

Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso *Smaw* y metal de aporte ferrítico de alta resistencia

Iván J. Castilla^a
Jimmy Unfried S.^b

Resumen

En esta investigación se estudió la soldabilidad de uniones de un acero templado y revenido para blindajes del tipo MIL A46100 (Fe; 0,28% C; 0,30% Cr; 0,24% Mo y 0,20% Ni), usando metal de aporte AWS E11018M, y el proceso *Smaw* (soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido), a través de relaciones generadas entre microestructura, variables del proceso y propiedades mecánicas (tracción, impacto Charpy V y microdurezas), en juntas de soldadura. Asimismo se evaluó el agrietamiento en frío a través de dos ensayos (severidad térmica controlada y placa H), y el desempeño en servicio (balístico) de las mismas, obtenidas al practicar uniones con dos entradas de calor, denominadas alta y baja. Se estableció la incidencia del aporte calórico sobre las propiedades y el desempeño.

Palabras clave: Soldabilidad, aceros para blindajes, ensayo de severidad térmica controlada, ensayos de placas en H, metal de aporte ferrítico.

Abstract

In this research was studied the weldability of Q&T armor steel MIL A46100 (Fe; 0.28%C; 0.30%Cr; 0.24%Mo y 0.2%Ni), with AWS E11018M filler metal and SMAW manual process, through relations generated between of microstructure, process variables, mechanical properties (tension, toughness impact Charpy V and microhardness); in addition was evaluated the susceptibility of the HIC through CTS (Controlled Thermal Severity) test and H plates on the weldments and the performance of service (ballistic performance), in different input heats, named: high and low. Has been established the incidence of the input heat on the properties and the service performance.

Key Words: Weldability, armor steel, controlled thermal severity test, H plate test, ferritic filler metal.

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2008

Fecha de aceptación: 9 de mayo de 2008

^a Cotecmar. Departamento de Gerencia de Nuevas Construcciones.

^b Grupo de Investigación en soldadura. Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
Autor correspondiente: icastilla@cotecmar.com

Introducción

Los estudios de soldabilidad de materiales implican diversos y complejos ensayos, que buscan establecer relaciones entre la sanidad, la microestructura obtenida en las diferentes zonas de soldadura, las propiedades mecánicas de las mismas y su desempeño. El anterior aspecto incluye actividades como: evaluación de diversas propiedades, uso de algunas técnicas de caracterización de microestructuras a escala morfológica y composicional, tanto en los materiales involucrados antes de la elaboración de la junta, como de los depósitos obtenidos en las condiciones de soldeo; así como el control y ajuste de las variables de los procesos de soldadura involucrados, y finalmente la estimación cualitativa y cuantitativa a través de ensayos, cuando sea posible, del desempeño en servicio de la junta soldada. Todo esto apunta hacia la elaboración y/o mejoramiento de los procedimientos de aplicación de algunos tipos de soldaduras.

La introducción de procesos de manufactura y de control de mayor versatilidad (por ejemplo el proceso de conformación termomecánico controlado -TMCP-), ha permitido mejorar ostensiblemente aspectos como el crecimiento del grano, las propiedades mecánicas y los tratamientos térmicos en el mismo tren de laminación, haciendo posible la fabricación de aceros adecuados para aplicaciones como los blindajes. En esos casos, resulta una buena alternativa los aceros constituidos con adiciones menores a un total del 5% en peso de elementos de aleación, principalmente Mn, V, Mo, Cr, Ni, entre otros, con contenidos de carbono entre 0,25% y 0,30% en peso y con tratamientos térmicos de temple y revenido, luego del laminado en caliente, para producir estructuras martensíticas y bainíticas (Kou, 2003).

Para construir estructuras complejas, en las que se requiera la protección del personal y la reducción del peso, como las de los vehículos militares, es necesario, dependiendo de su complejidad, aplicar procesos de manufactura, conformación y unión, en los cuales se adicionan ciclos térmicos y por ende cambios microestructurales importantes que deben ser controlados con el fin de mantener la integridad

de las propiedades útiles de manera que el material cumpla con el objetivo para el que fue creado.

Diversas investigaciones dedicadas al estudio del problema de la soldabilidad de aceros microaleados han contribuido a aclarar algunos aspectos involucrados en las dificultades encontradas en estos materiales debido a la acción del ciclo térmico inherente a la soldadura aplicada a la fabricación de uniones, tales como el efecto de los diferentes elementos de aleación (Olson, Liu y Edwards, 1990), el desarrollo microestructural de las zonas de soldadura, (Akselsen, Grong, Ryum y Christensen, 1986), la predicción de propiedades en la zona afectada térmicamente (ZAT) y la soldabilidad con técnicas modernas (N. Yurioka, 1990). Otros estudios importantes ligados a la ZAT, en aceros microaleados (Andersen, Kluken y Grong, 1993), determinaron la aparición de una zona blanda dentro de esta, como producto de la incidencia del ciclo térmico. Esto último resulta de gran importancia en la aplicación de soldaduras en aceros para propósitos de protección, debido a la reducción del poder de respuesta a los impactos a alta velocidad en algunas zonas de las juntas soldadas, lo que aumenta el riesgo de falla durante el servicio (Madhusudhan y Mohandas, 1994).

También hace parte de la problemática de estos aceros, la adecuada selección de electrodos para su soldadura, lo cual ha sido discutido (Gangopadhyay y Das, 1989) con fundamento en la interrelación de variables de soldadura, el proceso, junta de fabricación y características del metal base, entre otros aspectos. Se ha hecho énfasis en el cuidado de aspectos relacionados con cada uno de los tipos de soldabilidad, tratándose los conceptos alrededor de los problemas de agrietamiento en frío (*HIC* o agrietamiento inducido por hidrógeno), y en caliente, los cuales forman parte del concepto de soldabilidad de fabricación.

En este documento la selección de electrodos está dirigida indiferentemente a los ferríticos o los de acero inoxidable. En el Cuadro 1 se muestra cada uno de los pasos incluidos en el proceso de aprobación, desde el punto de vista de los fenómenos de agrietamiento en soldaduras.

