

# EFECTO DE EMPLEAR ENFRIADORES DE COBRE EN LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE DE UN ACERO MIL A46100

## EFFECT OF COPPER BACKING ON THE HEAT AFFECTED ZONE ON THE STEEL MIL A46100

JOHNNATAN RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ

*Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, jrodrig@unalmed.edu.co*

JORGE ENRIQUE GIRALDO BARRADA

*Profesor Asociado, Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, jegirald@unal.edu.co*

Recibido para revisar Noviembre 10 de 2008, aceptado Junio 17 de 2009, versión final Julio 17 de 2009

**RESUMEN:** Se estudió el efecto de emplear enfriadores de cobre como platina de respaldo en la ZAT de un acero de alta resistencia y baja aleación. Se soldaron láminas de 4,3 mm de espesor con el proceso SMAW en juntas a tope, utilizando un electrodo E312 de diámetro 1/8". Se emplean dos espesores de lámina de cobre: 3/8" (A) y 1/4" (B). Se utilizaron dos posiciones de soldadura: la primera, posición plana (10° de inclinación) y la segunda, posición vertical (63° de inclinación) buscando dos entradas de calor. Se encontró que la variación en el espesor de la lámina de cobre no reduce el ancho de la ZAT, sin embargo se observó una disminución de aproximadamente 2 mm de la ZAT y de 3 mm del pozo de soldadura en comparación con soldaduras realizadas con el electrodo E312 de diámetro 3/32" en dos pases de soldadura.

**PALABRAS CLAVE:** Acero de alta resistencia y baja aleación, ZAT, electrodo E312, SMAW, enfriadores de cobre

**ABSTRACT:** The effect of copper backing on the heat affected zone (HAZ) of a high – strength low - alloy steel (HSLA) was studied. Plates with 4,3 mm thicknesses were welded with the process SMAW in butt joint, electrodes E312 to diameter 1/8" were used. Two thickness of copper backing were employed: 3/8" (A) and 1/4" (B). Two welding positions were used: the first, flat position (10° tilt) and the second, vertical position (63° tilt) looking two heats input. It was found that the variation of the plate thickness does not reduce the HAZ's, however a reduction of approximately 2 mm of the HAZ and 3 mm of the welding pound were found compared with welding carried out with an electrode E312 to diameter 3/32" in two pass.

**KEY WORDS:** High – strength low - alloy steel (HSLA), HAZ, electrode E312, SMAW, copper backing.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la industria militar para la fabricación de embarcaciones blindadas, se requieren aceros con alta dureza y tenacidad, estas características mecánicas las ofrecen los aceros microaleados. Los aceros microaleados, como el acero MIL A46100, contienen pequeños porcentajes de elementos aleantes, los cuales sumados a un tratamiento término de temple y revenido a baja

temperatura, ofrecen las características mecánicas exigidas para las aplicaciones blindadas. Las propiedades de estos aceros se deben a la microestructura martensítica alcanzada durante el temple.

Esta microestructura se caracteriza por una alta dureza pero no ofrece un buen comportamiento

ante los impactos debido a su fragilidad. por tanto se requiere un revenido a baja temperatura el cual aumenta su tenacidad, sin afectar considerablemente su dureza. El proceso de manufactura más adecuado para la unión de láminas utilizadas en aplicaciones blindadas es la soldadura. Este proceso suministra una gran cantidad de energía localizada, la cual afecta significativamente la zona adyacente al cordón de soldadura, esta zona es llamada la zona afectada térmicamente (ZAT).

La ZAT experimenta cambios microestructurales que pueden afectar algunas de las propiedades mecánicas y por ende el comportamiento en servicio de la unión soldada. En el presente estudio se busca reducir el ancho de la ZAT con la utilización de láminas de respaldo de cobre basados en estudios anteriores donde se estudió el efecto de la entrada de calor [1] y la composición química, utilizando laminas de cobre y gas de purga como enfriadores externos [2]. Además, se ha estudiado el efecto que tiene el material de aporte en la microestructura de la ZAT [3] Se estudió el efecto de emplear láminas de respaldo de cobre como enfriadores, de espesores 3/8" (A) y 1/4" (B), en láminas de 152x152 mm soldadas con el electrodo AWS E312, en una junta a tope con un pase de soldadura, utilizando el proceso de soldadura SMAW Se hicieron pruebas en dos posiciones. La primera plana (10° de inclinación) y la segunda vertical (63° de inclinación). Se estudió el efecto de dos espesores de lámina de respaldo de cobre, con dos entradas de calor y se realizaron comparaciones entre de los anchos de la ZAT alcanzados en este trabajo y los obtenidos en la referencia [3].

