

CARACTERIZACIÓN DE LAS SOLDADURAS DE ACERO PARA BLINDAJES MIL A46100 CON ELECTRODOS INOXIDABLES

JORGE ENRIQUE GIRALDO BARRADA

Ingeniero Mecánico, Especialista en Ingeniería de Materiales. Director del Grupo de Soldadura,
Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Colombia , jegirald@unalmed.edu.co

JIMY UNFRIED SILGADO

Ingeniero Mecánico. Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia. junfried@unalmed.edu.co

RESUMEN

Se evaluaron las propiedades mecánicas y la microestructura de las soldaduras obtenidas con diferentes electrodos para unir platinas de acero, templado y revenido, de alta dureza y baja aleación producido bajo la especificación MIL A46100, el cual es usado en la fabricación de estructuras blindadas. Se determinó el efecto que tiene el material de aporte (aceros inoxidable austeníticos, E307 y E308Mo, y dúplex, E312 y Eutectic 680), aplicado con proceso de soldadura al arco con electrodo revestido (SMAW), en posiciones plana y vertical, en la microestructura de la zona afectada térmicamente del acero MIL A46100, en la susceptibilidad al agrietamiento y en las propiedades mecánicas de dureza y resistencias a la tracción y al impacto Charpy de las diferentes regiones microestructurales de la soldadura. Se emplearon juntas a tope y en filete de 4.3mm de espesor donde se identificaron cuatro regiones con microestructura y propiedades diferentes: el metal fundido con durezas entre 220 y 280HV según el material de aporte, una zona de martensita no revenida de tamaño de grano variable con durezas tan altas como 580HV, una zona de martensita sobre-revenida con durezas mínimas entre 250-300HV y el material base no afectado con una dureza mínima de 490-500HV. El mayor ancho de la ZAT se obtuvo para las juntas con E308Mo. No se presentaron grietas en las pruebas CTS, sin embargo en las pruebas H se agrietaron las soldaduras aplicadas con electrodos E307 y E308Mo. El comportamiento balístico de las uniones soldadas no alcanza el del metal base debido a la zona de reducción de dureza.

1. INTRODUCCIÓN

El acero templado y revenido MIL A46100 se emplea en la industria militar para la fabricación de blindajes en buques, garitas y tanques con miras a reducir el peso y evitar la penetración de proyectiles que comprometan los usuarios o equipos y el proceso de manufactura más eficaz y eficiente en la producción de tales estructuras es la soldadura. La resistencia a la penetración de este material se deriva de su microestructura de martensita revenida que, con un contenido de carbono de 0.3%, alcanza una dureza de 500HV y una alta resistencia al impacto [1] y, en general, de acuerdo con Madhusudhan y Mohandas, mientras más duro el acero mejor su comportamiento balístico [2]. La microestructura del material se altera significativamente por el calor del proceso de soldadura al arco y en estudios realizados

sobre aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) se detectaron reducciones de dureza en la ZAT mayores o menores en función del proceso de soldadura [3]. El proceso SMAW, comparado con FCAW; GTAW y SAW, parece producir el mejor desempeño balístico en HSLA [4] y por este motivo se seleccionó para soldar el metal base MIL A46100. En vista de su composición química este material es susceptible al agrietamiento y una manera de evitar esta situación es emplear electrodos de acero inoxidable austenítico o dúplex [5,6,7]. En el presente estudio se reporta el efecto del tipo de electrodo aplicado con dos entradas de energía en la microestructura, propiedades mecánicas, susceptibilidad al agrietamiento y su inferencia en el comportamiento balístico de las uniones soldadas de acero MIL A46100 para juntas en filete y a tope de 4.3mm.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

Materiales utilizados.

El material base MIL A46100 es un acero que, en estado de entrega, se temple en agua desde una temperatura de austenización de 904°C y luego es revenido a 204°C para obtener una microestructura de martensita revenida a través de todo su espesor con una dureza mínima de 490HV. Su alta dureza y la microestructura le confieren sus características de alta tenacidad al impacto y buena resistencia a la penetración de proyectiles, por lo que es un material diseñado para la construcción de blindajes en la industria militar tales como barcos, tanques, corazas, etc. Su composición química, en particular su contenido de carbono, tal como se ilustra en la Tabla 1, hacen que su equivalente en carbono (CE), empleando la relación del Instituto Internacional de Soldadura (IIW), sea superior a 0.6 lo cual es un indicativo de su alta susceptibilidad a agrietarse con la asistencia de hidrógeno (HAC) en la zona afectada térmica-mente (ZAT) de las uniones soldadas [5].

El empleo de aceros inoxidable como material de aporte para unir aceros con alto CE sin riesgo de agrietamiento está asociado con el hecho de que el hidrógeno atómico permanece en el metal fundido y no pasa a la

ZAT evitando el HAC. Los principales criterios considerados durante la etapa inicial de selección de los electrodos de acero inoxidable austenítico, E307 y E308Mo, y dúplex, E680 y E312, por investigar fueron los siguientes: la alta solubilidad de hidrógeno en la austenita, la baja solubilidad de hidrógeno atómico en la austenita, la alta ductilidad de la austenita que suministra la habilidad de soportar mayores restricciones de las juntas soldadas y, en el caso de los dúplex, la habilidad de tolerar grandes diluciones sin riesgos de formar microestructuras martensíticas susceptibles al HAC y al agrietamiento en caliente [8]. Existen varios autores que recomiendan el empleo de los electrodos E307 y E308Mo para soldar acero MIL A46100 [6, 7, 9, 10, 11, 12] y no se encontraron fuentes que recomienden el E680 y el E312, sin embargo, de acuerdo con las composiciones químicas de los depósitos sin dilución y basados en el conocimiento de las diversas aplicaciones del E312, se establece que pueden aplicarse en el acero MIL A46100 ya que evitan el HAC y el agrietamiento en caliente del metal fundido. La caracterización de los materiales se presenta así: en la tabla 1 las composiciones químicas de los depósitos de soldadura obtenidos, sin dilución, con cada uno de los electrodos y el número de ferrita (FN); y en la tabla 2 las propiedades mecánicas de los depósitos y del material base [13,14].

Tabla 1. Contenido de elementos de aleación de materiales estudiados

MATERIAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA CONSIDERADA EN % POR PESO												SCHAEFLER		WRC 1992		FN
	%C	%Mn	%Cu	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Ti	%V	%S	%P	Ni eq.	Cr eq.	Ni eq.	Cr eq.	
MIL A46100	0,284	0,899	0,177	0,534	0,192	0,300	0,243	0,020	0,031	0,007	0,002	0,010	9,16	1,34	10,18	0,54	NA
E680	0,113	2,261	0,127	0,426	8,094	30,525	0,259	0,002	0,019	0,090	0,028	0,034	12,61	31,42	12,08	30,78	52,2
E312	0,110	1,961	0,111	0,471	8,163	30,951	0,176	0,007	0,019	0,083	0,006	0,025	12,44	31,83	12,04	31,13	62,0
E307	0,060	6,052	0,056	0,661	8,979	19,378	0,605	0,002	0,013	0,049	0,017	0,024	13,81	20,97	11,09	19,98	6,7
E308Mo	0,067	1,400	0,070	0,698	10,255	18,599	2,515	0,037	0,033	0,035	0,012	0,031	12,97	22,16	12,62	21,11	6,6

Tabla 2. Características y propiedades mecánicas de depósitos de soldadura sin dilución.