Los materiales de aporte ferrítico, con respecto a la soldadura de este tipo de aceros, resultan ser adecuados por ciertas características tales como:

- Altas resistencia y tenacidad del depósito de soldadura.
- Bajo costo. El precio del electrodo E11018M es 50% menor que el de los electrodos austeníticos y duplex (E307, E312 y E308Mo) que son recomendados para soldar este tipo de aceros.
- Compatibilidad de estructuras cristalinas en la línea de fusión que favorecen el crecimiento epitaxial.

A pesar de estas cualidades se deben tener en cuenta los riesgos inherentes al ingreso de hidrógeno atómico al depósito, que aumentan la posibilidad de agrietamiento en frío. La familia de electrodos EXXX18, de alta resistencia (Código *Asme*), con bajo y extrabajo hidrógeno, representan a tales tipos de electrodos con este riesgo, por lo cual se extrema el cuidado y manipulación de los mismos para optimizar una correcta aplicación.

Cuadro 1. Pasos propuestos para la selección de electrodos para soldar aceros para blindajes^{1/}

1	Determinación de la susceptibilidad de las juntas soldadas a la formación de grietas en frío
2	Determinación de la resistencia de las juntas soldadas a la formación de grietas en caliente
3	Determinación de las propiedades de resistencia a la tracción y doblaje de las juntas
4	Determinación de la microestructura del depósito de soldadura
5	Determinación de la composición química del depósito de soldadura
6	Determinación de las propiedades mecánicas del depósito de soldadura
7	Ensayos de desempeño balístico

^{1/} Madhusudhan Reddy G. y Mohandas T. (1994)

El fenómeno de reducción de dureza de la ZAT, y su importancia para el desempeño en servicio de los blindajes, relacionan la problemática de los efectos del aporte calórico (entrada de energía) y las transformaciones microestructurales en las

zonas de soldadura con el proceso de soldadura y sus efectos sobre el desempeño en servicio (Madhusudhan, Mohandas y Papukutty, 1998). Algunos estudios llegan a evidenciar que el proceso de soldadura manual al arco con electrodo revestido –*Smaw*– puede llegar a ser el que menos afecte las propiedades balísticas en la soldadura de aceros microaleados creados para tal fin, a causa de sus bajas entradas de energía relativas a otros procesos de soldadura.

Con este artículo se pretende identificar la soldabilidad dentro de las condiciones planteadas (diseño de junta, material de aporte y de base) mediante pruebas de resistencia al agrietamiento en frío utilizadas para los materiales de alta susceptibilidad. Asimismo se analizarán los resultados de pruebas en servicio, principalmente balísticas, las cuales se describen y se exponen sus resultados a continuación.

Materiales y equipos

El material base usado en este trabajo pertenece a la clasificación MIL A46100, que son aceros del tipo placas de alta dureza (*Hi-Hard plate*), fabricados por el proceso TMCP, templados @900°C y revenidos @200°C enfriados al aire, suministrado en forma de láminas con un espesor de 4,5mm. Su composición química se muestra en el Cuadro 2 y algunas propiedades pueden verse en el Cuadro 3. La lámina presenta propiedades homogéneas en todo su espesor. El Gráfico 1 muestra una micrografía que exhibe la estructura típica del material.

Cuadro 2. Composición química del metal base

C	0,284	Mo	0,243	P	0,01	Sn	0,008
Si	0,534	Al	0,02	Ni	0,192	Ti	0,031
Mn	0,899	Cu	0,177	Cr	0,3	V	0,007
S	0,002	Pb	0,005	Sb	0,001	Fe	Balance

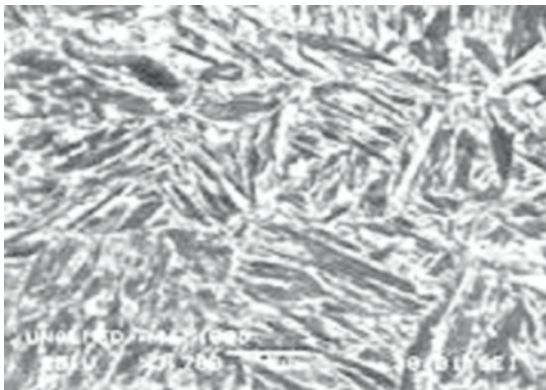
El metal de aporte usado fueron electrodos del tipo AWS E11018M de 2,4mm (Ø3/32") de diámetro y 300mm (12") de longitud, fabricados por West Arco. La microestructura del depósito sin dilución

de este material es esencialmente ferrita (>95%) con algo de carburo de hierro (Fe₃C) (Vercesi y Surian, 1996). Su composición química puede verse en el cuadro 4.

Cuadro 3. Propiedades y características del metal base

Dureza superficial = 523 VHN/500grf/30s
Temperatura Eutectoide = 732°C
Temperatura Austenización = 835°C
Tamaño de grano previo = ASTM 7-8
Impacto Charpy V @ -40°C = 23 - 31J
Resistencia máxima a la tracción = 1700 MPa
Elongación = 9% Reducción Área = 25% CE = 0.6

Gráfico 1. Estructura martensítica ^{1/}



^{1/} En paquetes de listones de la estructura del metal de base. SEM 3700X, modo SEI

Cuadro 4. Composición química del metal de aporte

C	Mn	P	S	Si
0,05	1,64	0,02	0,01	0,46
Ni	Cr	Mo	V	Fe
2,23	0,36	0,37	0,02	Balance

El depósito del electrodo sin dilución tiene una dureza promedio de 223VHN/500grf/30s, una resistencia al impacto Charpy V de 70,6J@-51° C y una resistencia máxima a la tracción de 880MPa (elongación del 20%), propia de los depósitos de este tipo de electrodo con bajo contenido de carbono (Surian y De Vedia, 1999).

El proceso de soldadura fue el de arco eléctrico con electrodo revestido, con una fuente de potencia DC multiprocesos de 400A máximo, marca Lincoln Electric Incorporated.

Para la soldadura de las probetas y los cupones necesarios fueron usadas dos entradas de energía denominadas como alta y baja, obtenidas con las variables de soldadura que se muestran en el Cuadro 5. Cada una de las entradas pretende simular las condiciones de energía presentes para una amplia gama de posiciones en fabricación, que incluyen, en la de baja, posiciones plana y horizontal y en la de alta las posiciones vertical y sobrecabeza.