## 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

El material base es un acero microaleado, templado y revenido a baja temperatura para obtener un microestructura de martensita revenida con una dureza mínima de 490 HV, la resistencia a la tracción promedio del material es de aproximadamente de 169 kg/mm<sup>2</sup> (1660 MPa ó 240000 psi), la composición química del acero MILL A46100 utilizado como material base se

muestra en la Tabla 1. Los electrodos E312-16 se encuentran estandarizados bajo la norma AWS/ASME: A5.4; SFA 5.4 [4], se utilizó un electrodo de diámetro 1/8". En la Tabla 2 se puede observar la composición química de este electrodo.

**Tabla 1.** Composición química del acero MILA46100

**Table 1.** Chemical composition of MILA46100 steel

Elemento	% / Wt	Elemento	% / Wt
C	0,284	Mn	0,899
V	0,007	Sb	0,001
Al	0,020	Ti	0,031
Sn	0,008	P	0,010
Cu	0,177	S	0,002
Cr	0,300	Pb	0,005
Si	0,534	Ni	0,192
Fe	Balance	Mo	0,243

**Tabla 2.** Composición química del electrodo E312, diámetro 1/8"

**Table 2.** Chemical composition of electrode E312, diameter 1/8"

Elemento	% / Wt	Elemento	% / Wt
Fe	59,481	Cr	30,085
C	0,116	Mo	0,224
Si	0,474	Al	0,016
Mn	1,441	Cu	0,062
S	0,009	Ti	0,017
P	0,024	V	0,178
Ni	7,872		

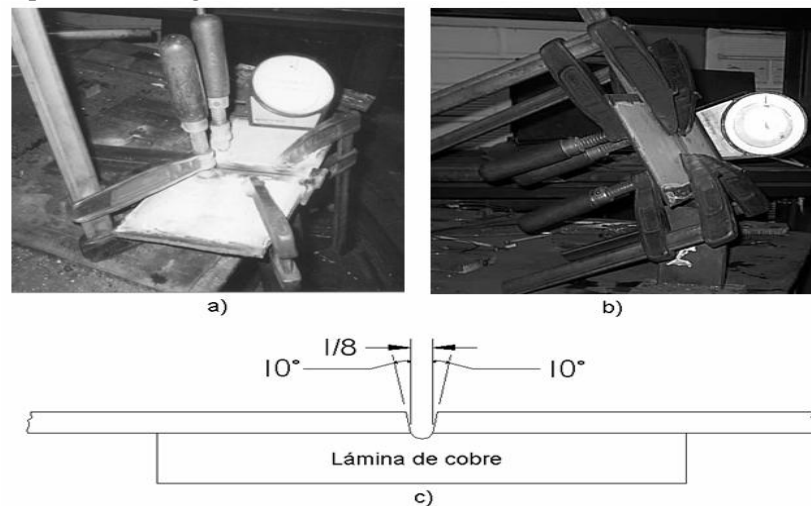
### 2.2 Soldadura de cupones

Se utilizaron láminas de 6"x6" (152x152 mm), con una separación de raíz de 1/8" y un bisel aproximado de 10° (ángulo debido al corte con plasma). Se realizó una junta a tope con un solo pase de soldadura. Se realizaron pruebas en dos posiciones, la primera plana (10° de inclinación), esta leve inclinación facilita el llenado total de la junta y la segunda vertical (63° de inclinación). Además, se utilizaron dos espesores de platina de respaldo, espesor A de 3/8" (9,53 mm) y el espesor B de 1/4" (6,35 mm). Para cada una de las posiciones se realizaron seis pruebas, tres con lámina de cobre de espesor 3/8" (A) y tres con el espesor 1/4" (B). Además, para evitar la propagación de errores los ensayos se ejecutaron de forma aleatoria. Para la elaboración de las soldaduras se utilizó un equipo Miller XMT-300

para aplicar los cordones de soldadura manualmente. Para cada cordón se registro el voltaje y amperaje que presentó el visualizador del equipo de soldadura y, además, se cronometró el tiempo gastado por el operario en la realización de los cordones de soldadura. La inspección de los cordones de soldadura se realizó por medio de líquidos penetrantes y radiografía. La inspección radiográfica se realizó

con los siguientes parámetros: 140 kV y 2,7 mA min.

En la Figura 1 se muestran las posiciones de soldadura utilizadas para la evaluación del efecto en la ZAT al emplear láminas de cobre como respaldo y, además, un esquema de la junta utilizada.