CARACTERÍSTICA DETERMINADA	ELECTRODO EMPLEADO PARA APLICAR EL DEPÓSITO			
	E680	E312	E307	E308Mo
DUREZA DEL METAL FUNDIDO (HV)	217	225	172	173
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	860	821	626	626
RESISTENCIA A LA CEDENCIA (MPa)	790	728	477	504
PORCENTAJE DE ELONGACIÓN	20%	18%	35%	45%
RESISTENCIA AL IMPACTO (J@-40°C)	57	52	90	84
NÚMERO DE FERRITA	52.2	62.0	6.7	6.6
MICROESTRUCTURA	Austenita con diferentes proporciones de ferrita delta			

Condiciones de soldadura.

Se utilizó el proceso de soldadura al arco con electrodo revestido, SMAW, con materiales de aporte de diámetro Ø3/32” en todos los casos para soldar platinas a tope con ranura cuadrada de 4.3mm en dos pasadas: una inicial y otra al respaldo. Las variables se ajustaron para aplicar soldaduras en posiciones plana (1G) y vertical ascendente (3G) cambiando el amperaje y la velocidad de recorrido, bajos ambos en 3G, lo que resultó en dos entradas de energía (HI), una alta y otra baja, para cada electrodo tal como se muestra en la tabla 3 donde por lo demás se incluyen los valores promedio de los parámetros de soldadura. Las entradas de energía asociadas con las pruebas CTS se incluyen en las gráficas de dureza de soldaduras en filete en las figuras 2 y 3.

Caracterización de soldaduras.

Con el objetivo de caracterizar las propiedades mecánicas y las diferentes regiones micro-estructurales obtenidas en las soldaduras y en los materiales estudiados se usaron numerosas pruebas, técnicas y ensayos de laboratorio. Las etapas en las que puede dividirse, grosso modo, el presente trabajo son las siguientes: (1) caracterización de materiales base y de aporte, (2) propiedades de los depósitos sin dilución, (3) susceptibilidad al HAC, (4) regiones microestructurales de las soldaduras, (5)

propiedades mecánicas y sanidad de las juntas y (6) sanidad de uniones con alta restricción y comportamiento balístico. En la tabla 4 se presentan los ensayos y pruebas que se usaron para cada una de las etapas.

Tabla 3. Variables de soldadura usadas.

Electrodo	Pasada	Amp. (A)	Volt. (V)	Veloc. (mm/s)	HI (J/mm)
E680 1G	Inicial	78	25	4,04	483
	Respaldo	78	23	2,48	723
E680 3G	Inicial	53	25	1,07	1238
	Respaldo	52	23	0,89	1344
E312 1G	Inicial	91	23	3,28	642
	Respaldo	91	25	2,35	949
E312 3G	Inicial	51	21	0,98	1099
	Respaldo	52	21	0,82	1318
E307 1G	Inicial	89	19	2,35	716
	Respaldo	88	19	2,21	746
E307 3G	Inicial	65	19	0,98	1243
	Respaldo	66	20	1,2	1084
E308Mo 1G	Inicial	97	19	2,7	672
	Respaldo	95	19	2,2	825
E308Mo 3G	Inicial	63	17	1,2	914
	Respaldo	61	17	1,1	964

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados más relevantes y la discusión técnica de los mismos se presentan en el siguiente orden: caracterización de soldaduras en filete y en ranura a tope, susceptibilidad al agrietamiento, propiedades mecánicas de las juntas a tope y comportamiento balístico.

3.1 SOLDADURAS EN FILETE

Se aprovecharon los cupones de las pruebas CTS, ver la figura 1, y se extrajo una probeta de cada entrada de calor para cada uno de los electrodos con el objetivo de estudiar las microestructuras de soldaduras en filete de una sola pasada. En las figuras 2 y 3 se grafican los valores de dureza obtenidos en el metal fundido (valores del eje X negativos) y la variación de la dureza con la distancia a la línea de fusión (valores positivos) de las soldaduras en filete extraídas de los cupones CTS, para cada electrodo, con entradas de energía baja y alta, respectivamente. En las gráficas se incluye la entrada de energía promedio por unidad de longitud de soldadura empleada con cada electrodo.

Tabla 4. Ensayos y pruebas realizados durante las distintas etapas de trabajo.

DIFERENTES ETAPAS DEL ESTUDIO Y NORMAS ?	NORMA DE REFERENCIA, DONDE SEA APLICABLE	CARACT. DE MATERIALES	PROPIEDADES DEPOSITOS	SUSCEPTIBILIDAD AL HAC	MICROESTRUCTURA DE SOL.	PROP. MECÁNIC. Y SANIDAD	COMPORTAM. BALÍSTICO
TIPO DE PRUEBA, TÉCNICA O ENSAYO DE LABORATORIO CON SU ACRÓNIMO ?							
Microscopia óptica (MOLR)	N.A.	X	X	X	X		
Microscopia electrónica de barrido (SEM)	N.A.	X	X		X		
Esteroscopia de luz reflejada (ELR)	N.A.	X		X			
Espectros de dispersión de energía (EDS)	N.A.	X					
Espectros de dispersión de ondas (WDS)	N.A.		X		X		
Difracción de rayos X (DRX)	N.A.	X	X		X		
Espectrometría gaseosa	N.A.	X					
Dilatometría térmica (DTA)	N.A.	X					
Medición de ferrita delta	AWS A4.2		X		X		
Severidad térmica controlada (CTS)	AWS B4.0			X			
Placa H de alta restricción	MIL 1941 TOP 2-2-711			X			X
Cordón simple sobre placa	N.A.				X		
Soldadura a tope	ASME Sec. IX				X	X	
Tracción	ASTM E8	X					X
Impacto Charpy en V	ASTM E23	X					X
Dureza (HV)	ASTM E92	X		X			
Microdureza (MHV)	ASTM E384	X		X	X		
Ensayos no destructivos	ASME Sec. V			X	X	X	X

En relación con las figuras 2 y 3, las uniones con todos los electrodos presentan un perfil de dureza similar que se puede describir con las siguientes regiones de la soldadura:

Metal fundido. Presenta una dureza muy baja de 240-280HV para los aceros inoxidables dúplex y austeníticos.

Zona endurecida. Presenta unas durezas que alcanzan máximos de 580HV en todos los electrodos, la cual es superior a la dureza del material MIL A46100 en su estado de entrega templado y revenido que es aproximadamente de 500 a 520HV. Esta región tiene un ancho promedio de 2.5 a 3mm.

Zona de baja dureza. Después de alcanzar la dureza máxima en la ZAT se presenta una caída brusca de la dureza en una distancia de 0.5 a 1mm hasta niveles de 300-350HV.

Zona de recuperación de dureza. La dureza se incrementa linealmente a partir de su valor mínimo hasta alcanzar nuevamente la dureza del material base MIL A46100. El ancho de esta región tiene entre 3 y 5 mm.

Asumiendo que la ZAT llega hasta que se recupera la dureza mínima del material MIL A46100, es decir 500HV, los anchos de la ZAT varían, tanto a altas como a bajas energías de soldadura, entre 6 y 8 mm para soldaduras en filete. En las soldaduras en filete de acero MIL A46100 de 4.3 mm de espesor, por lo tanto, no se presenta una variación significativa en las zonas, durezas máximas y mínimas y en el ancho de la ZAT con el cambio en el tipo de electrodo y la variación de las condiciones de soldadura para el diámetro de $\varnothing^{3/32}$ que fue el usado en la investigación.

