

## Soldadura del acero ASTM 615 con diferentes tipos de electrodos

**Gioelkis Espinosa Batista**

[gespinosa@moanickel.com.cu](mailto:gespinosa@moanickel.com.cu)

Moa Nickel S.A.

**Dayanis Alcántara Borges**

[dalcantara@ismm.edu.cu](mailto:dalcantara@ismm.edu.cu)

**Dailén González Martín**

[dgonzalezm@ismm.edu.cu](mailto:dgonzalezm@ismm.edu.cu)

**Elis Efraín Guzmán Romero**

[eeguzman@ismm.edu.cu](mailto:eeguzman@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa

**Resumen:** Se estableció el comportamiento microestructural en barra de acero estructural del tipo ASTM A615 grado 60 G. La unión de las barras se realizó a tope con bisel a 60° con electrodos E 6010 y E 7018, se determinó el comportamiento microestructural, el por ciento de fases y la dureza en las zonas de la unión soldada. Con el E 6010 se obtiene estructuras del tipo ferrita acicular y de perlita, con un 38,3 % y 21,3 % respectivamente, con el E 7018 la ferrita acicular es de 31,5 % y de 10,33 % de martensita, con ninguno de los aportes se determinó la presencia de grietas. En el barrido de dureza realizado en las diferentes zonas, para el primero desde 230 HV incrementa hasta 383 HV en la ZAC, con un descenso de 285 HV en la ZF, para el segundo en la ZAC es de 224 HV y de 190 HV en la ZF.

**Palabras claves:** acero estructural; microconstituyentes; electrodos; microestructuras; dureza.

## Welding steel astm 615 with different types of electrodes

**Abstract:** The microstructural behavior of a structural steel bar of the type ASTM A615 grade 60 G was established. The union of the bars was made butt with bevel at 60° with electrodes E 6010 and E 7018, the microstructural behavior was determined, the percentage of phases and the hardness in the areas of the welded joint. With E 6010 structures of the acicular ferrite and pearlite type are obtained, with 38.3% and 21.3% respectively, with E 7018 acicular ferrite is 31.5% and 10.33% martensite, with none of the contributions the presence of cracks was determined. In the hardness sweep carried out in the different zones, for the first from 230 HV it increases to 383 HV in the ZAC, with a decrease of 285 HV in the ZF, for the second in the ZAC it is 224 HV and 190 HV in the ZF.

**Keywords:** structural steel; microconstituents; electrodes; microstructures; hardness.

## Introducción

Dentro de los procesos de unión de las estructuras se encuentra la soldadura por fusión, siendo la soldadura manual por arco eléctrico una de la más difundida, sin embargo, la introducción de alta densidad de calor en el acero provoca cambios estructurales significativos, además si a esto se le añade que, en la mayoría de los casos, al emplear metal de aporte, entonces existen diferentes cambios microestructurales en la zona fundida y en el metal base.

Ha sido referido por Cely *et al.* (2018) que, el acero estructural es el material más usado para construcción de edificaciones en el mundo. Es una aleación de hierro (mínimo 98 %), con contenidos de carbono menores a 1 % y pequeñas cantidades de minerales como manganeso para mejorar su resistencia, fósforo, azufre, sílice y vanadio ocasionalmente, que garantiza su soldabilidad y resistencia a las condiciones ambientales. Entre sus ventajas está la resistencia a tensión, a la compresión y el costo razonable. Según la AWS D1.1/D1.1M (2002), su empleo es como material estructural en perfiles usados en diferentes estructuras y en varillas empleadas como refuerzo en hormigón armado.

La selección de los parámetros de soldadura puede tener una influencia sobre las propiedades mecánicas del ensamble resultante (Reyes-Carcasés *et al.*, 2018). Esto se debe a que, normalmente dichos parámetros controlan la entrada de calor en la junta y, como tal, pueden controlar la microestructura resultante. Diferentes aspectos del procedimiento influyen en la microestructura y en las propiedades de la junta, tipo y densidad de corriente, tensión, gas de respaldo, precalentamiento, temperatura entre pases, velocidad y metal de aporte, diseño y preparación de la junta, espesor del metal base, estabilidad del arco, carbono equivalente y la cantidad de cordones aplicados.