Método experimental

El método seguido para evaluar la soldabilidad del material de base con el electrodo E11018M, consistió en los siguientes pasos: i) elaboración de probetas en platinas a tope con las diferentes entradas de energía (alta y baja) para determinar sus características metalúrgicas y propiedades mecánicas; ii) elaboración de probetas en filetes con el ensayo de severidad térmica controlada (CTS) y evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento en frío (HIC) con baja restricción y el desempeño de zonas de soldadura, y iii) elaboración de placas H para susceptibilidad al agrietamiento con alta restricción y evaluación del desempeño balístico.

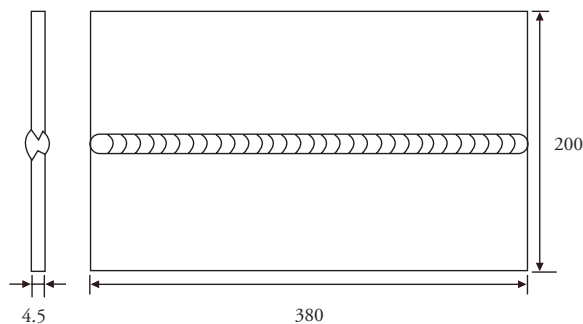
Cuadro 5. Variables usadas para generar las entradas de calor alta y baja

Cupón	Pos.	Pasada	Amp. (A)	Volt. (V)	Vel (mm/s)	Entrada de Energía (J/mm)
Baja	Plano	Inicial	84,0	21,0	2.8	626
		Respaldo	83,3	21,5	2.2	814
Alta	Vertical ascedt.	Inicial	63,6	21,0	1.5	890
		Respaldo	62,5	20,0	1.3	962

Soldaduras en platinas a tope

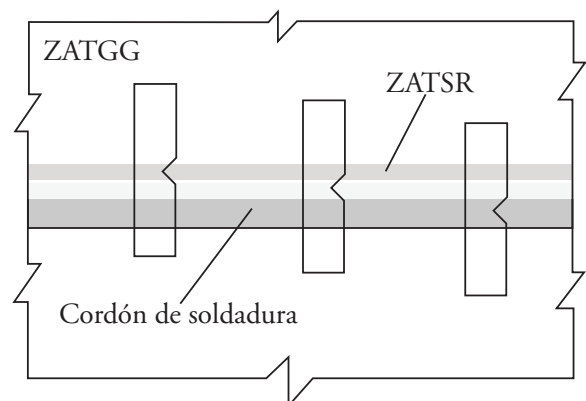
A partir de platinas del material base con dimensiones de 380x100x4,5mm, se elaboraron cupones de soldadura como los que se muestran en el Gráfico 2, usando dos pases de soldadura (inicio y respaldo) y una junta cuadrada de 1,5mm de apertura. Se elaboraron cupones diferentes con cada una de las condiciones de soldadura establecidas para las entradas de calor alta y baja, respectivamente.

Gráfico 2. Esquema del cupón de platinas a tope



A partir de estas platinas se extrajeron probetas para evaluar las propiedades mecánicas de: tracción en la junta de soldadura, impacto Charpy V, y barridos de microdurezas Vickers. Esta última también se aprovechó para realizar observación metalográfica; la microscopía óptica de luz reflejada (Molr) en un microscopio marca Olympus DM300 y la de barrido electrónico (SEM) en un Jeol LM3000. La ubicación de las probetas de impacto, con respecto al cordón de soldadura se muestra en el Gráfico 3, obsérvese que las entallas de estas probetas se ubican

Gráfico 3. Detalle de la ubicación de las probetas de impacto con respecto al cordón de soldadura en el cupón (Gráfico 2)

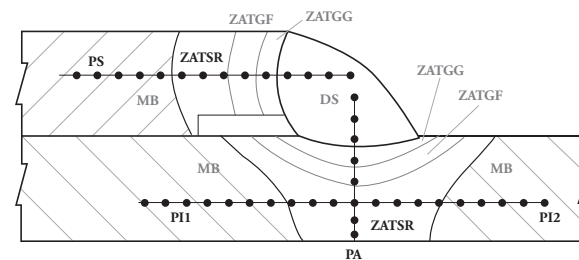


en diferentes zonas de la unión de soldadura (ZAT y cordón de soldadura). Cada zona fue situada a partir de la ubicación proporcionada por las durezas y la observación metalográfica.

Soldadura en filete y ensayo CTS

Usando el procedimiento y la probeta propuesta para el ensayo de severidad térmica controlada (CTS), de la norma AWS B4.0-98 (1997), se elaboraron soldaduras a filete de restricción moderada, de las cuales se extrajeron probetas que fueron examinadas de dos formas: en la primera, se llevaron a cabo los pasos que exige la norma B4.0 para obtener los resultados de soldabilidad de fabricación que este ensayo permite, y en la otra, se estudiaron los perfiles de microdurezas con sus respectivas microestructuras en las zonas de soldadura, tal como lo muestra el esquema del Gráfico 4. En el primer caso, la evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento HIC, se hizo basada en la presencia de grietas en la ZAT o en el cordón de soldadura. A partir del esquema del Gráfico 4, es evidente la relación que se obtiene entre la ubicación de las zonas y las respectivas lecturas de dureza en ellas.

Gráfico 4. Detalle de los barridos de microdurezas Vickers 500grf/30s, en el ensayo CTS

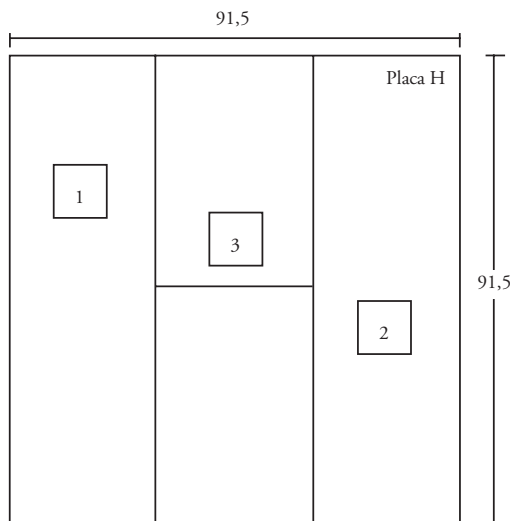


Ensayos con placas H

Fue llevado a cabo el ensayo de soldabilidad estandarizado MIL STD 1941, denominado placas H, el cual consiste en soldar cuatro placas con cordones de soldadura formando una H con las condiciones de soldadura de interés, dejando la horizontal con una alta restricción por ser la última en hacerse. Este ensayo resulta ser de doble vía; por un lado, ofrece la oportunidad de evaluar la soldabilidad de fabricación, ya que brinda la posibilidad de realizar soldaduras con alta restricción por su configuración. Por otro, da la posibilidad de evaluar en las mismas

soldaduras altamente restringidas, su respuesta, al practicarle impactos balísticos en zonas seleccionadas para saber la respuesta de la junta fabricada según una secuencia de soldadura elegida; cuando el impacto atraviesa completamente o produce grietas en la zona estudiada la prueba es negativa. En el Gráfico 5, puede verse el esquema general de una placa H.