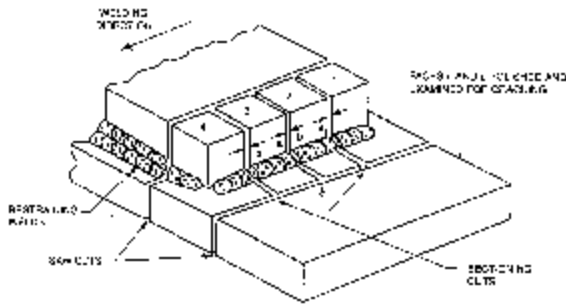


Figura 1. Cupón de prueba CTS donde se ilustran las probetas por extraer.

El comportamiento de la dureza de la ZAT de soldaduras en filete se puede explicar a partir de las diferentes microestructuras que se producen durante la soldadura debidas al ciclo térmico al que se somete el acero MIL A46100, es decir, a los calentamientos localizados que alcanzan temperaturas pico que dependen de su distancia hasta la línea de fusión, al tiempo de sostenimiento a dichas temperaturas y a las velocidades de

enfriamiento después de pasar el arco eléctrico. Las microestructuras típicas encontradas en las ZAT de soldaduras en filete, que se presentan en la figura 4, definen las siguientes regiones que guardan corresponden con las diferentes durezas obtenidas:

Metal fundido -MF- (a). Presenta diversas microestructuras según el electrodo utilizado y la dilución alcanzada, así los depósitos de los electrodos E680 y E312 tienen una matriz austenítica con proporciones de ferrita delta de tipo vermicular y en lazos; los depósitos de electrodos E307 y E308Mo, presentan menores proporciones de ferrita, en forma vermicular, que los anteriores y una matriz austenítica. Las grandes proporciones de austenita en los depósitos explica las bajas durezas, del orden de 250HV, de los cordones de soldadura.

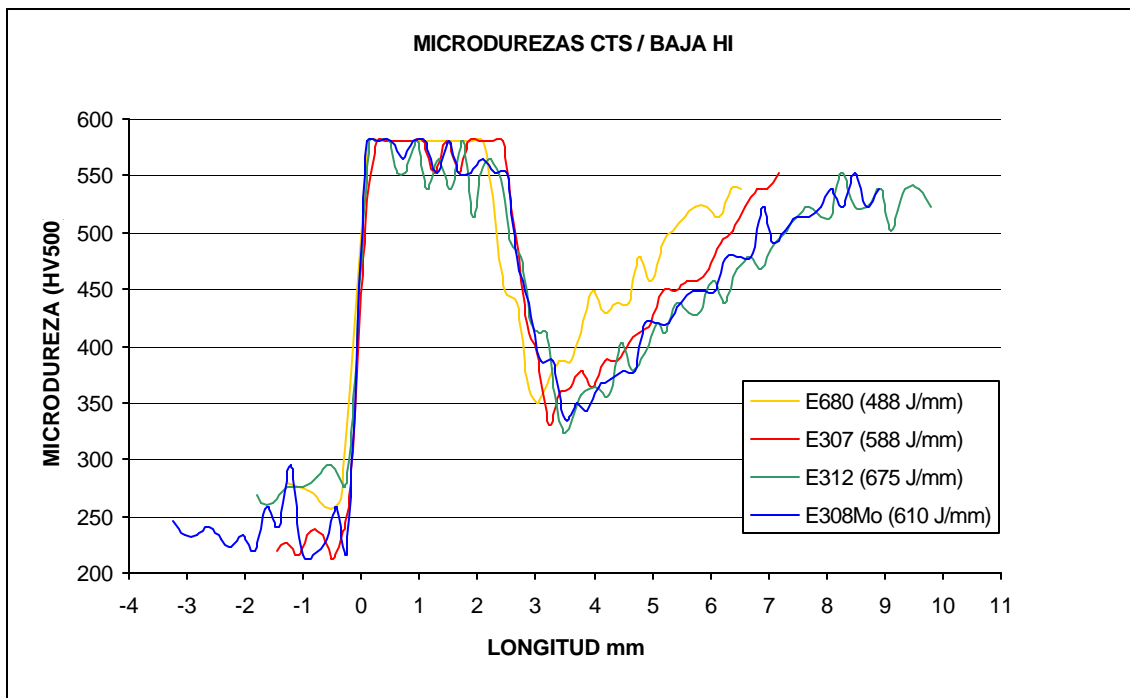


Figura 2. Variación de las durezas en el metal fundido y en la ZAT de soldaduras en filete CTS aplicadas con los diferentes electrodos usando una entrada de energía baja.

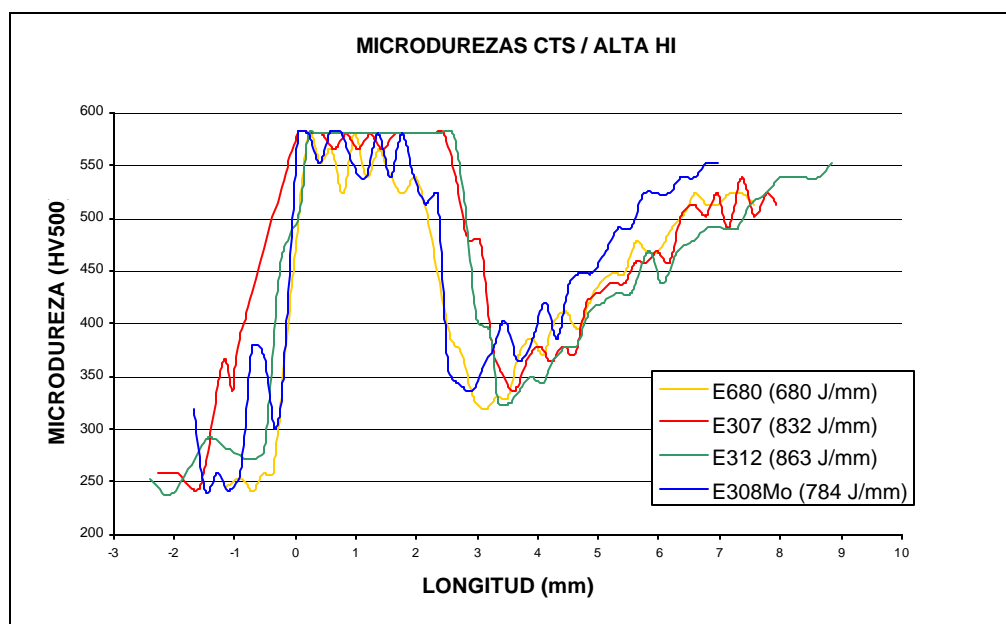


Figura 3. Variación de las durezas en el metal fundido y en la ZAT de soldaduras en filete CTS aplicadas con los diferentes electrodos usando una entrada de energía alta.

Zona de martensita no revenida de grano grueso –ZMNRGG- (b). Esta zona se expone a temperaturas cercanas a la de fusión muy por encima de la temperatura de austenización del material, que es de 835°C de acuerdo con los resultados de dilatometría, donde se presenta una austenización total de la microestructura y hay crecimiento de grano por la temperatura alta. La dureza de 580HV corresponde a la dureza máxima alcanzada después del temple por un material 100% martensítico con un contenido de carbono de 0.3%, lo cual indica que en el enfriamiento de la soldadura esta región se transformó totalmente en martensita (figura 4(b)) y en las otras probetas de CTS, independiente del tipo de electrodo.

