al carbono y de baja aleación comunes, que generalmente es inferior a 3 mm para el proceso de soldadura GMAW. Lo anterior se explica a partir de que durante la soldadura GMAW de este acero 4130, en estado de baja dureza, o de los aceros al carbono y de baja aleación, generalmente la isoterma externa que limita la ZAT del metal base no afectado coincide con la de 727 °C ( $A_{C1}$ ), mientras que durante la soldadura del acero con alta dureza de partida, la isoterma límite presenta una temperatura mucho menor, que representa el menor valor de temperatura que provoca un sobrerrevenido de la estructura martensítica de partida, que en alguna medida produce una reducción de dureza.



**Figura 1.** Comportamiento del ancho de la ZAT en función de la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento

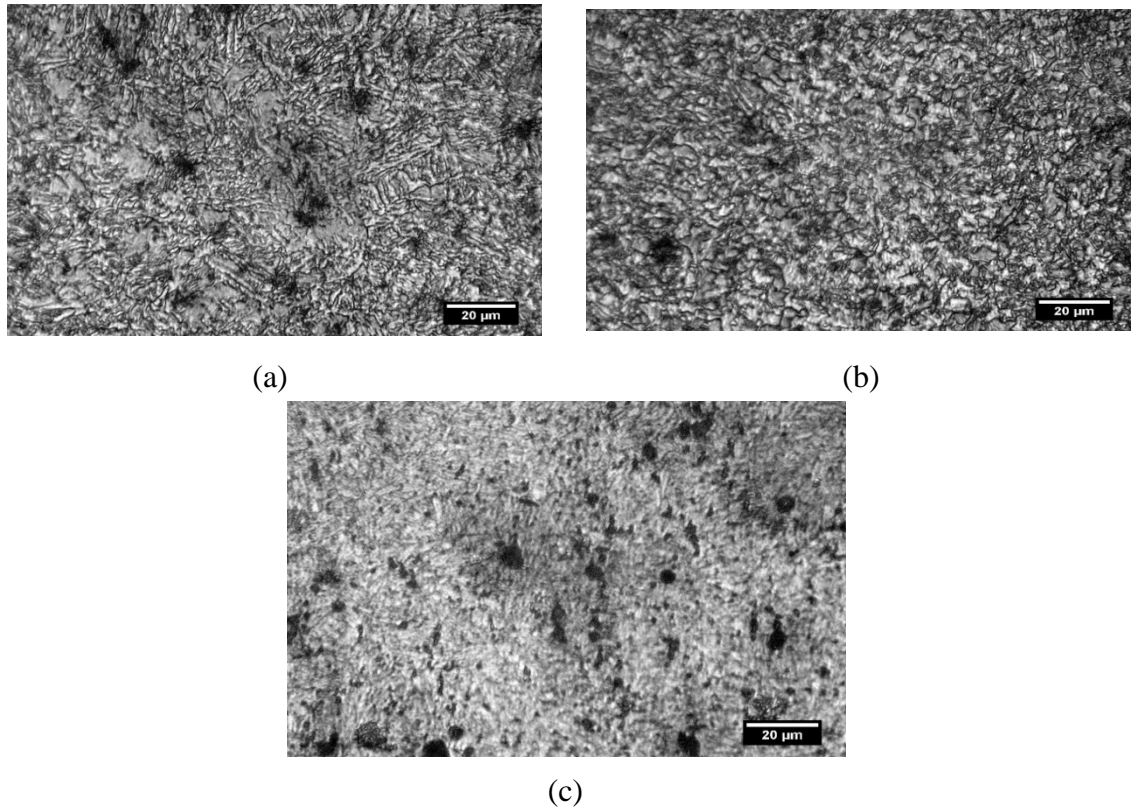
### 3.2. Análisis de la microestructura de la ZAT

En la Figura 2 se muestra la microestructura del metal base en el estado de partida de temple y revenido a máxima dureza. La microestructura que se observa es de martensita revenida de alta estabilidad debido al elevado contenido de Mn y Si, formando probablemente una estructura compleja con carburos del tipo  $\epsilon$  por el elevado contenido de Si, en correspondencia a lo que refiere Guliáev (1983).



**Figura 2.** Estructura inicial de estado temple y revenido a máxima dureza

En el estudio microestructural, realizado a la ZAT de este acero para cada condición de soldadura correspondiente a la Tabla 2, se evidenció una microestructura de carácter general similar, caracterizada por tres subzonas, aunque evidentemente la variación de energía de entrada provocó ciertas diferencias entre una y otra condición. La Figura 3 muestra, a modo de ejemplo, la microestructura correspondiente a cada una de estas subzonas de la condición experimental 4, que fue la de menor ancho de la ZAT y por tanto la considerada de mejor desempeño, si se toma solo en consideración este criterio. La presencia de tres subregiones en la ZAT coincide con lo reportado por un número importante de autores (Unfried y col., 2009; Castilla y Unfried, 2008).



**Figura 3.** Microestructura de las zonas de la ZAT. a) Zona sobrecalentada adyacente al borde del cordón (Zona I); b) Zona intercrítica, calentada entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$  (Zona II); Zona subcrítica o sobrerrevenida, calentada por debajo de  $A_{c1}$  (Zona III)

### 3.2.1. Zona I: Sobrecalentada

Presenta microestructura a base de martensita transformada a alta temperatura. Está compuesta por martensita en forma de listones, características de las temperaturas superiores a 1300 °C, donde la martensita perdió su tetragonalidad por la migración del carbono. En esta subzona es probable que estén presentes, además, carburos  $\epsilon$ , producidos en el proceso de enfriamiento. La dureza de esta subzona es mayor que en las otras, ya que la dureza de la martensita es función de la cantidad de carbono y no del tamaño de grano. Como es evidente, dado que el perfil de dureza fue realizado con indentaciones de grandes huellas, correspondientes a una carga relativamente alta, no es posible percibir la transición de una zona a otra dentro de la ZAT a partir de los perfiles de dureza (Tabla 3).