En esta industria, el acero corrugado ASTM A615 Grado 60 (NTP.341.031 G60) es utilizado específicamente para las estructuras de concreto armado, el cual se ha fabricado para trabajar conjuntamente por su contextura, propiedades físicas, mecánicas y composición química (Ramírez-Soto *et al.*, 2019). En Cuba se les utiliza a gran escala en aquellas construcciones donde trabaja en acero puro, siendo este tipo de estructuras como armaduras de grandes vigas o tijerales abovedados y triangulares de techos o coberturas de coliseos, campos deportivos.

El proceso de soldadura de barras de refuerzo se realiza en el lugar donde se desarrolla la obra, con supervisión del proceso, pero en ocasiones con una baja calificación de los soldadores. Los problemas de poca soldabilidad generalmente aparecen en los aceros con un contenido de carbono mayor que 0,45 %, ya que en este caso se requiere generalmente un precalentamiento o un postcalentado para reducir los efectos provocados por el calor en las propiedades mecánicas (Rodríguez y Rodríguez, 2006) con lo cual en estas barras se minimizarían las limitaciones para lograr una calidad en la soldadura.

Los elementos del acero corrugado: carbono, manganeso y silicio, intervienen de formas diferentes según sus reacciones en el metal fundido o en el metal de base. La influencia de las impurezas del acero, como azufre, fósforo y nitrógeno, al ser baja, no tendrá acción directa sobre la soldabilidad del metal de base, en la zona fundida, y se minimizará el fenómeno de la desoxidación, ya sea por la llama reductora oxiacetilénica o por los elementos reductores del revestimiento de los electrodos, y por los presentes en el acero utilizado como metal de aportación (Islam, Buijk & Rais-Rohani, 2014).

Refieren Melgarejo, Ramírez & Aperador (2013) que el acero microaleado de refuerzo puede producir juntas soldadas de alto desempeño y gran seguridad ya que, a diferencia de otros, es menos susceptible de modificar sus propiedades mecánicas por las altas temperaturas generadas en los procesos de soldadura. Esto se debe a que no posee tratamiento térmico ni una microestructura heterogénea en la sección transversal. Sin embargo, como cualquier otra soldadura que está sometida a cargas, debe seguir lo estipulado en el código de soldadura aplicable.

El trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades físico-metalúrgica del acero ASTM 615 soldado por arco eléctrico y diferentes tipos de electrodos.

## **Desarrollo experimental**

### **Análisis de la composición química**

En la tabla 1 se muestra la composición química del acero ASTM A-615 grado 60 G. Se obtuvo en un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 1. Composición química del acero estructural, % en masa

Grado	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
A-615	0,42	1,03	0,04	0,04	0,21	0,09	0,11	0,31	0,01	Resto

En los aceros estructurales, los elementos químicos tienen su influencia en la soldabilidad del mismo. En el caso del ASTM A-615 se considera con soldabilidad regular o limitada. El contenido de carbono (0,42 %) aumenta su resistencia mecánica, pero disminuyen su ductilidad, por otro lado, el manganeso, aunque forma carburos en la soldadura, se utiliza como desoxidante para impedir la reacción entre el oxígeno y el carbono en la zona de fusión, y evitar así la formación de poros (Ramírez-Soto *et al.*, 2019).

### Preparación de la unión para la soldadura de las barras

Para evaluar la soldabilidad del acero ASTM A-615 G-60 con los electrodos seleccionados, los procedimientos de soldadura se realizaron de acuerdo a los establecidos por el código ANSI/AWS D1.4-05 (AWS, 2005), quien establece además el tipo de junta. Se seleccionó el de borde en "V" con ángulo de 60° (Figura 1) en correspondencia con el diámetro de la barra, la posición de soldadura es 1 G y la distancia entre bordes inferiores de los miembros de la probeta serán de 2 a 3 milímetros.



Figura 1. Soldadura con borde o bisel en "V".

El biselado realizado está establecido por las normas AWS Código D1.1. (2010). Se prepararon tres probetas con tipo de ranura en "V", a las que se les eliminó de la superficie el óxido, escamas, aceite, grasa y partículas extrañas. Las dimensiones de las barras para la soldadura son de un largo de 150 mm y con diámetro de 3/4" (19,5 mm).