Zona de martensita no revenida de grano fino –ZMNRGF- (c). Las temperaturas en esta zona están ligeramente por encima de los 835°C y, aunque se alcanza una austenización total durante la soldadura, no se presenta el fenómeno de crecimiento de

grano (figura 4(c)). Su dureza es también de 580HV debido a que la dureza final de la martensita no es función del tamaño de grano sino del porcentaje de carbono. La transición en el tamaño de grano desde la ZMNRGG hacia la ZMNRGF es gradual pero no cambia la dureza de la región.

Zona de transformación intercrítica –ZATIC- (d). Esta región de la ZAT estuvo expuesta a temperaturas en el rango intercrítico, es decir por encima de la temperatura eutectoide y por debajo de la de austenización, determinadas en 732°C y 835°C por dilatometría. En esta región la martensita revenida a 200°C del material MIL A46100, en el calentamiento de la soldadura, se descompone en una fracción de austenita (mayor mientras más cerca de los 835°C) y el resto de ferrita (mayor mientras más cerca de los 732°C); luego, durante el enfriamiento, la austenita se transforma en martensita y la ferrita sigue como tal con algo de cementita (figura 4(d)). En esta región se presenta la caída de dureza que se

aprecia en las figuras 2 y 3 y es tan drástica o súbita ya que el ancho de la región está definido por un intervalo de isoterma separadas entre ellas apenas 100°C.

Zona de martensita sobre-revenida – ZATMSR- (e), (f) y (g). En esta región se presentan diversas microestructuras según la temperatura de exposición por encima de la temperatura de revenido del acero MIL A46100 de 200°C (figura 4 (e), (f) y (g)). La martensita original se vuelve a revenir a temperaturas más altas y se descompone en diversos constituyentes, cuya dureza es cada vez menor mientras más cercana sea la temperatura pico a los 732°C. Por esta razón se presenta una recuperación casi lineal de la dureza hasta llegar a la dureza del material original.

Metal base no afectado –MBNA- (h). Regiones que estuvieron sometidas durante el calentamiento de la soldadura a temperaturas inferiores a los 200°C y que, por lo tanto, no cambiaron su microestructura ni tampoco sus propiedades de dureza (figura 4 (h)).

3.2 SOLDADURAS A TOPE CON RANURA CUADRADA

Los estudios también se enfocaron en las propiedades y microestructuras de las uniones a tope de material MIL A46100, con ranura cuadrada y dos pasadas de soldadura en dos posiciones típicas de fabricación. La discusión previa de las microestructuras es aplicable a las obtenidas en los segundos pases de las soldaduras a tope con algunas diferencias: los resultados son más variables ya que con dos pases de soldadura existen dos ciclos térmicos superpuestos en dos lugares distintos (a lado y lado de la platina de 4.3mm). En la figura 5 se ve la variación

de la dureza en las juntas a tope de cada uno de los dos pases (el 1 es la pasada inicial y el 2 el pase de respaldo de las uniones) aplicados con el electrodo E307 con alta energía, posición 3G, y con baja energía, posición 1G. Se nota la similitud con las curvas de las soldaduras en filete, sin embargo hay diferencias: las durezas máximas de la ZMNR son menores (480-530HV frente a los 580 alcanzados en los filetes), el ancho de la ZAT es mayor (10-13mm frente a los 6-8mm de los filetes), la dureza mínima alcanzada es un poco menor y, en general, la dispersión de los datos es mayor sobre todo en la ZMNRGG más cercana de la fuente de energía. En general, el pase 2 alcanza durezas mayores que las del pase 1 tanto en 1G como en 3G, lo cual también se observó en los filetes hechos con electrodos E680 y E312; esto se debe a que la alta dureza inicial que alcanza la ZAT del pase 1 es recalentada por la energía del pase 2 produciendo un efecto de revenido que reduce su dureza. La dispersión en los valores de dureza de la ZMNR se debe a la imposición del nuevo ciclo térmico del pase 2. Sin embargo, esta dispersión parece no aplicarse a la ZATMSR y a partir de las gráficas de dureza se puede concluir que, no obstante una pequeña diferencia en los anchos de las soldaduras de E307 en 3G y en 1G, la posición de soldadura no altera substancialmente la pendiente en la recuperación de dureza después de que se encuentra la dureza mínima y que el ancho de la ZAT tampoco varía para estos cambios en la energía de soldadura. Los valores de dureza del metal fundido están alrededor de 250HV y los incrementos súbitos presentados en el metal fundido del primer pase del E307-1G corresponden a islotes de metal base desprendidos e inmersos en el charco.

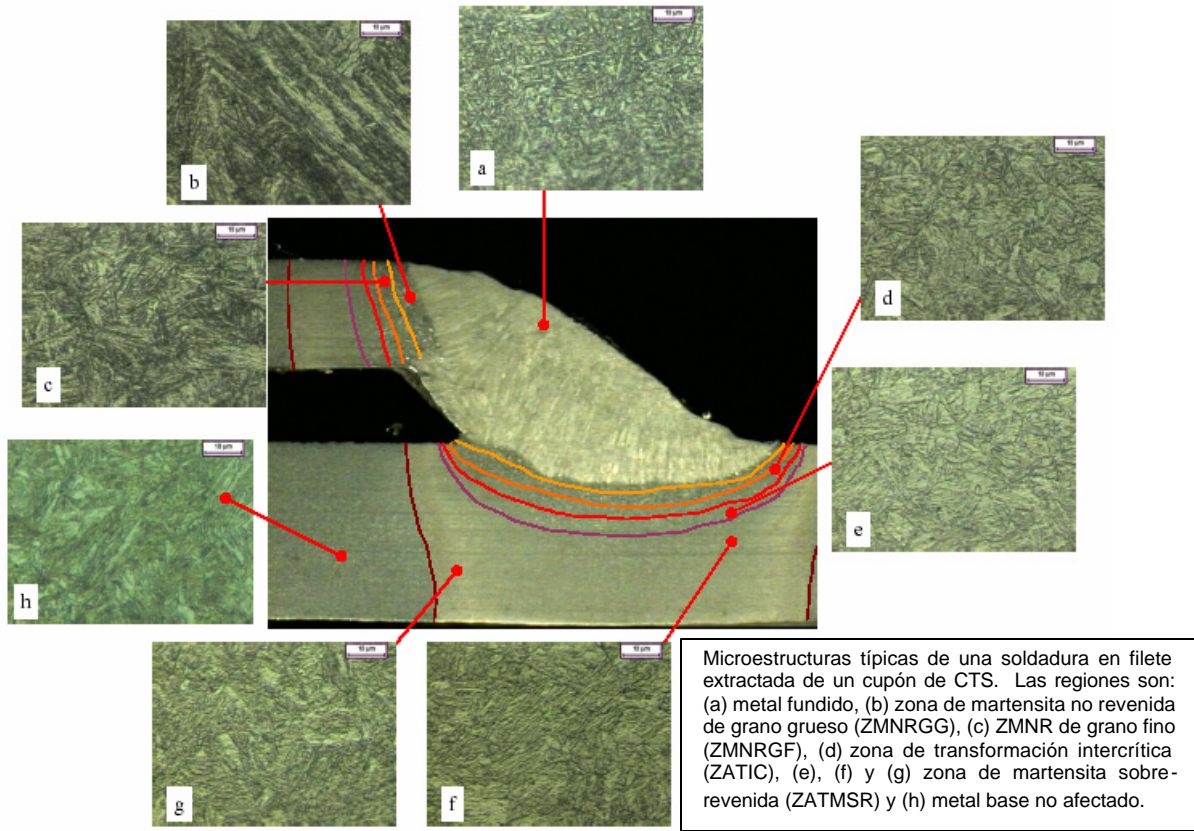


Figura 4. Microestructuras de soldaduras en filete sobre material MIL A46100.