### 3.2.2. Zona II: Intercrítica

En esta subzona el metal alcanzó una temperatura menor, entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ , en ella hay una mezcla de estructuras con tendencia a la esferoidización, asociada a la posible presencia de los carburos tipo  $\epsilon$ , formados durante el temple, pero transformada durante el enfriamiento, siendo una estructura más estable. Como resultado de la historia térmica experimentada en esta subzona se forma una estructura compuesta probablemente por varios constituyentes (martensita revenida, carburos tipo  $\epsilon$ , bainita y ferrita, dependiendo de la temperatura alcanzada durante el ciclo térmico), con una dureza inferior a todas las demás en la ZAT (Unfried y col., 2009).



### **3.2.3. Zona III: Subcrítica (sobrerrevenida)**

En esta zona, durante la soldadura, no alcanzó la línea eutectoide del acero, por lo que solo se produjo un sobrerrevenido. Esta región está compuesta de martensita sobrerrevenida, con poca estructura residual transformada durante el enfriamiento, la que va disminuyendo su cantidad a medida que se aproxima a la isoterma de fin de ancho de la ZAT, y carburos  $\epsilon$  (Unfried y col., 2009). La microestructura de esta subzona depende de la temperatura máxima alcanzada durante el sobrerrevenido y por consiguiente su dureza va aumentando progresivamente, hasta alcanzar la del metal base (frontera ZAT – metal base en estado de partida).

## **4. CONCLUSIONES**

1. El incremento de la corriente de soldadura y de la temperatura de precalentamiento conducen al aumento del ancho de la ZAT (el valor mínimo obtenido es de 5,5 mm para la condición de menor aporte de calor sin precalentamiento y el máximo valor es de 12,5 mm para la condición de mayor aporte de calor y mayor temperatura de precalentamiento), lo que provoca que se eleve el riesgo de penetración frente a los impactos. De estos dos parámetros, la temperatura de precalentamiento muestra un efecto mayor. Por otro lado, estos anchos de ZAT son mucho mayores que los reportados durante la soldadura GMAW de aceros en condiciones normales de baja dureza de partida.
2. La ecuación de regresión obtenida permite predecir el ancho de la ZAT en una soldadura a realizar con parámetros enmarcados dentro del rango de variación de las variables evaluadas. De modo similar, se pueden seleccionar la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento que aseguren un ancho de la ZAT deseado.
3. La microestructura del acero de blindaje experimenta cambios bajo el efecto que impone la variación de la corriente y la temperatura de precalentamiento. En todos los casos la ZAT está caracterizada por tres subzonas, siendo la intercrítica, con temperaturas máximas que se enmarca entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ , la de una microestructura más propensa a la pérdida de dureza, con caídas de hasta 180 unidades Vickers, y consecuentemente la que más incide en la pérdida de capacidad para soportar impactos a elevada velocidad.

## **REFERENCIAS**

- Alkemade, S.J., DSTO-TR-0320, The Weld Cracking Susceptibility of High Hardness Armour Steel., DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996, pp. 1 - 27.
- ASTM, E – 3., Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2001, pp. 1 – 13.
- ASTM, E 407., Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, 1999, pp. 1 – 21.
- Cary, H., Modern welding technology., Third Edition, Regents/Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994, pp. 1-780.
- Castilla, I., y Unfried, J., Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso SMAW y metal de aporte ferrítico de alta resistencia., Ciencia & Tecnología de Buques,

Vol. 2, No 3, 2008, pp. 25-38.

ESAB, Consumíveis para soldagem, arames tubulares, aços de baixa liga, OK TUBROD 110 MC, ESAB, 2014. (Consultado en Diciembre de 2014). Disponible en:

<http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=0031135&tab=2>

Guliáev, A.P., Metalografía. Tomo I, MIR – MOSCU. Segunda edición, 1983, pp. 1- 335.

Martínez, A., Miguel, V., Coello, J., Navarro, A., Calatayud, A., Manjabacas, M.C., Influencia de la técnica de soldadura multi pasadas y de los tratamientos térmicos de precalentamiento y post-soldadura en el comportamiento de uniones GMAW de un acero microaleado HARDOX 400., Revista de Metalurgia, Vol. 47, No. 1, 2011, pp. 1 – 15.

Mazuera, D., Suárez, J.A., Giraldo, J.E., Desarrollo de un Procedimiento de Soldadura para juntas de acero de blindaje MIL A 46100 con Proceso GMAW., Dyna, Año 78, No. 168, 2011, pp. 65-71.

MIL - DTL - 12560 K (MR)., Department of defense. Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous (For use in Combat - Vehicles and For Ammunition Testing). Ministry of Defence, 2013, pp. 1 – 52.

NC-ISO 13916., Oficina Nacional de Normalización, ONN, Soldadura - Guía para la medida de las temperaturas de precalentamiento entre pasadas y de mantenimiento del precalentamiento, 2004, pp. 1-7.

Sorokin, V., Guervaciev, M., Palieva, V., Guervacieva, I., Palieva, S., Aceros y Aleaciones: Marcador., Ed. Intermet Engineering, 2001, pp. 1-608.

Unfried, J., Garzón, C.M., Giraldo, J.E., Numerical and experimental analysis of microstructure evolution during arc welding in armor plate steels., Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No 4, 2009, pp. 1688-1700.

Zalazar, M., De Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., Baralla, E., Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería., Soldagem Insp., Vol. 14, No. 1, 2009, pp. 036-046.