**Figura 1.** a) Posición plana (Inclinación a 10°). b) Posición vertical (Inclinación a 60°). c) Esquema de la junta  
**Figure 1.** a) Flat position (10° tilt) b) Vertical position (60° tilt) c) Joint sketch

### 2.3. Ensayos de laboratorio

Luego de realizar los cordones de soldadura, se extrajo una probeta de 50x15 mm para cada cupón de soldadura. Las probetas fueron cortadas a una distancia igual al 75% de la longitud total del cordón, esta decisión se basó en la longitud necesaria para alcanzar el estado cuasi-estacionario [5] donde las temperaturas pico y las isoterms entre dos temperaturas se vuelven constantes, mientras la fuente se mueve a cierta velocidad y la energía permanece constante.

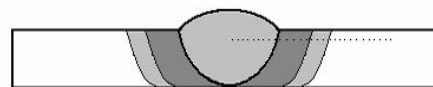
#### 2.3.1. Observación metalográfica

las áreas de la zona afectada térmicamente (ZAT) en las probetas extraídas de los cupones a tope para ambas entradas de calor. Luego de ser cortadas, las muestras fueron pulidas y atacadas con una solución líquida a base de ácido nítrico y alcohol (Nital al 2%). Las observaciones se realizaron con un microscopio óptico Olympus

PME 3B con capacidad de aumentos desde 5x hasta 80x y , además, se tomaron macrografías del área transversal del cordón para cada una de las probetas utilizando un estroboscopio Nikon, tanto el microscopio como el estroboscopio están provistos de un analizador de imágenes LEICA con una cámara de video TK-1280U JVC

#### 2.3.2. Microdurezas

Se realizó un barrido de microdureza Vickers (HV) a 1 mm de la superficie (Figura 2), con una carga de 500 gf durante un tiempo de 15 s. La distancia entre cada medición en la ZAT fue de 500  $\mu$ m. Las microdurezas se realizaron en un microdurómetro de referencia Shimadzu SDMS.



**Figura 2.** Ubicación del barrido de microdureza  
**Figure 2.** Location of microhardness test

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la posición plana, se puede observar en la Tabla 3, que la velocidad de soldadura es constante, por tanto las variaciones en la entrada de calor son insignificantes. La longitud del cordón de soldadura es de 152 mm. En la segunda posición de soldadura (vertical), Tabla 3, se observa una reducción de la velocidad de aplicación de soldadura, reducción que produce un aumento en la entrada de calor y una disminución en la longitud de los cordones.

Además, no se alcanza una velocidad de aplicación constante. Al comparar las entradas de calor entre la posición plana y vertical no se nota una diferencia significativa que produzca de cambios apreciables en el ancho de la ZAT [3], a excepción de las entradas de calor obtenidas en las pruebas 10 y 12. También se realizó una prueba sin lámina de respaldo de cobre en la posición plana para tener una base de comparación. En la Tabla 3 se presentan las variables de soldadura para este cupón de soldadura.

**Tabla 3.** Variables de soldadura  
**Table 3.** Welding parameters

Posición plana				
Prueba	Espesor	I [A]	V [mm/min]	HI [kJ/mm]
1	A	95	2,3	1,02
2	A	95	2,3	1,07
3	B	95	2,1	1,14
4	B	95	2,3	1,02
5	A	95	2,3	1,08
6	B	95	2,2	1,05
Posición vertical				
Prueba	Espesor	I [A]	V [mm/min]	HI [kJ/mm]
7	A	65,0	1,0	1,36
8	A	66,7	1,1	1,27
9	B	65,9	0,6	2,42
10	A	65,5	1,0	1,55
11	B	66,5	0,7	2,22
12	B	64,9	0,9	1,75
Lámina sin respaldo de cobre				
Prueba	Espesor	I [A]	V [mm/min]	HI [kJ/mm]
13	N/A	94,1	2,3	1,08

#### 3.1 Microdurezas

El ancho de la ZAT se considera como la longitud en la cual el acero recupera su dureza inicial, según la norma [6] esa dureza deber ser como mínimo de 490 HV, sin embargo se consideró la dureza mínima como 500 HV para evaluar el ancho de la ZAT [3]. Los barridos de microdureza muestran un comportamiento similar en el ancho de la ZAT,

para la posición de soldadura plana, tanto para el espesor de lámina de respaldo de 3/8" (A), como para el espesor de 1/4" (B). Los valores del ancho de la ZAT varían entre 7,4 - 10 mm y 8,5 - 9,5 mm, para el espesor de 3/8" y para el espesor de 1/4" respectivamente.