Gráfico 5. Esquema de la placa H y sus dimensiones



Luego de soldar la placa H con el proceso y las variables seleccionados, se procede a una inspección, visual y radiográfica, por medio de ensayos no destructivos (END), en busca de grietas y defectos. Si el cupón pasa las inspecciones, entonces es sometida a la prueba de impacto balístico para evaluar la respuesta de cada una de las zonas de soldadura a los proyectiles (Ade, 1991).

Dependiendo del tipo de acero que se encuentra en evaluación y los estándares del blindaje, se seleccionan los parámetros para la evaluación balística.

Resultados y discusión

Propiedades mecánicas de las juntas soldadas

Los resultados de los ensayos de tracción se presentan en el Cuadro 6. Todas las soldaduras exhibieron valores de tracción más bajos que los del metal base y fueron superiores a los del metal de aporte sin dilución. Los valores de tracción obtenidos fueron similares para ambas entradas de calor, la forma de fractura se ubicó en la mayoría de los casos en el metal de soldadura.

Cuadro 6. Valores de tracción de las juntas de soldadura^{1/}

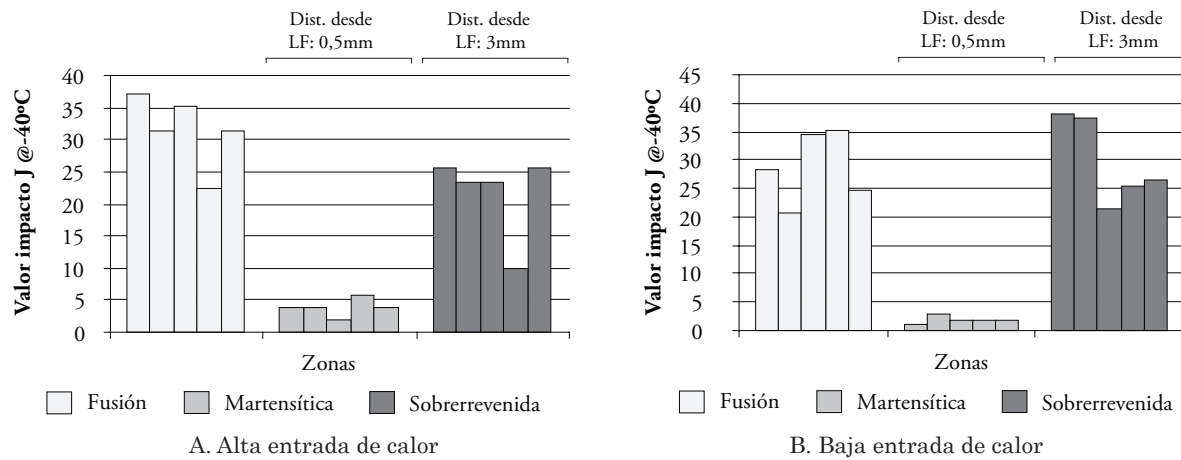
Entrada de calor (J/mm)	Área inicial (mm ²)		Carga máxima (kgf)		Resistencia última [MPa]		Observaciones sobre localización y apariencia de fractura
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	
Baja	100,8	102,0	10600	10800	1030,6	1037,6	Fractura normal con bordes agudos.
Alta	102,0	100,4	11300	10700	1085,7	1044,4	La probeta 1 se fracturó en forma normal y la probeta 2 se fracturó por la ZAT.

^{1/} Obtenidas con las condiciones de soldadura para entrada de energía alta y baja. Máquina de tracción universal Monsanto 100 de 10 Ton de capacidad – Probetas planas de ¼ de reducción en cuello.

En el Gráfico 6 se muestran los resultados del ensayo de impacto para cada una de las regiones de soldadura en las probetas de platinas a tope. Las tres zonas en donde se realizaron los ensayos presentan tolerancia al impacto Charpy V muy marcados y diferentes: la zona martensítica exhibe los valores de impacto más pequeños, mientras la

zona sobrerrevenida presenta el mejor desempeño, y finalmente la zona fundida mostró valores de impacto un poco más bajos que la sobrerrevenida y resultados muy parecidos a los valores alcanzados en ensayos de impacto realizados al material base MIL A 46100 (23-31J).

Gráfico 6. Energía (J) de impacto absorbida en las diferentes zonas de soldadura



Los barridos de microdureza practicados en las probetas de observación metalográfica, según el esquema del Gráfico 7, se muestran en el Gráfico 8 para los cupones a tope, y en el Gráfico 9 para las probetas de CTS. Estos evidencian de la existencia las distintas zonas, y revelan un desempeño definido donde se muestra, después de la zona de fusión, aumento drástico de la dureza, incluso por encima del valor de dureza del metal base sin ser afectado por un ciclo térmico de soldadura. Esta zona corresponde a la denominada zona de grano grueso

(ZATGG), luego se exhibe un pequeño descenso de la dureza en la zona de grano fino (ZATGF), para proceder a una caída súbita en la zona afectada térmicamente sobrerrevenida (ZATSR), en donde se observa una disminución crítica de las propiedades del material base. Nótese que los gráficos 8(A) y 8(B) muestran que la recuperación de la dureza para los probetas a tope se presentan entre los 14 y 16mm, sin importar la entrada de energía, al igual que en las probetas CTS las cuales presentan un ancho de la ZAT de 8 a 11mm (Gráfico 9).