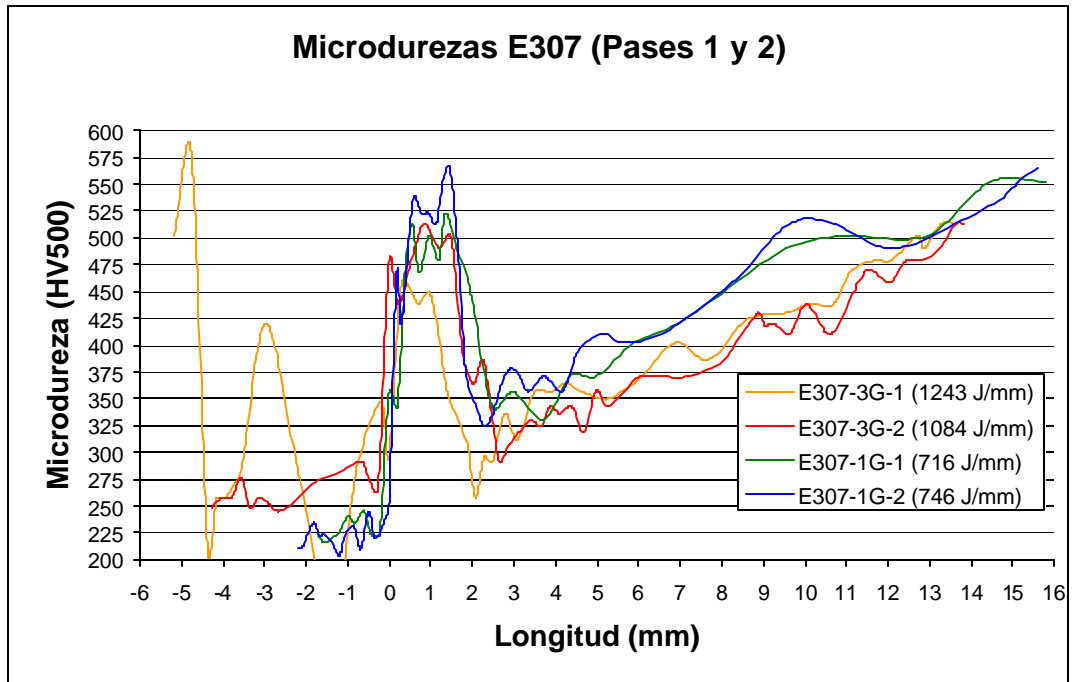


Figura 5. Durezas de soldaduras a tope con E307, pases 1 y 2 en posiciones 1G y 3G

En las figuras 6 y 7 se grafican los perfiles de dureza de los segundos pases de las juntas a tope realizadas con cada uno de los electrodos en posiciones 1G y 3G, respectivamente, indicando, además, el valor correspondiente a la energía promedio por unidad de longitud de soldadura de la pasada. Al igual que en las soldaduras en filete, independiente del tipo de electrodo y de la entrada de energía o posición de soldadura, se presenta una zona dura adyacente al metal fundido llamada zona de martensita no revenida (ZMNR), existe una reducción drástica de la dureza hasta un valor mínimo llamada zona de transformación intercrítica (ZATIC) y una región donde se recupera la dureza en forma casi lineal llamada zona de martensita sobre-revenida (ZATMSR). El ancho total de la ZAT generado en las juntas a tope con electrodos E680, E307 y E312 no varía significativamente a pesar de los cambios de entrada de energía que implican las posiciones 1G y 3G y se mantiene entre 11 y 14mm. La excepción es la soldadura aplicada con electrodo E308Mo que presentó una ZAT mayor que la de los otros electrodos y que está entre 16-17mm en posición vertical y entre 24-25mm en posición plana. Para el primer pase de soldadura el comportamiento fue similar y de nuevo el electrodo E308Mo produjo las mayores ZAT y, por consiguiente, las zonas blandas de mayor extensión. Cómo dicho efecto no se presentó en las juntas en filete se van a aplicar soldaduras superficiales simples con cada electrodo sobre material MIL A46100 para estudiar la microestructura y el perfil de dureza que producen en la ZAT y despejar las dudas sobre los efectos del electrodo E308Mo.

Las microestructuras que se encontraron típicamente en las zonas afectadas por el calor de las soldaduras fueron similares en todas las juntas independiente del tipo de electrodo utilizado o de la entrada de energía

o posición de soldadura. En la figura 8 se observan las microestructuras determinadas por MOLR para la junta a tope de un depósito aplicado con electrodo E307 en posición plana, exceptuando la microestructura de la ZATIC. El ancho de la ZAT es mayor en soldaduras a tope que en filetes y los niveles de dureza de la ZMNRGG y ZMNRGF son menores que las obtenidas en las correspondientes regiones de soldaduras en filete tal como se puede concluir de la comparación de las figuras 5, 6 y 7 con las figuras 2 y 3. Esto se debe a que la velocidad de enfriamiento entre 800°C y 500°C de la ZAT de una junta en filete es mayor que la velocidad alcanzada en una junta a tope porque en las primeras soldaduras convergen tres elementos estructurales que evacúan el calor por tres caminos diferentes mientras en las segundas sólo se cuenta con dos rutas de evacuación de calor. Esto concentra la energía en las juntas a tope e incrementa el tiempo de sostenimiento a las temperaturas de transformación lo que hace que la martensita obtenida se someta a un proceso de auto-revenido que disminuye su dureza y que el ancho total de la zona afectada por el calor se aumente.

En relación con la microestructura de las regiones de la ZAT de uniones a tope y su conexión con los resultados de dureza se puede aplicar la misma discusión que ya se planteó en las soldaduras en filete. En la figura 9 se muestra la relación que existe entre las diferentes regiones de la soldaduras a tope con las temperaturas pico alcanzadas (distribución de temperatura) y el diagrama hierro-Fe₃C en el cual se muestra un acero con 0.3% de carbono como el MIL A46100; adicionalmente, se ilustran los anchos de las regiones más duras (ZMNRGG y ZMNRGF), zona de reducción de la dureza (ZATIC o zona parcialmente transformada como se indica en el diagrama) y zona de

recuperación de la dureza (ZATMSR) limitadas en el dibujo de la junta por las correspondientes líneas de isotransformación que son apreciables en una macrofotografía como la ilustrada en la figura 9.

Conviene mencionar que el acero MIL A46100 en la zona adyacente a la línea de fusión llega a temperaturas mayores que la peritética (1495°C) y hasta la temperatura de fusión (aproximadamente 1510°C) donde transforma a ferrita delta que tiene una estructura cúbica de cuerpo centrado (BCC) y es a partir de esta fase cristalina que comienza la solidificación epitaxial del metal de soldadura. Debido a que los depósitos inoxidables solidifican como austenita con estructura cristalina cúbica de cara centrada (FCC) que no ajusta con la BCC y si se tiene en cuenta el cambio drástico en la composición química entre el metal base (MIL A46100) y el metal fundido (acero

inoxidable que varía según el electrodo), se espera que la solidificación no sea epitaxial.