Antes de soldarla se procedió a puntear las barras con un ángulo de 180°, para evitar alabeo y distorsiones, la selección del electrodo se basa en buscar un material de aporte que, en dependencia de la deposición, también pueda emplearse para atenuar los problemas que puedan ocurrir en el cordón de soldadura por las condiciones de la unión. La preparación de las muestras se realizó según Norma ASTM E - 92.

La selección de material aporte se hace conforme al proceso o procesos de soldadura, especificaciones de la AWS para materiales de aporte, designación por proceso y material, almacenamiento, cuidados especiales y recomendaciones técnicas del fabricante y proveedor a través de catálogos. Se seleccionó los electrodos E 6010 y E 7018 según AWS, el primero con revestimiento celulósico y el otro básico de bajo hidrogeno. En la tabla 2 se muestra la composición química del depósito de los mismos.

Tabla 2. Composición química del depósito de los electrodos, % en masa

Electrodo	C	Mn	Si	S	P
E 6010	0,12	0,46	0,23	0,01	0,020
E 7018	0,05	1,03	0,60	0,020	0,020

El E 6010 es un electrodo celulósico con silicato de sodio y con características de penetración mejoradas y propiedades mecánicas, donde sobresale el % de alargamiento, especialmente recomendado para todas posiciones en pasos múltiples o sencillos. Utilizable en aceros al bajo y mediano carbono y placas galvanizadas. Las características del E 7018 (AWS A 5.1), es recomendado para la soldadura de los aceros de bajo y medio carbono hasta 0,45 %; al carbono-manganeso, de baja aleación, con alto contenido de azufre y fósforo considerados difíciles de soldar, fundidos o de granos finos.

### **Corte de las muestras**

Las barras se cortaron con una pulidora manual, se seccionaron a una distancia de 50 mm, como se observa en la figura 2, de esta forma se garantiza el posterior proceso para la preparación metalográfica. Las muestras B1 y B2 se corresponden con las muestras patrón del acero estructural y las B3 y B4 obtenidas después de realizado el proceso de soldadura.

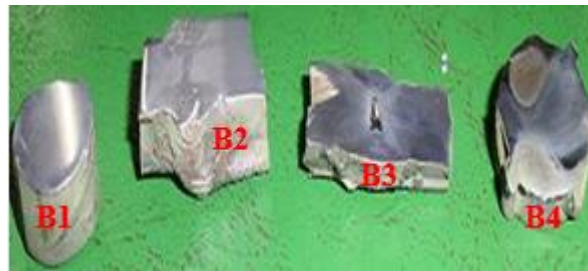


Figura 2. Corte transversal de las muestras.

El corte transversal se realizó de forma tal que permitiera su fácil manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico, la longitud fue de 15 mm (Norma ASTM E - 92). Se utilizó una fresadora vertical, en la que, tras sujetar la muestra con las mordazas, se procedió a seccionar la pieza con abundante refrigeración para evitar el calentamiento excesivo que pudiera transformar la estructura en las zonas de posterior análisis. Los regímenes de corte seleccionados fueron  $n = 150$  r/min y  $s = 25$  mm/rev.

Se emplearon papeles abrasivos No 400, 600 y 800 (ASTM E 3 - 95). Las lijas fueron colocadas sobre una placa de vidrio, se cambió el sentido del lijado a  $90^\circ$  al pasar de un pliegue a otro para eliminar la capa de material distorsionado. En la figura 3 se muestra las probetas pulidas.

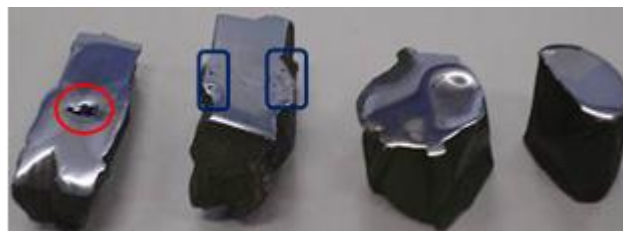


Figura 3. Muestras pulidas.

Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso y como sustancia abrasiva se empleó el óxido de cromo. Para el ataque químico se empleó nital al 2 %, mezcla de 5 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y 100 mL de alcohol etanol, con un tiempo entre 3 y 5 s.