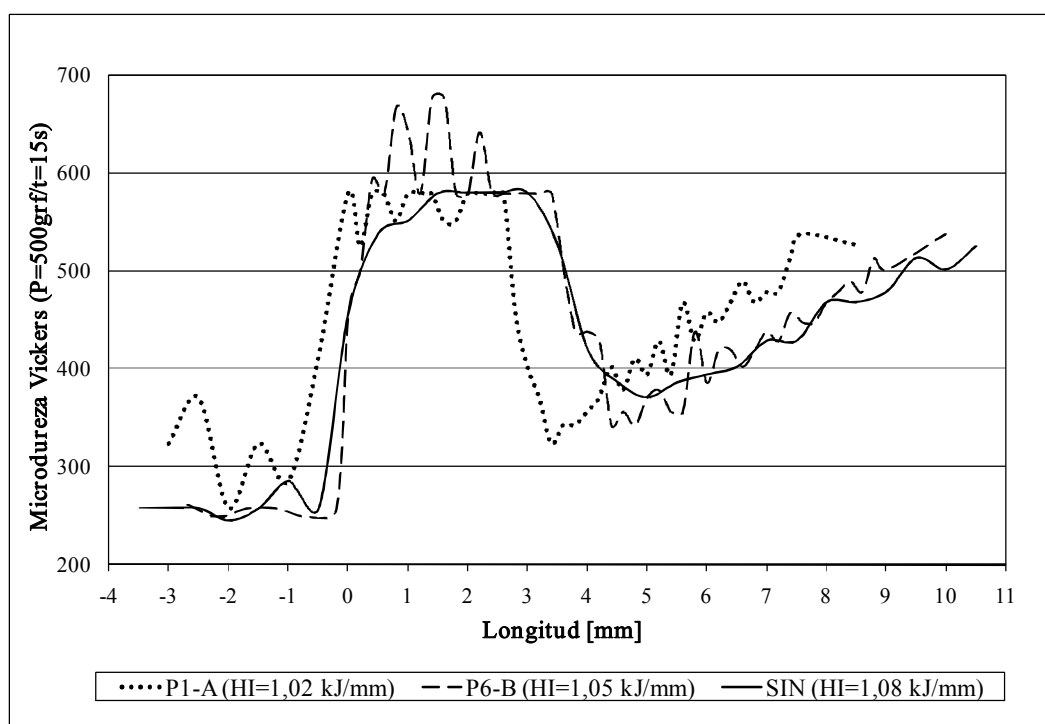
En la Figura 3 se puede observar la comparación entre el ancho de la ZAT para dos probetas soldadas en posición plana, con diferente espesor de platina de respaldo y para la probeta soldada

sin lámina de respaldo (SIN). Se observa que la reducción en el ancho de la ZAT, es mayor para la probeta uno soldada con la lámina de respaldo de cobre de espesor A, este resultado es de esperarse ya que al ser mayor el espesor de la lámina de cobre, la evacuación de calor es mayor. Para las demás probetas soldadas en la posición plana, al comparar la reducción de la ZAT debido a la utilización de láminas de cobre de espesor alto contra las que fueron soldadas con láminas de espesor bajo, las reducciones no son apreciables.

En la Figura 4 se puede comparar el ancho de la ZAT para las probetas soldadas en la posición

vertical versus la probeta soldada sin lámina de respaldo.

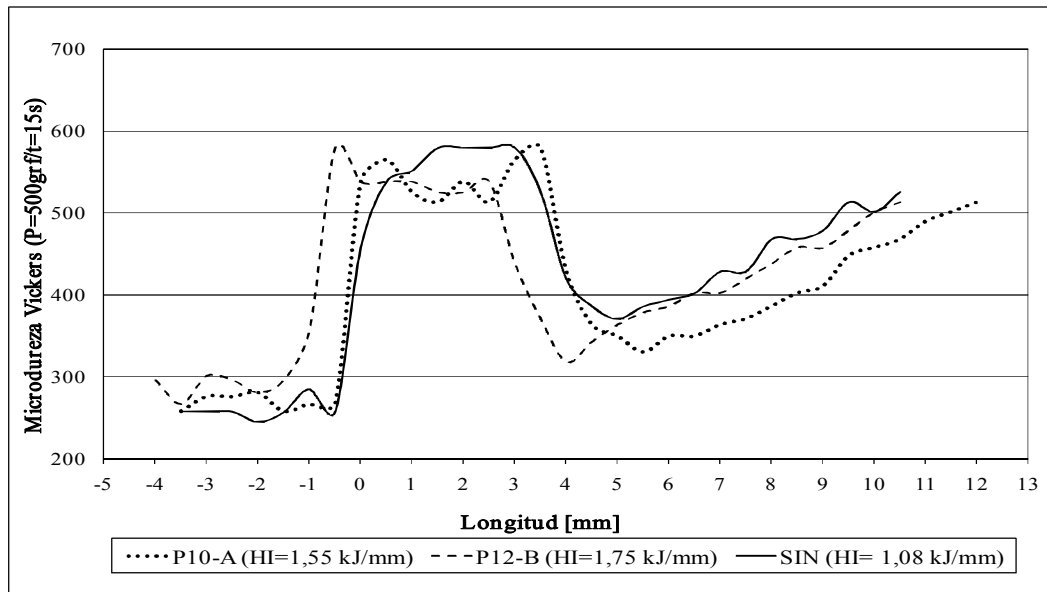
La probetas 10 y 12 fueron soldadas utilizando láminas de respaldo de espesor 3/8" (A) y 1/4" (B), respectivamente. Al comparar el ancho de la ZAT de las probetas soldadas en la posición vertical versus la probeta soldada sin lámina de respaldo se observa que no hay reducción en el ancho de la ZAT, esto se debe a que estas fueron soldadas con una inclinación de 63° y por tanto se alcanza una entrada de calor mayor, la cual ocasiona un incremento en el ancho de la ZAT.