3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS UNIONES A TOPE

La resistencia a la tracción se determinó en juntas a tope con ranura cuadrada aplicadas con cada uno de los electrodos y en posiciones plana y vertical y la resistencia al impacto Charpy se midió en probetas con entallas ubicadas en cada una de las regiones de la soldadura: MF, ZMNR, zona de menor dureza y en el metal base no afectado de dos aceros de diferente colada. En la figura 10 se ilustra la resistencia a la tracción de los diferentes cupones (cada valor es el promedio de dos ensayos) y se incluye el valor obtenido para los depósitos de soldadura sin dilución.

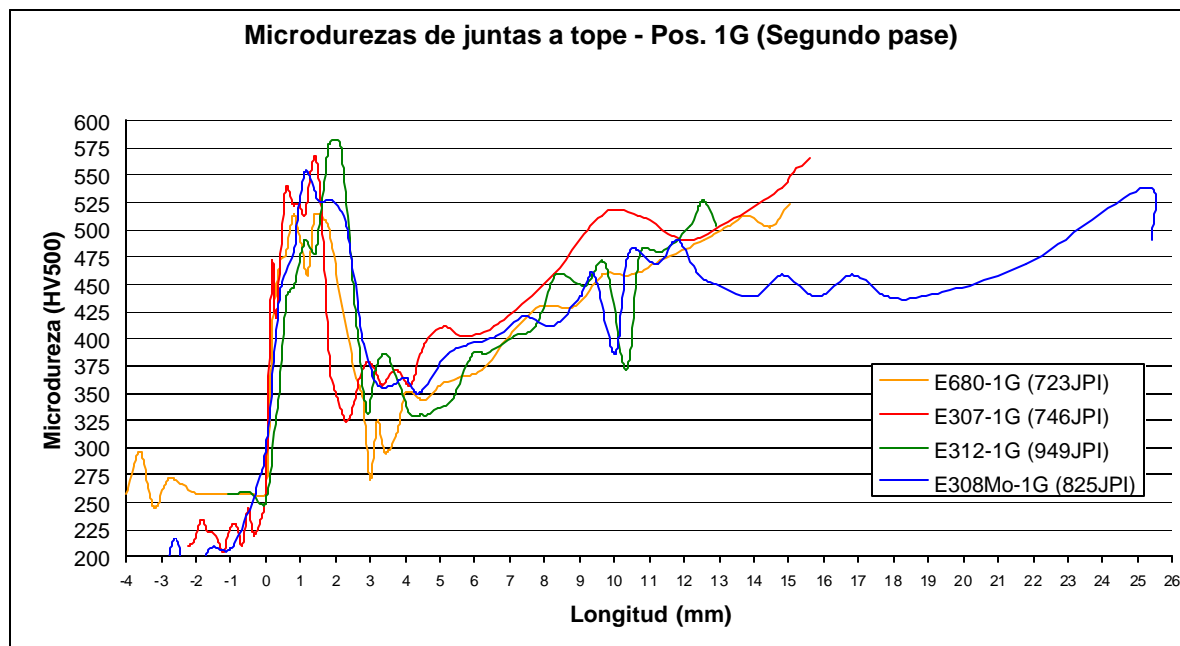


Figura 6. Perfil de dureza del segundo pase de juntas a tope de acero MIL A46100 con electrodos E680, E307, E312 y E308Mo aplicados en posición plana.

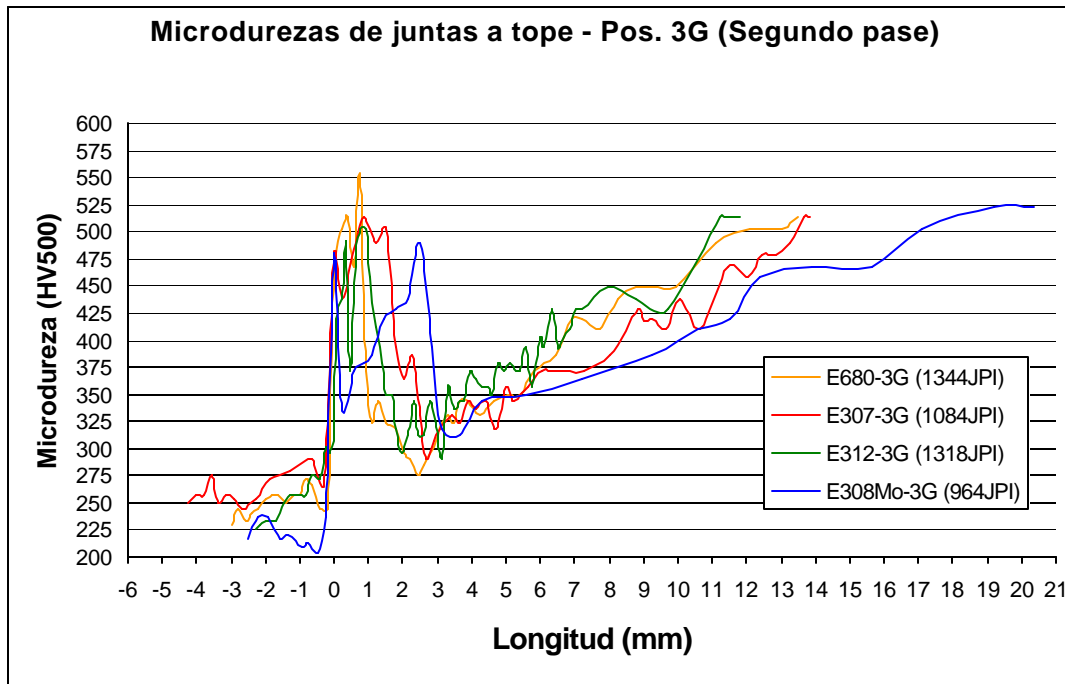


Figura 7. Perfil de dureza del segundo pase de juntas a tope de acero MIL A46100 con electrodos E680, E307, E312 y E308Mo aplicados en posición vertical.