Luego de este proceso, macroscópicamente se pudo determinar la presencia de defectos como falta de penetración o penetración incompleta (círculo rojo) y poros (rectángulo azul), la primera es considerada superficial, y ocurre debido a que en las uniones en V estas tienen un comportamiento visible por la cara posterior, donde la raíz de la soldadura no queda adecuadamente rellena con material de aporte y queda un vacío. Puede producirse debido a una separación de la raíz, un electrodo grueso,

una corriente de soldadura insuficiente, velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. Este es un defecto no aceptable y requiere de una eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso.

La porosidad obtenida es del tipo esférica aislada la cual se caracteriza por una bolsa de gas formada en esta forma, esta esfera es producida por alteraciones del arco eléctrico, variación del amperaje/velocidad de soldadura, oxidación en el revestimiento del electrodo, húmedo y/u oxidado, reportado además por Cely *et al.* (2018).

En la medición de la microdureza se siguieron los procedimientos de la norma NC 10 - 56: 86, se utilizó un microdurómetro modelo PMT - 3 No 168. Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, el desbaste y el pulido, se efectuaron tres mediciones en la sección longitudinal de la barra, las que se promediaron, la carga aplicada fue de 0,49 N en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de  $136^\circ$  según la ASTM E 92 - 82.

### Microestructura patrón del acero ASTM A-615

La selección de la muestra patrón del acero ASTM A-615 G 60 se obtuvo en la zona del metal base, lo más alejado donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura y que permitiera determinar luego de la unión, posibles cambios ocurridos en la zona fundida (ZF), en la afectada por el calor (ZAC) y en la interfase del cordón. La figura 4 se corresponde con la estructura metalográfica del acero.



Figura 4. Estructura del acero estructural ASTM A-615 grado 60 G.

La muestra se corresponde con la de un acero laminado con enfriamiento al aire, clasificado como hipoeutectoide, que al presentar un contenido menor de 0,8 % C,



tiene como constituyente matriz la ferrita (granos claros) y como disperso la perlita (granos oscuros). Se observa la presencia de precipitados, presumiblemente de sulfuro de manganeso (Mns).

El porcentaje de microconstituyentes se determinó en un microscopio reflexivo que funciona básicamente por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. Se determinó las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos, de los cuales se elaboró un reporte técnico con estas características.

## Resultados y discusión

### Análisis microestructural para el electrodo E 6010

El examen microestructural de la ZAC del metal base de la junta símil para el electrodo E 6010 muestra distintas regiones que varían debido al ciclo térmico local experimentado. La figura 5a se corresponde con la ZAC y la 5b con la zona fundida.

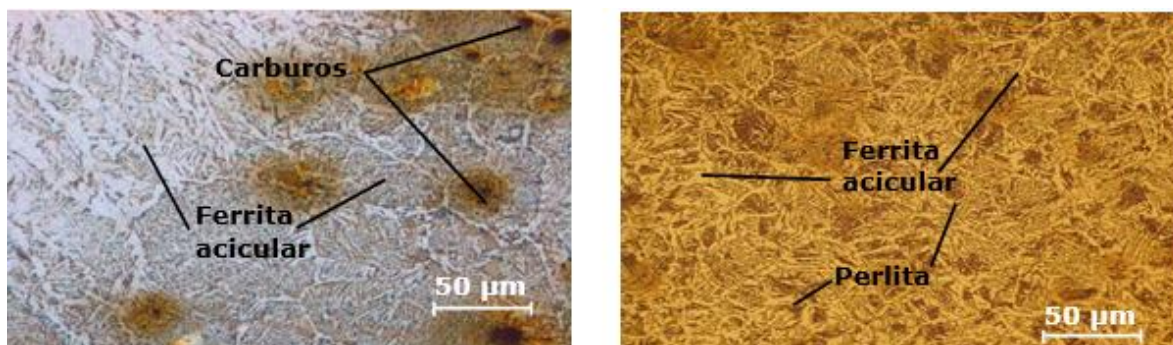


Figura 5. a) Zona afectada por el calor. b) Zona fundida.