**Figura 3.** Comparación de los barridos de dureza para la posición plana  
**Figure 3.** Compare within profiles of microhardness for flat position

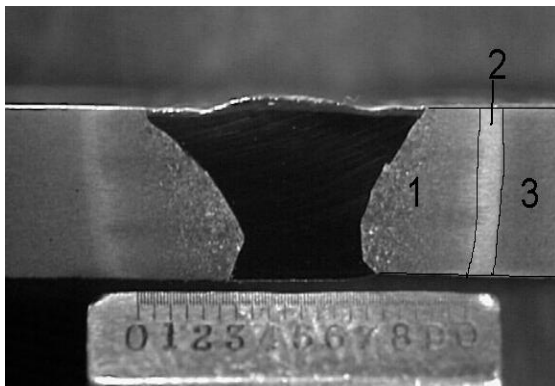
En las curvas se pueden diferenciar claramente tres zonas: la primera se caracteriza por una alta dureza superior a la del acero en estado de entrega, en la segunda ocurre una caída abrupta de la dureza, y en la tercera hay una recuperación gradual de la dureza hasta recuperar la dureza del estado de entrega. En la Figura 5 se pueden observar la macrografía para la probeta uno. Se nota claramente la diferencia

en la microestructura de las tres regiones. Región 1: zona afectada térmicamente de martensita no revenida, región 2: zona de transformación intercítica y región 3: zona de transformación subcrítica. El límite de la región tres no se aprecia en estas macrografías ya que en esta zona las temperaturas alcanzadas no superan la temperatura eutécticoide y por tanto solo ocurre un sobre-revenido de la microestructura del material en el estado de entrega.



**Figura 4.** Comparación de los barridos de dureza para la posición vertical  
**Figure 4.** Compare within profiles of microhardness for vertical position

En la Tabla 6 se resumen los anchos de la ZAT para algunas de las probetas, además, se muestra las longitudes de los pozos. Se considera un pozo como la longitud de la ZAT que se encuentra por debajo de 500 HV de dureza.



**Figura 5.** Diferentes zonas de la ZAT.  
**Figure 5.** Different HAZ zones.

En la referencia [3] se estudió el comportamiento de la dureza a través de la ZAT, en juntas a tope con dos pases de soldadura, para las posiciones plana y vertical; con un diámetro de electrodo de 3/32". Para efectos de comparación se utilizan los resultados obtenidos (microdurezas) para el segundo pase de soldadura, ya que la ZAT del primer cordón puede ser afectada por el calor suministrado al realizar el segundo cordón. En la

Tabla 7 se resumen los anchos de la ZAT y el ancho del pozo para las dos posiciones de soldadura para el estudio realizado anteriormente. Al realizar una comparación entre los estudios se observa una reducción en el ancho de la ZAT de aproximadamente de 3 mm para las probetas soldadas en la posición plana. Para las probetas soldadas en la posición vertical la reducción en el ancho de la ZAT no es apreciable. La reducción en el ancho del pozo si es apreciable en ambos casos, es aproximadamente de 4 mm y 3 mm para las probetas soldadas en posición plana y vertical, respectivamente. Cabe resaltar que reducir el ancho del pozo es importante ya que esta es la zona más débil de la ZAT y por tanto hay mayor probabilidad de penetrar el material con un proyectil. En la Figura 6 se observar gráficamente la comparación de los barridos de microdureza entre este estudio y el realizado anteriormente; y en la Figura 7 se muestra un esquema para los barridos de microdureza con los anchos promedios de la ZAT y los pozos. En la Figura 7 se puede observar que al utilizar los enfriadores de cobre la zona uno se aumenta debido al aumento de la evacuación de calor, también vemos que igualmente el ancho del pozo, es decir, la zona más débil de la ZAT se reduce con el empleo de los enfriadores de cobre.

### 3.2 Micrografías

En la Figura 8 se pueden observar las microestructuras en la ZAT para la probeta 4. La ZAT exhibe varias zonas con diferentes

proporciones de martensita, bainita, ferrita y carburos [7]; para las demás probetas las microestructuras alcanzadas son similares.