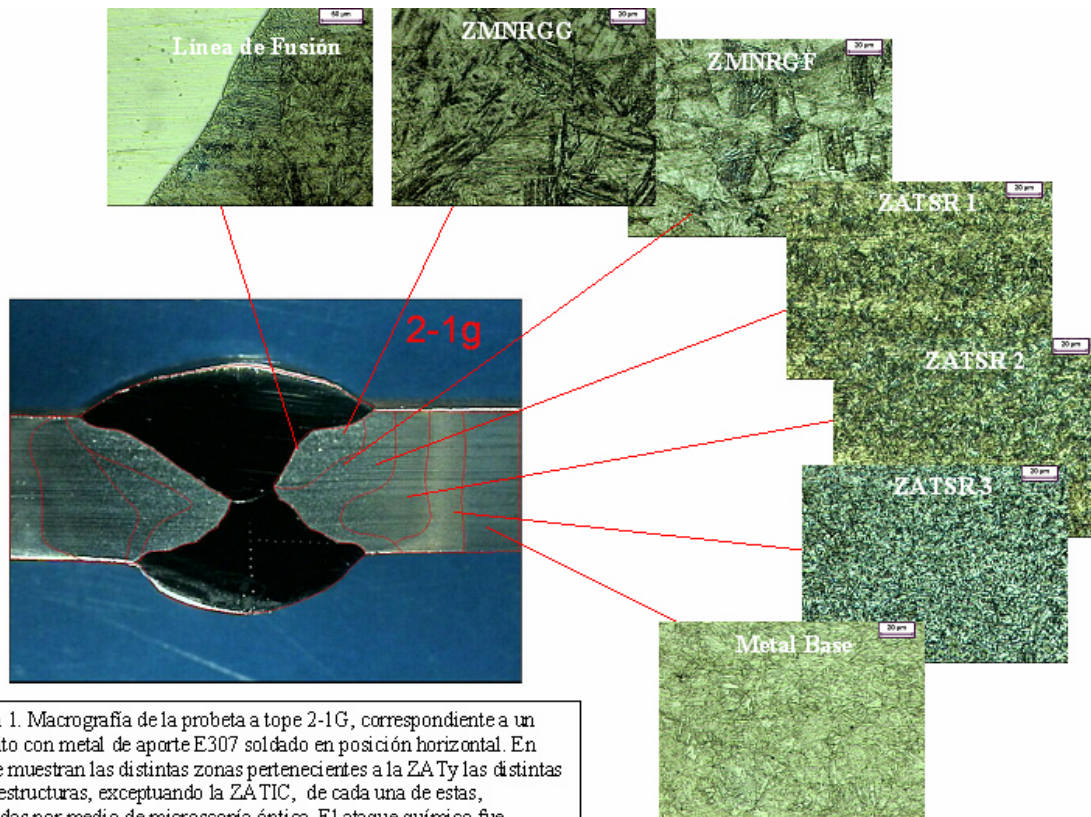


Figura 1. Macrografía de la probeta a tope 2-1G, correspondiente a un depósito con metal de aporte E307 soldado en posición horizontal. En esta se muestran las distintas zonas pertenecientes a la ZATy las distintas microestructuras, exceptuando la ZATIC, de cada una de estas, obtenidas por medio de microscopía óptica. El ataque químico fue realizado con Nital al 2%.

Figura 8. Microestructuras de las regiones de la ZAT de una junta a tope en posición 1G con E307.

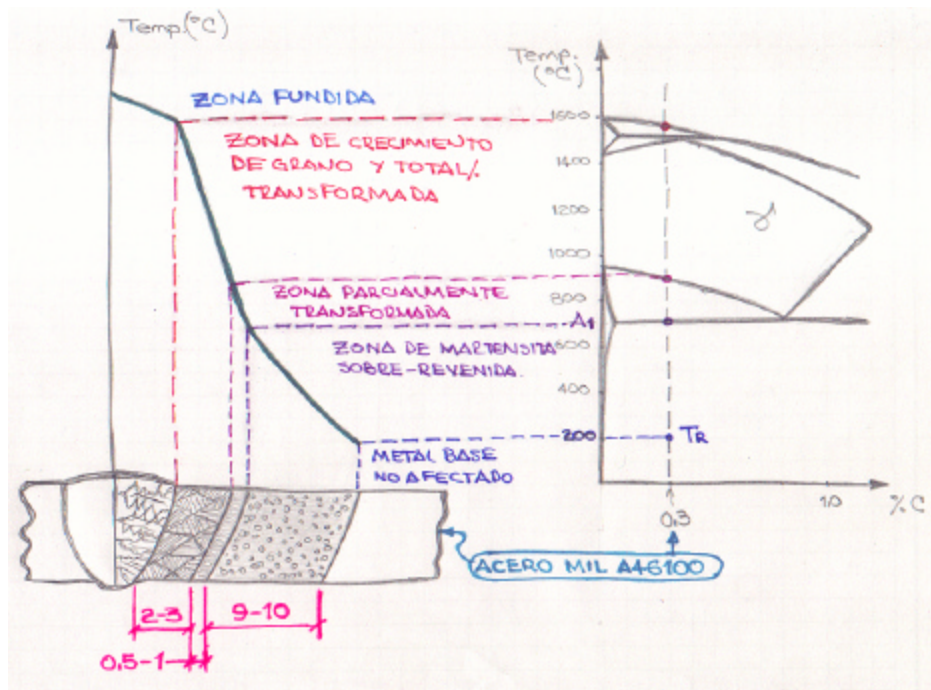


Figura 9. Relación de regiones de la soldadura, distribución de temperatura y diagrama Fe-Fe₃C.

La mayor resistencia a la tracción la tienen las juntas aplicadas con electrodos dúplex E312 y E680, cuyos depósitos tienen del orden del 15% de ferrita delta, con valores mínimos de 760MPa para el E312 y de 680MPa para el E680. En un valor muy similar se encuentra el E307 y la menor resistencia se obtuvo con el electrodo E308Mo con un valor mínimo cercano a los 500MPa.

La figura 11 muestra los valores de impacto de las diferentes regiones de la soldadura (cada valor es el promedio de cinco ensayos) obtenidas con cada electrodo en posición 1G y 3G; debido al espesor tan pequeño de las platinas (3/16") del acero MIL A46100 disponibles, se tuvieron que mecanizar probetas de impacto con tamaños inferiores a la norma, las cuales tenían 10mmx3.5mm.

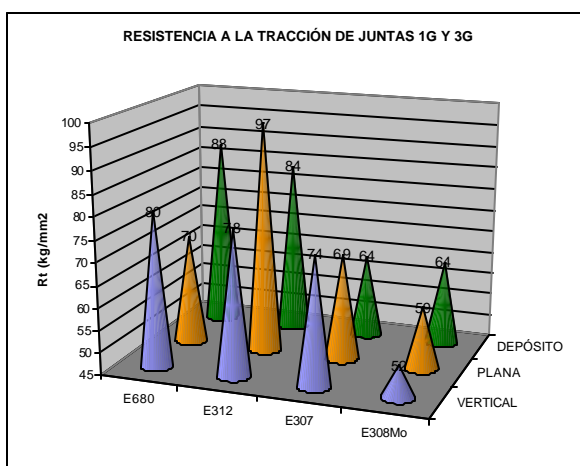


Figura 10. Resistencia a la tracción de juntas.

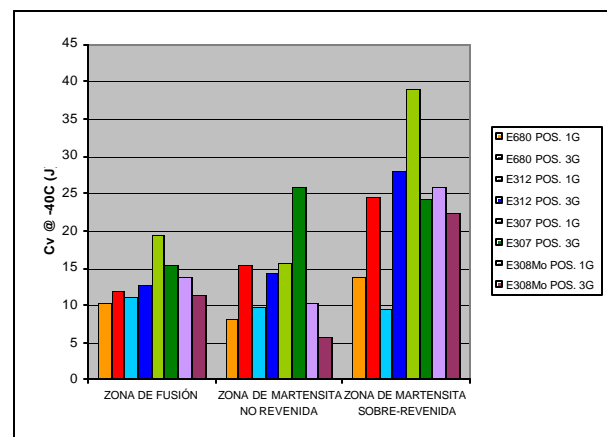


Figura 11. Resistencia al impacto Charpy.

Los valores de la resistencia al impacto en el metal fundido (zona de fusión en la figura), son similares para todos los depósitos de acero inoxidable (entre 11 y 14 J @ -40°C) con una pequeña ventaja de las juntas producidas con E307 (16-19 J @ -40°C). La alta variabilidad en los resultados de las demás regiones no permite tener apreciaciones concluyentes respecto a la incidencia ya sea del electrodo o de la posición de soldadura. De todas formas se nota una tendencia a obtener mayores absorciones de energía en la ZMSR debido, posiblemente, al efecto del sobre-revenido de la martensita original. La dispersión en los datos se debe a la diversidad de regiones microestructurales (ZMNR, ZATIC y ZATSR) y de constituyentes (martensita, ferrita, austenita, cementita) existentes en la ZAT como una consecuencia de los dos ciclos térmicos de soldadura superpuestos. Esto dificulta no solo la caracterización de las microestructuras sino también la interpretación de los resultados de impacto y la conexión entre ambas.