Con este electrodo se observa que, en la zona afectada por el calor existe una disminución en el tamaño de grano y la formación de una fase de ferrita acicular masiva, con el surgimiento de carburo globular fino, así como inclusiones del tipo óxido. La fase predominante es la ferrita mientras la perlita se encuentra en pequeñas cantidades de forma intergranular. En la zona fundida (metal de aporte), la distribución de las fases es de granos que contienen estructuras de ferrita-perlita. La ferrita es del tipo acicular y se encuentra en el límite del grano.

La reducción en tenacidad de la ZAC de la junta está relacionada con el contenido de carbono, que por el efecto del aumento deriva en la reducción de la misma. La existencia de otros componentes como el manganeso, el cual es proclive, luego del

ciclo térmico impuesto, la formación de algún tipo de carburo, por otro lado, el cobre es un elemento que tiende a la formación de inclusiones en las uniones soldadas, según lo reportan Zavaleta *et al.* (2015).

### Comportamiento microestructural para el electrodo E 7018

Los resultados obtenidos en las diferentes zonas con el electrodo E 7018 se muestran en la figura 6. La 6a se corresponde con la zona fundida y la 6b con la afectada por el calor.

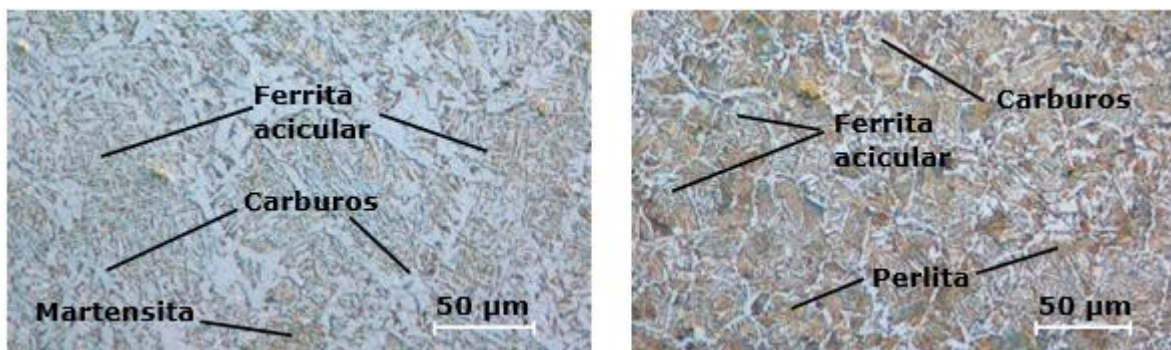


Figura 6 a) Zona fundida. b) Zona afectada por el calor.

En la zona fundida se observa la formación de una estructura de ferrita acicular masiva, carburo globular fino, así como de pequeñas bandas de martensita residual y de ferrita acicular. La perlita presente en la estructura nuclea intergranularmente entre los granos de ferrita. En la zona afectada por el calor, figura 6b, existe una matriz de ferrita y perlita, así como la presencia de carburos en bordes de granos, lo cual puede indicar fragilidad en esta zona del cordón, en la parte superior de la estructura se aprecia un defecto como las inclusiones del tipo sulfuro.

Un acero ferrítico que es completamente austenitizado con el calor con una zona afectada por el calor (ZAC) durante la soldadura luego de austenitizada se transforma en ferrita, perlita, bainita, martensita o su mezcla en dependencia de la velocidad de enfriamiento después del proceso. Los granos austeníticos son más gruesos y más endurecidos en la misma cerca del límite de fusión, criterio confirmado por Waheed, Shakoor & Azam (2015).

### Microconstituyentes en las estructuras

En la figura 7 se muestra los resultados obtenidos con el electrodo E 6010. La 7a y 7c se corresponden con las zonas de soldadura y la 7b y 7d con los microconstituyentes.