**Tabla 6.** Anchos de la ZAT y anchos del pozo, para este estudio  
**Table 6.** Widths of ZAT and wells, for this work

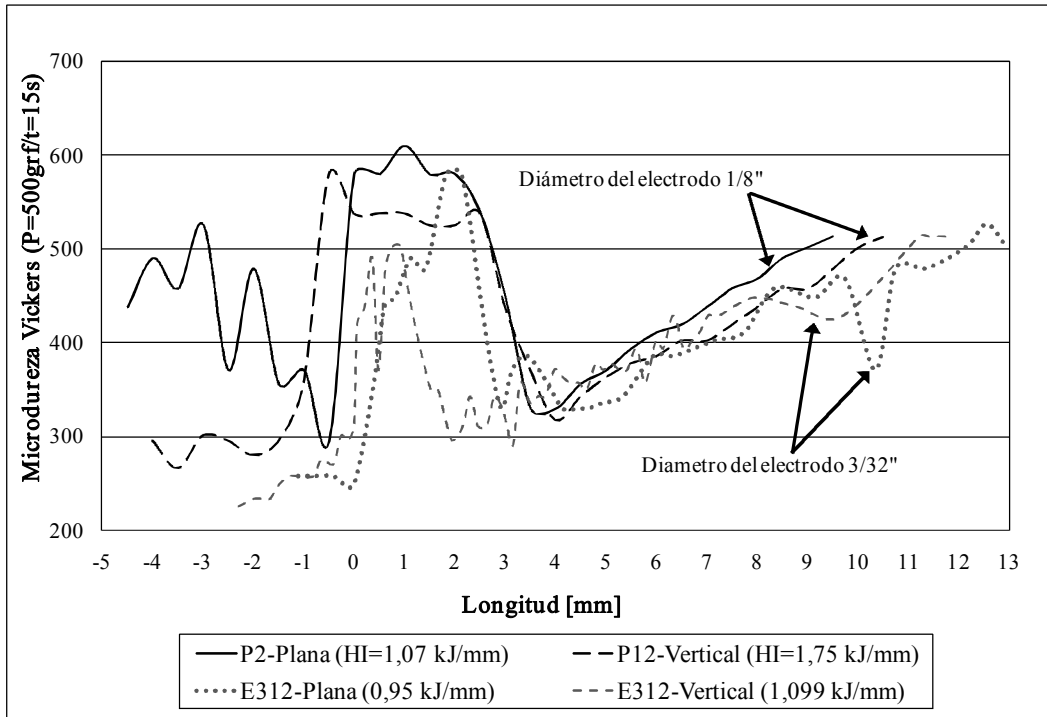
Posición	Probeta		HI [kJ/mm]	Ancho de la ZAT [mm]	Ancho del pozo [mm]
	Plana	Espesor 3/8" (A)	1	1,02	7,4
2			1,07	9,0	6,2
5			1,08	10	7,7
Espesor 1/4" (B)		3	1,14	9,5	6,2
		4	1,02	8,5	5,3
		6	1,05	8,8	5,2
	Sin lamina de respaldo		1,08	9,5	5,9
Vertical	Espesor 3/8" (A)	10	1,55	11,5	7,7
	Espesor 1/4" (B)	12	1,75	10,0	7,2

**Tabla 7.** Anchos de la ZAT y anchos del pozo, para el estudio anterior  
**Table 7.** Widths of ZAT and wells, for the previous work

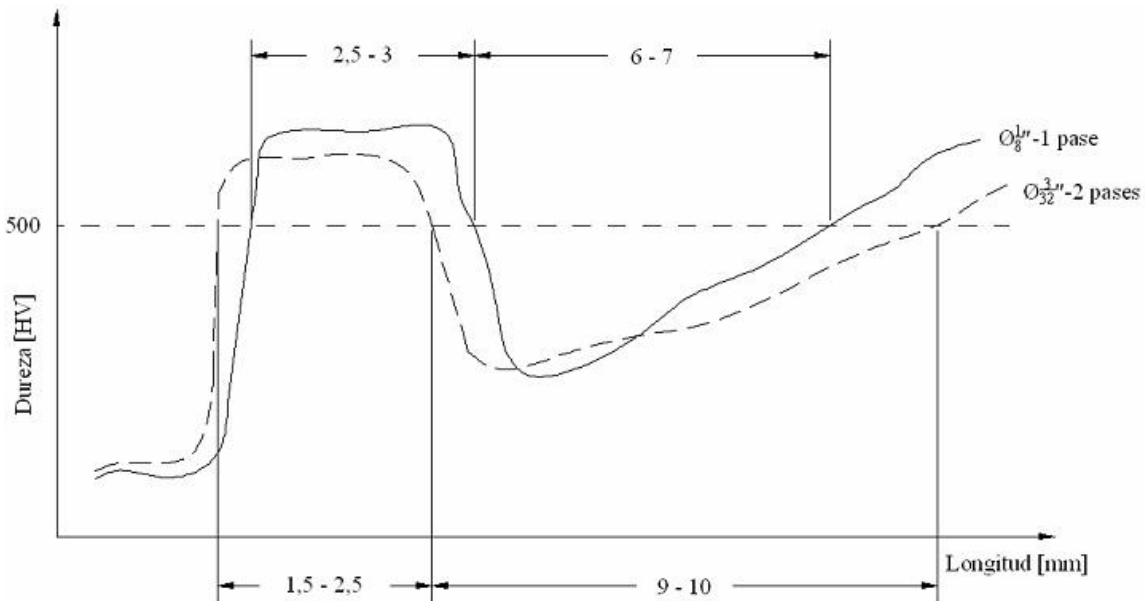
Posición	HI [kJ/mm]	Ancho de la ZAT [mm]	Ancho del pozo [mm]
Plana	1,10	12,14	9,84
Vertical	0,95	11,20	10,30