3.4 SUSCEPTIBILIDAD A LA FORMACIÓN DE GRIETAS

Se realizaron ensayos de CTS para determinar la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) de las soldaduras obtenidas, sin precalentamiento, con cada material de aporte aplicado bajo dos condiciones de entrada de calor, la cual fue cambiada a través del amperaje del arco. En ninguna de las juntas se encontraron grietas para las condiciones de soldadura establecidas en el espesor del metal base MIL A46100 de 4.3 mm sin precalentamiento.

A continuación se probaron los electrodos con juntas de alta restricción, conocidas como platinas en H, que es una prueba bastante rigurosa para establecer la

susceptibilidad al agrietamiento tanto en caliente como por HAC y que es un prerrequisito para las pruebas balísticas. Los resultados de las pruebas H inspeccionadas visualmente, con líquidos penetrantes y con radiografía, mostraron que las juntas producidas con electrodos E307 y E308Mo se agrietaron por el centro del cordón de soldadura; de acuerdo con los niveles de dilución medidos (alrededor del 30%) se estima que los depósitos están en una región del diagrama de Schaeffler donde la solidificación es austenita primaria y hay susceptibilidad al agrietamiento en caliente, lo cual sumado a su ubicación, son indicios que permiten presumir la aparición de este fenómeno. Las juntas realizadas con electrodos E680 y E312 no presentaron grietas durante las pruebas H y se sometieron a ensayos balísticos [15,16].

3.5 COMPORTAMIENTO BALÍSTICO

Tal como se esperaba a partir de los resultados de dureza y de las microestructuras de la ZAT, las juntas soldadas con electrodos E680 y E312 no alcanzaron el límite balístico del material MIL A46100 y no pasaron la prueba balística. Lo anterior se explica a partir de que la resistencia a la penetración de los proyectiles está íntimamente relacionada con la micro-estructura del material y con su dureza. Debido a que los materiales de aporte recomendables para la unión de acero de blindaje MIL A46100 sin problemas de agrietamiento producen metales fundidos con unas durezas tan bajas (250-300HV) y a que los ciclos térmicos de la soldadura someten al la ZAT a calentamientos localizados que inducen transformaciones microestructurales en el rango intercrítico (ZATIC) y de sobre-revenido (ZATSR) de la martensita reduciendo la dureza inicial del material hasta valores tan bajos como 300HV en unas extensiones considerables en comparación

con el diámetro del proyectil para el cual está proyectado el blindaje ($\text{Ø}7.62\text{mm}$), es razonable pensar que la soldadura y la ZAT de la misma no logre tener el mismo desempeño balístico que el material base en estado de entrega. Lo anterior implica un cambio de concepción sobre lo que se espera de una soldadura ante los impactos de proyectiles ya que son zonas que presentan una vulnerabilidad, independiente de que se utilice E680 o cualquier otro tipo de electrodo.

4. CONCLUSIONES

- Independiente del tipo de soldadura (filete o tope), electrodo o entrada de energía, las soldaduras se pueden definir por las siguientes regiones: el metal fundido (MF) con durezas entre 220 y 280HV según el material de aporte, una zona de martensita no revenida (ZMNR) de tamaño de grano variable con durezas tan altas como 580HV y una zona de martensita sobre-venida con durezas mínimas entre 250-300HV.
- El perfil de durezas de la ZAT del material MIL A46100 es similar en las soldaduras al arco.
- El ancho total de la ZAT, considerado cuando recupera la dureza mínima de 500HV, es de 6 a 8mm para soldaduras en filete y de 11 a 14mm para soldaduras a tope.
- Las entradas de energía asociadas con las posiciones de soldadura 1G y 3G para los electrodos usados en diámetro de $\text{Ø}3/32''$ no producen cambios sustanciales en las regiones microestructurales de la ZAT. El E308Mo produjo las ZAT mas anchas que llegan hasta los 25mm.
- La mayor resistencia a la tracción se obtuvo con los electrodos E312 y E680 con valores mínimos, respectivamente, de 760MPa y de 680MPa. El E307 tuvo un valor muy similar y la menor resistencia fue la del E308Mo con un valor aproximado de 500MPa.
- Independiente del tipo de soldadura, electrodo o entrada de energía la resistencia al impacto Charpy fue muy similar en todos los metales fundidos, sin embargo, en ninguna de las regiones se alcanza la resistencia al impacto del metal base.
- La dispersión en los resultados de impacto debida a la multiplicidad de microestructuras y constituyentes generados por imponer dos ciclos térmicos no permite concluir acerca de la incidencia del electrodo o la posición de soldadura en esta propiedad.
- Con ningún electrodo se presentaron grietas asistidas por hidrógeno en las pruebas CTS, no obstante la entrada de energía.
- Los electrodos E308Mo y E307, recomendados para soldar acero MIL A46100, presentaron agrietamiento durante la soldadura de juntas H de alta restricción. Los electrodos E680 y E312 no presentaron ningún tipo de agrietamiento.
- El comportamiento balístico de las regiones de las uniones soldadas con electrodos E680 y E312 (MF, ZMNR y ZMSR) no alcanza el nivel propio del material MIL A46100 de 4.3mm de espesor debido a la presencia de martensita no revenida y de una zona de baja dureza con un ancho superior al diámetro del proyectil de prueba de acuerdo con la norma [17]. Se espera un comportamiento similar con los otros tipos de electrodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Military Specification MIL A46100. Armor plate, steel, wrought, high-hardness. 1986.
2. T. Mohandas, G. Madhusudan. Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments. *Journal of Materials Technology* 57 de 1996.
3. T. Mohandas, G. Madhusudan, B. Satish. Heat affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *Journal of Materials Technology* 88 de 1999.
4. T. Mohandas, G. Madhusudan, K. Papukutty. Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments. *Journal of Materials Technology* 74 de 1998.
5. N. Bailey, F.R. Coe, TG Gooch. *Welding Steels without hydrogen cracking*. ASM International and Abington Publishing.
6. V. Murti, Y. Sastry, V. Rao, G. Madhusudan. Some studies on the service weldability of HSLA steels using 18Cr-8Ni-6Mn type austenitic electrodes. *Journal of Materials Technology* 37 de 1993.
7. P.K. Gangopadhyay, P.K. Das. Selection of electrodes for welding armour plates and procedure approval. *Indian Welding Journal*. Abril de 1989.
8. Madhusudhan Reddy et Al. Cold cracking studies on low alloy steel weldments: effect of filler metal composition. Institute of Materials, Minerals and Mining. 2002.
9. Norma SD-X12140D General Requirements for welding homogeneous armor with metal arc.
10. Norma MIL-STD-1185 Welding High Hardness Armor. Department of Defense of U.S.
11. Ground Combat Vehicle Welding Code – Steel. Revisión B. Marzo 15 de 2000.
12. Documento TC-9237, Capítulo 12, sección VII Armor Plate Welding and Repair.
13. Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Caracterización microestructural del acero MIL A46100 producido por Temtco Steel.
14. Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia. Caracterización de propiedades mecánicas del acero MIL A46100 producido por Temtco Steel.
15. F. Ade. Ballistic qualification of armor steel weldments. *Welding Journal*, sept. de 1991.
16. P.R. Gangopadhyay, P.K. Das. Selection of electrodes for welding of armour plates and procedure approval. *Indian welding Journal*, abril de 1989.
17. National Institute of Justice. Ballistic resistant protective materials. NIJ standard 0108.01.