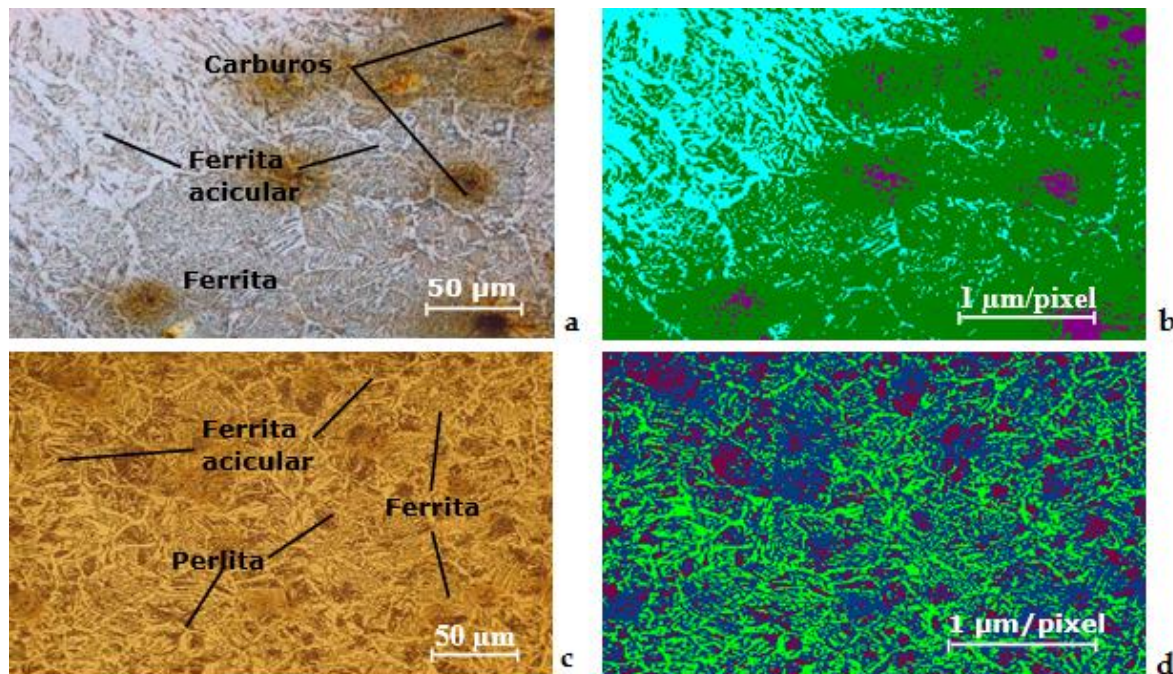


Figura 7. a) Zona afectada por el calor. b) Microconstituyentes (ZAC). c) Zona fundida. d) Microconstituyentes (ZF).

Los resultados de cada uno de las fases, tanto de la zona afectada por el calor, como en la fundida, han quedado caracterizado por un color diferente que la distingue una de la otra. La ferrita acicular en la zona fundida se incrementó en un 38,3 % con respecto a la ZAC, por otro lado, existe una diferencia de un 40,2 % de la ferrita en la ZAC, con relación a la ZAC y la perlita representa un 21,3 % referente a la ZF. Estas variaciones están asociadas al ciclo térmico de soldadura, donde el flujo de calor afecta más la zona fundida que la afectada por el calor.

### Microconstituyentes para el E 7018

En la figura 8 se muestran los resultados. La 8a y 8c se corresponden con las zonas de soldadura y la 8b y 8d con los microconstituyentes.