La región uno, compuesta principalmente de grandes cantidad de martensita no revenida y una fracción menor de bainita [7], presenta dos zonas dependiendo de las temperaturas pico alcanzadas durante el ciclo térmico la microestructura. La primera, zona afectada térmicamente de martensita no revenida de grano grueso (ZAT-GG) (Figura 8a), esta microestructura se alcanza debido a la exposición a temperaturas por encima de la temperatura de austenización del material, que es de 835°C [3].

La segunda, zona afectada térmicamente de martensita no revenida de grano fino (ZAT-FG) (Figura 8b), la temperatura alcanzada es ligeramente superior a la temperatura de austenización, pero no hay crecimiento de grano. La dureza final de esta microestructura es igual a la de la región de grano grueso ya que la dureza de la martensita es función del porcentaje de carbono y no del tamaño de grano. La transición en el tamaño de grano, es gradual y no afecta la dureza.



**Figura 6.** Comparación perfiles de microdurezas entre este estudio y el realizado anteriormente  
**Figure 6.** Compare profiles of microharness within for this work and work done previously



**Figura 7.** Esquema de perfiles de microdureza  
**Figure 7.** Sketch profile of microhardness

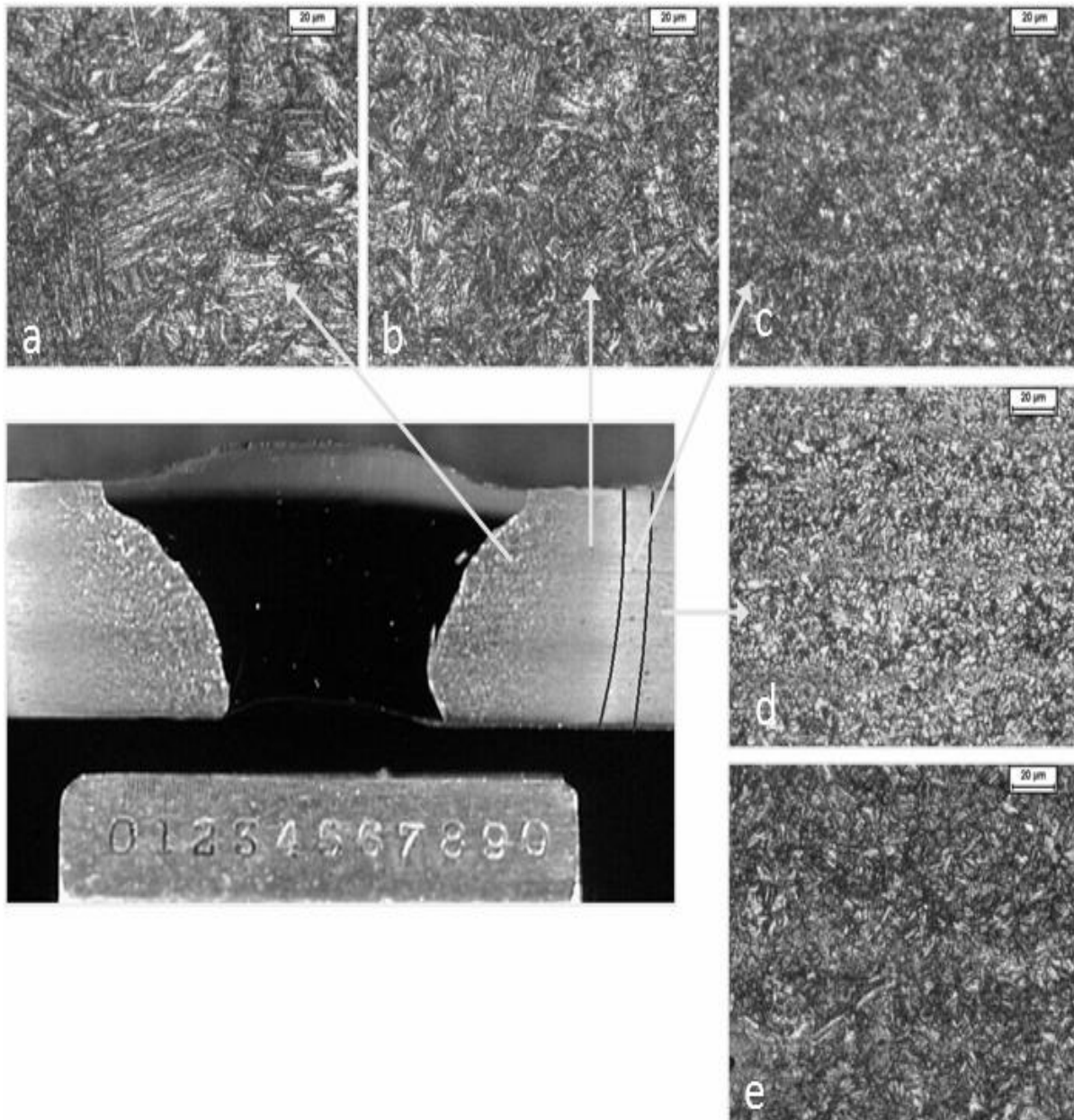
Región dos (Figura 8c), zona de transformación intercrítica (ZAT-IC), experimenta temperaturas pico menores y es calentada en la zona intercrítica que se encuentra entre las temperaturas AC1 (732°C) y AC3 (835°C). Esta zona exhibe una mezcla de martensita revenida a