Gráfico 7. Esquema del barrido de microdurezas Vickers en las probetas de observación metalográfica

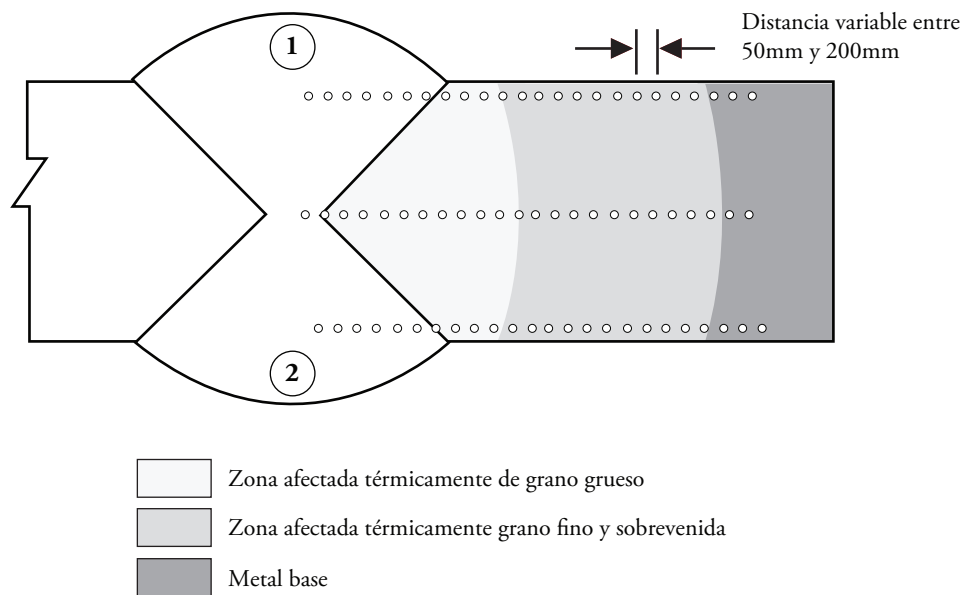
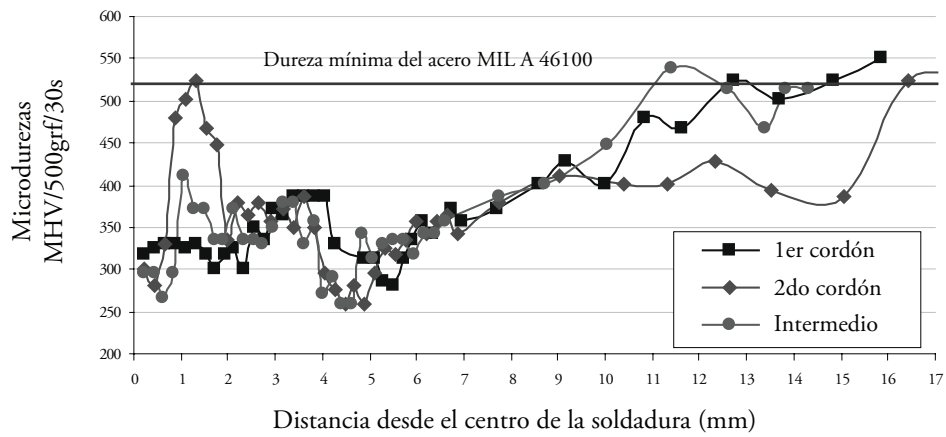
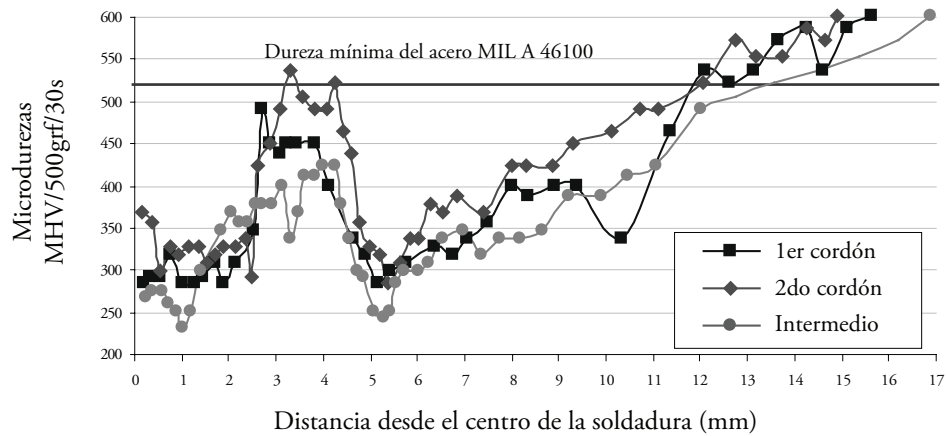