alta temperatura, principalmente ferrita y carburos, y diferentes proporciones de componentes microestructurales producto de la descomposición de la austenita a diferentes temperaturas, esencialmente martensita, bainita y ferrita.



Región tres (Figura 8d), zona de transformación subcrítica (ZAT-SC) compuesta de martensita sobre-revenida. Esta zona está más cerca del metal base no afectado por el calor y es expuesta a temperaturas cercanas a la temperatura eutectoide, sobre-revenido; la microestructura de esta zona depende del tiempo de exposición a las

diferentes temperaturas por encima de la temperatura de revenido (200°C). En la Figura 8e se muestra la microestructura del metal base (MB), esta región estuvo sometida durante la soldadura a temperaturas inferiores a los 200°C y, por lo tanto, no experimenta modificaciones microestructurales.



**Figura 8.** Microestructuras de la ZAT para la probeta 4, a) ZAT-GG, b) ZAT-GF, c) ZAT-IC, d) ZAT-SC, e) MB  
**Figure 8.** Microstructures of the HAZ for the specimen 4, a) CG-HAZ, b) FG-HAZ, c) IC-HAZ, d) SC-HAZ, e) BM

#### 4. CONCLUSIONES

Hay una reducción de la zona afectada térmicamente (ZAT) por el empleo de láminas de cobre como respaldo y la realización de cupones en un pase de soldadura. Hacen falta un número mayor de pruebas.

Las diferencias en la reducción de la ZAT al variar la configuración del espesor de la lámina de respaldo de cobre de espesor 3/8" a 1/4" no son significativas.

La reducción de la ZAT es significativa en comparación con las láminas soldadas en el estudio anterior utilizando un electrodo de diámetro 3/32".

Se presenta una disminución en el ancho de los pozos por el empleo de los enfriadores de cobre, además, la pendiente de la línea de recuperación de la dureza en la zona tres es mayor

#### REFERENCIAS

- [1] G. MADHUSUDHAN REDDY, T. MONADAS. Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology* 57 (1996) 23-30
- [2] T. MOHANDAS, G. MADHUSUDAN REDDY A, B. SATISH KUMAR. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology* 88 (1999) 284–294.
- [3] INFORME SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE PARA Unión De Acero De Blindaje MIL A46100. Grupo De Soldadura. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2005.
- [4] ASME. SECTION II. MATERIAL SPECIFICATIONS. PART C-WELDING RODS, Electrodes, and Fillers Metals. 1980 EDITION
- [5] H GRANJON. FUNDAMENTALS of welding metallurgy. Primera Edicion. 1991 Abington Publishing.
- [6] MILITARY SPECIFICATION MIL A46100. Armor plate, steel, wrought, high-hardness. 1986
- [7] J. UNFRIED S. ET AL, NUMERICAL and experimental analysis of microstructure evolution during arc welding in armor plate steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009) 1688–1700.