Gráfico 8. Barridos de microdurezas en las probetas a tope

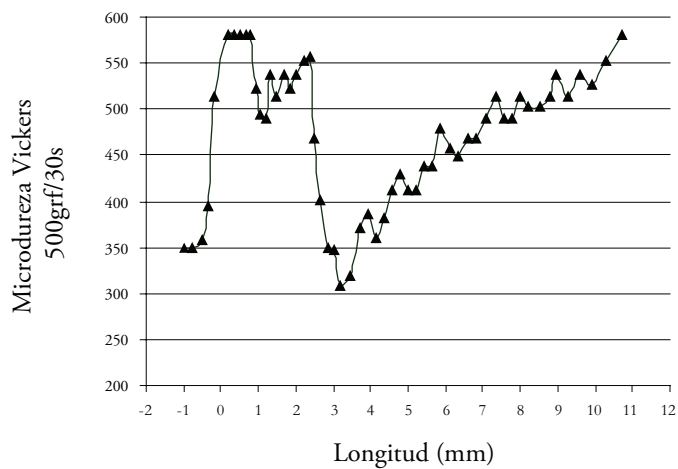


A. Alta entrada de energía

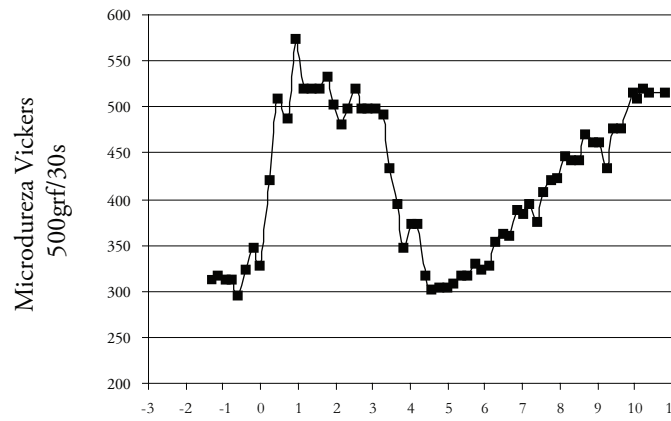


B. Baja entrada de energía

Gráfico 9. Barridos de microdurezas en las probetas CTS

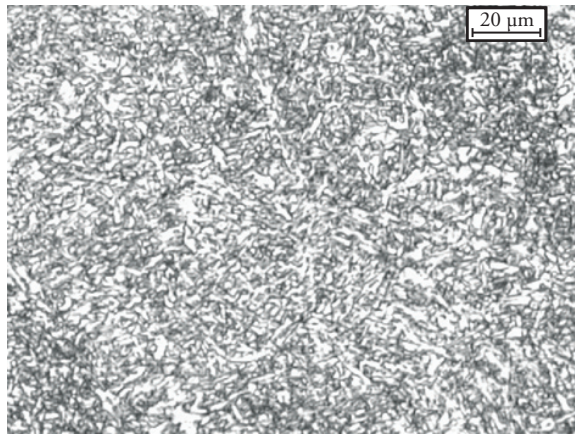


A. Alta entrada de energía

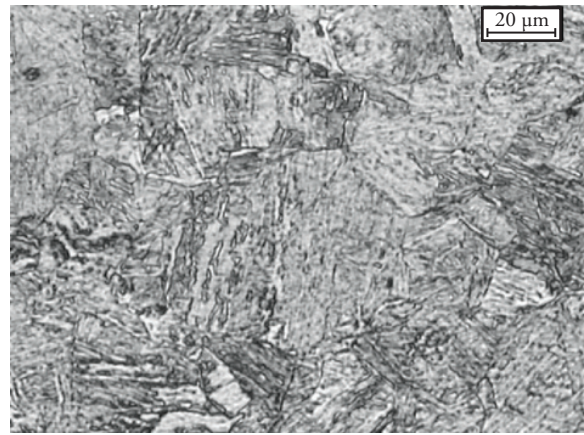


B. Baja entrada de energía

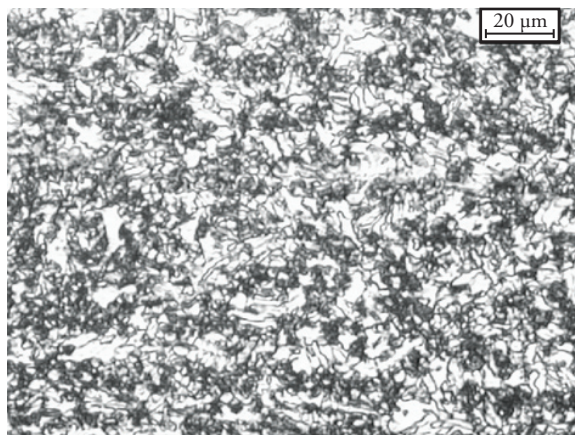
Gráfico 10. Microestructuras de las diferentes zonas de soldaduras obtenidas en las probetas a tope



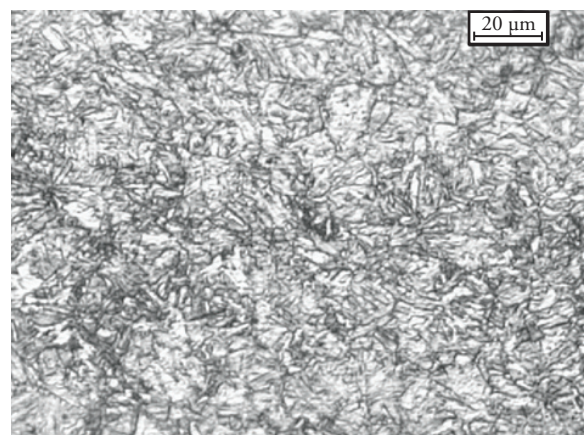
A. Zona de fusión



B. ZATGG



C. ZATSR



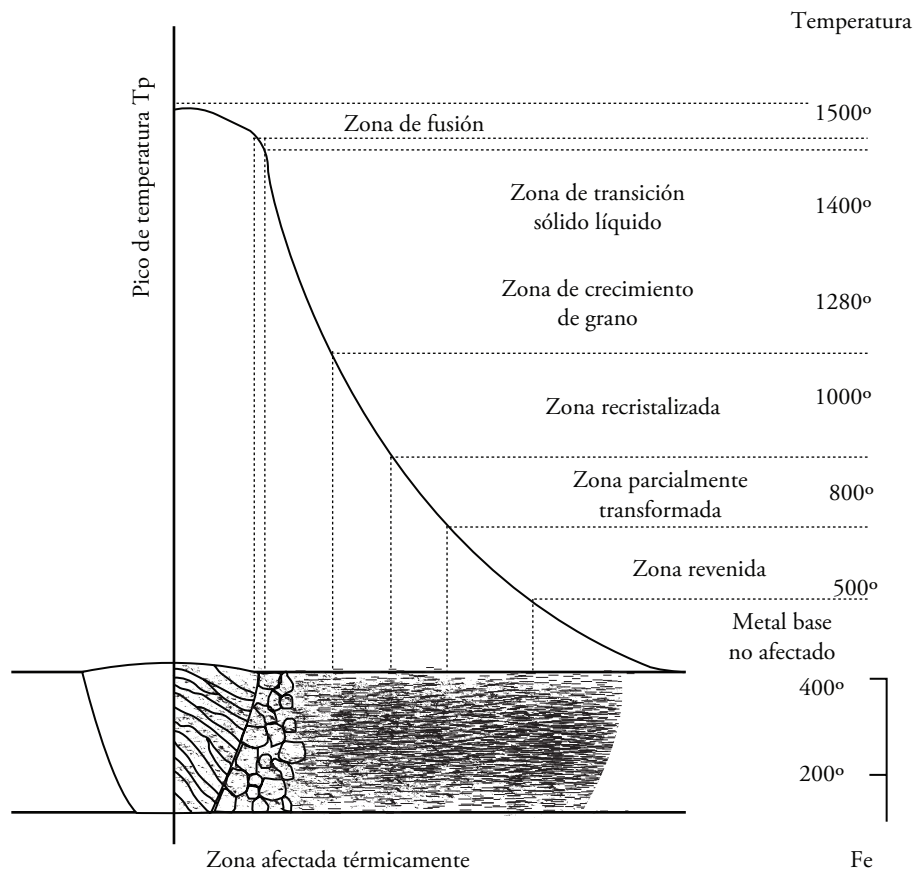
D. Zona afectada térmicamente sobrerrevenida de recuperación de dureza

Microestructuras de las zonas de soldadura

Las microestructuras obtenidas en las diferentes zonas de soldadura en las probetas a tope se muestran en el Gráfico 10. La zona de fusión es primordialmente ferrita con algo de carburo de hierro (Fe_3C o cementita), debido a la dilución en la zona de fusión, la cual está entre el 40 y el 60% por el diseño de la junta usada (Gráfico 10(A)). La zona de grano grueso térmicamente afectada, corresponde a paquetes de listones de martensita no revenida de tamaño mayor al del metal base (Gráfico 10(B)). Esta estructura es típica de picos de temperatura altos ($1300^{\circ}C$ o más donde se disuelven carburos de V, Nb y Ti, responsables de mantener el tamaño de grano fino) con enfriamientos muy rápidos.

En la ZAT sobrerrevenida (ZATSR) mostrada en el Gráfico 10(C), se puede advertir que hay descomposición de la martensita en fases más estables como ferrita y cementita a causa de las temperaturas pico alcanzadas en esta zona por el ciclo térmico experimentado, que incluye velocidades de enfriamiento más lentas que las de las zonas cercanas al cordón de soldadura. El Gráfico 11, muestra la relación de las transformaciones microestructurales de la zona afectada térmicamente con los picos de temperatura alcanzados en la misma, por la acción del proceso de soldadura. Nótese la correspondencia entre las zonas encontradas en la exploración metalográfica y las transformaciones exhibidas en este gráfico.

Gráfico 11. Transformaciones microestructurales en la ZAT de un acero debido a los picos de temperatura



Susceptibilidad al agrietamiento en frío

Los ensayos realizados para establecer la susceptibilidad al agrietamiento en frío en este tipo de juntas, el ensayo CTS y el de la placa H, mostraron

que en ninguno de los casos de entrada de calor evaluados se presentaron grietas, ni en el depósito ni en la ZAT, a pesar de que estaban presentes algunas condiciones como: microestructura suscep-

tible (presencia de la martensita), restricciones en el cordón de soldadura y un carbono equivalente mayor al 0,6.

En ambos casos, los electrodos E11018M fueron tratados de manera adecuada: empaques bien sellados y cuidados y almacenamiento en hornos portátiles a 100°C antes de usarse, por lo cual se puede pensar que los niveles de humedad absorbidos por el revestimiento y las otras fuentes de hidrógeno no son tan considerables para generar una concentración suficiente de este para darse HIC.

Desempeño en servicio de las juntas

Con munición de 7.62mm, una velocidad inicial de 760m/s en el proyectil y condiciones establecidas según el estándar NIJ0108.01, se midieron las respuestas de las zonas de soldadura en las placas H a los impactos balísticos. Los resultados de las características de los impactos se muestran en el

Cuadro 7. Todos los datos fueron recopilados según lo establecido en el estándar de procedimientos de operaciones 2-2-711(TOP, 1994).

Puede observarse en el Cuadro 7, que solo las zonas ubicadas a 37 y 39 mm de la línea de fusión no resultaron atravesadas (no pasantes) por los proyectiles; estas corresponden a la ubicación, enteramente en zonas de alta dureza y resistencia, pero de mediana absorción de energía al impacto (MB) y al final de una de baja dureza y alta absorción de energía al impacto (ZATSR). Las demás zonas resultaron pasantes y en el metal base no afectado se conservaron las características de blindaje. La zona del cordón de soldadura, a pesar de la dilución presente, tiene durezas muy por debajo de las del metal base, ofreciendo una pobre tolerancia balística, en tanto que la zona adyacente al cordón, que toma gran parte de la ZATGG, también presenta un pobre desempeño balístico.

Cuadro 7. Resultados de las pruebas de impacto balístico en las placas H en distintas zonas de soldadura

N.º Impacto	Distancia desde el borde del cordón (mms)	Tipo de impacto	Observaciones del impacto en la placa H
1	5 mm	Pasante	Deformación plástica
2	15 mm	Pasante	Deformación plástica
3	5 mm	Pasante	Deformación plástica
4	39 mm	No pasante	Abolladura
5	Centro del cordón	Pasante	Limpio sin deformación
6	37 mm	No pasante	Deformación con descascaramiento en el cráter

Las respuestas a la penetración y choques de los impactos balísticos en las diferentes zonas de soldadura, evaluados en el Cuadro 7 no representan resultados sorprendentes. La resistencia a los impactos balísticos es una característica que los aceros pueden alcanzar a través de una combinación de resistencia a la tracción, buena energía de absorción al impacto y dureza (Mohandas, Madhusudhan y Satish Kumar, 1999), tal como las propiedades que

exhibe el MIL A46100. Las alteraciones microestructurales debidas al ciclo térmico de la soldadura en la ZAT, modifican de acuerdo con la intensidad de los picos estas características, a pesar de que el proceso *Smau* en combinación con algunas características de enfriamiento en las juntas soldadas con bajas entradas de energía, puede llegar a convertirlo en el proceso de soldadura que menos modifique el desempeño balístico de los

Cuadro 8. Tolerancia al servicio de cada zona de soldadura con las condiciones usadas frente a propiedades mecánicas de cada una de ellas y sus características microestructurales

Entrada de energía (J/mm)	Zona de soldadura	Microestructura	Dureza Vickers 500grf/30s	Impacto Charpy V @-40°C	Longitud (mm)	Desempeño balístico
720 (Baja)	Cordón	δ + Fe ₃ C + Bainita	260-320	31,6	0	Pobre
	ZATGG	Martensita no revenida	420-530	3,9	1 a 2	Pobre
	ZATSR	δ + Fe ₃ C (Globular)	250-490	21,6	9 a 11	Intermedio
926 (Alta)	Cordón	δ + Fe ₃ C + Bainita	260-360	28,6	0	Pobre
	ZATGG	Martensita no revenida + Bainita	400-480	2,0	1 a 2	Pobre
	ZATSR	δ + Fe ₃ C (Globular)	250-490	29,8	10 a 11	Intermedio

aceros para blindajes (Madhusudhan, Mohandas y Papukutty, 1998).

Si se contrastan los datos del desempeño balístico del Cuadro 7 con las propiedades obtenidas en las diferentes zonas de soldadura se observarán las relaciones entre las propiedades y el desempeño balístico, lo cual se muestra en el Cuadro 8. A partir del Cuadro 8 se puede inferir que a pesar de que el desempeño balístico de las zonas de soldadura se ve afectado por la entrada de calor, al reducir sus propiedades mecánicas, modificar la microestructura presente en el metal base y desmejorar el desempeño balístico, no hay diferencias significativas en ambos casos.

Al probarse la tolerancia balística del metal base por medio de la placa H en una zona no afectada, se promovió el desnarigamiento del proyectil, la resistencia del mismo a la penetración con respuesta de abolladura en su superficie con algo de deformación plástica, y el rebote con un ángulo igual al de impacto. Entre tanto, en las otras zonas puede explicarse el desempeño a partir de lo que ella misma en propiedades y constitución estructural tenga, por ejemplo, puede verse en el Cuadro 8, que la ZATGG a pesar de tener una dureza relativamente alta en comparación a otras zonas, y el pequeño valor de la energía absorbida al impacto, podría presentar buena resistencia a la penetración solo por los valores de dureza exhibidos, pero su estrecha longitud sumada a la contigüidad de unos alrededores con propiedades menores, hacen que su desempeño balístico sea pobre y se produzca el

desprendimiento no solo de la zona, sino también de fragmentos de las zonas aledañas, fallando por no tener una adecuada región alrededor para propagar la energía absorbida. De manera similar en el cordón de soldadura, la baja dureza a pesar de una alta absorción de energía por medio del impacto, redundó en el traspaso del proyectil limpio. La zona ZATSR, presenta un desempeño intermedio, explicable porque sus alrededores son bastante resistentes para propagar los altos impactos por su gran dureza y resistencia (ZATGG y metal base), y ella misma tiene una buena respuesta al impacto, similar y en algunos casos superior al del metal base.

Resultados similares han sido encontrados en otros estudios (Madhusudhan y Mohandas, 1994), los cuales sugieren que las entradas de calor pueden reducirse, con el ánimo de menguar el tamaño de la ZAT que es función del aporte calórico introducido, dirección en la cual deben apuntarse otras investigaciones, así como la modificación de la geometría de la junta de soldadura, que define los contornos térmicos y las líneas de isotransformación responsables de la geometría y dimensiones de la ZAT en la junta soldada (Andersen, Klucken y Grong, 1993).

Conclusiones y recomendaciones

1. El ciclo térmico inherente a la soldadura modifica las propiedades y características de los aceros para blindajes en la norma MIL A

- 46100 con los diseños de junta estudiados en esta investigación, reduciendo drásticamente su desempeño balístico en las zonas afectadas.
2. La soldabilidad en las condiciones evaluadas en este trabajo, especialmente la susceptibilidad en el agrietamiento en frío, exhibieron un desempeño aceptable en las juntas de soldadura realizadas con el acero MIL A46100 y el electrodo AWS E11018M. Sin embargo, deben ser evaluadas entradas de calor más bajas y otras configuraciones de juntas para mejorar la distribución y forma de la ZAT.
 3. La manipulación y manejo de electrodos de alta resistencia y bajo hidrógeno, es crucial para la obtención de una buena soldabilidad en aceros de alta resistencia y microestructura susceptible.

Referencias

- Ade. F. (1991, September), *Ballistic qualification of armor steel weldments*. Welding journal. pp. 53-58.
- Akselsen, O. M. Ø. Grong, N. Ryum and N. Christensen. (1986, September), *HAZ grain growth mechanisms in welding of low carbon microalloyed steels*. *Acta Metallurgica*, vol. 34, Issue 9, pp. 1807-1815.
- Andersen, I.; A. O. Kluken and Ø. Grong (1993, November), *The origin of microstructure and hardness gradients within As-deposited steel weld metals*. Welding Journal, pp. 63-68.
- ANSI/AWS B4.0-98: "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds" (1997, December), American Welding Society, pp. 62-64.
- Ballistic testing of armor weldments. Test Operations Procedure (TOP) 2-2-711. WU A268445. January 1994.
- Código ASME IX, Sección II parte C: Electrodos y materiales de aporte. Norma AWS A5.5-81.
- David L. Olson; Stephen Liu & Glen R. Edwards. *Role of solidification on HSLA steel weld metal chemistry*. *Proceedings of HSLA weldments*. 1990.
- Gangopadhyay, K. and P. K. Das. (1989, April) *Selection of electrodes for welding of armor plates and procedure for approval*. Indian welding Journal, pp. 483-487.
- Losz, J. M. and K.D. Challenger. HAZ Microstructures in HSLA steel Weldments.
- Madhusudhan Reddy G. and Mohandas T. *Ballistic performance of high strength low-alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 57 (1994), pp. 23-30.
- Madhusudhan Reddy G., Mohandas T. and K. K. Papukutty. *Effect of welding process on the ballistic performance of high strength low alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 74 (1998), pp. 27-35.
- Madhusudhan Reddy G. & Mohandas T. *Ballistic performance of high strength low-alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 57 (1994), pp. 23-30.
- MIL STD 1941 "Ballistic Qualification of armor steel welding".
- Mohandas T., Madhusudhan Reddy G. and B. Satish Kumar. (1999) *Heat-affected zone softening in high strength low-alloy steels*. Journal of materials processing technology 88, pp. 284-294.
- N. Yurioka. *Weldability of modern high strength steels*. First United States-Japan Symposium on Advances in welding metallurgy. Junio 1990, pp. 51-64.
- Sindo Kou. (2003) *Welding Metallurgy* 2nd edition, Cap. 17 pp. 405-407.
- Surian E. S. y L. A. de Vedia. *All-Weld-Metal Design for AWS E10018M, E11018M and E12018M Type Electrodes*. Welding Journal. 217-s-228-s Junio 1999.

Standard NIJ 0108.01: Ballistic Resistant Protective materials. U.S. Department of Justice. National Institute of Justice.

Vercesi, Jose& Estela S. Surian. *The effect of welding parameters on high strength SMAW All-weld metal Part 1: AWS E11018M*. Welding Journal. June 1996. 191s-196s.