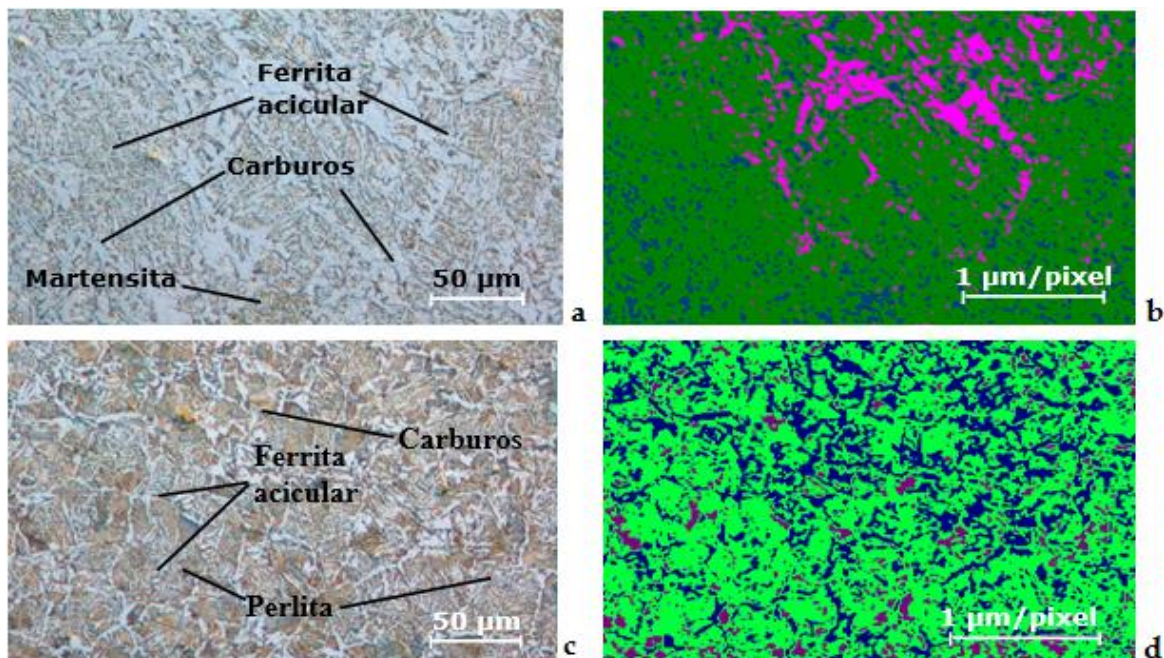


Figura 8. a) Zona fundida. b) Microconstituyentes (ZF). c) Zona afectada por el calor. d) Microconstituyentes (ZAC).

Para el electrodo E 7018, la distribución de las fases, en la zona fundida, la ferrita acicular representa un 31,5 % con relación a la ZAC, los carburos un 63,8 %. Sin embargo, con este aporte, existe un 10,33 % de martensita en la zona fundida, en relación a un 66,11 % de perlita en la ZAC, fase que incrementa la dureza. Lo anterior está asociado a que, el tamaño de los granos se han afectado producto del flujo de calor introducido por el ciclo térmico.

### Comportamiento de la dureza

El barrido de durezas se realizó en las probetas en una línea a 1,6 mm de la superficie de la cara de la soldadura, se consideró la del material base, el de aporte y las zonas afectadas por el calor. En la figura 9 se muestra los resultados obtenidos en las zonas de la unión soldada.

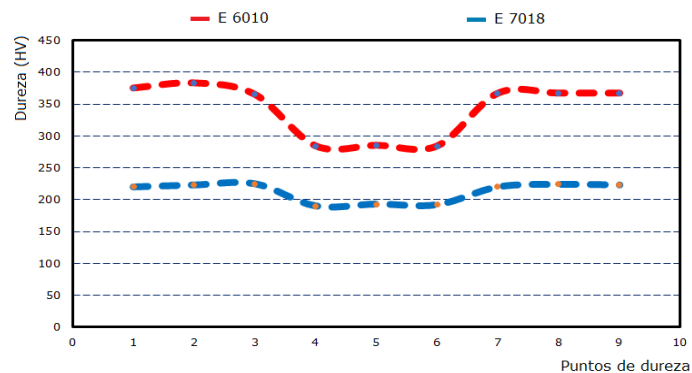


Figura 9. Resultados del barrido de durezas en las diferentes zonas.

Se observa que, para una dureza inicial de 230 HV aproximadamente, con el electrodo E 6010 (rojo), en la zona afectada por el calor, esta se incrementa hasta 383 HV y luego en la fundida desciende hasta un valor de 285 HV. Con el E 7018 (azul), el comportamiento es análogo, pero con diferentes valores, en la afectada por el calor de 224 HV y de 190 HV en la fundida.

La fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si la dureza es menor de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser permitidas. Para el E 6010, la unión superó los 350 HV, por lo que se presume que no existirán problemas de fisuración o la presencia de zonas frágiles, tales como la martensita.

En ambos electrodos se determinó que, en la zona fundida, la dureza no excede los 350 HV, valores favorables para las condiciones de servicio, sin embargo, se puede apreciar que con el depósito del electrodo E 7018, existe una caída de dureza e incluso por debajo de la dureza del material base. La ocurrencia de este fenómeno radica en que el proceso se realiza en multipasadas obteniéndose un cordón de mayor dimensión, esto se convierte en un tratamiento térmico de alivio de tensiones, las propiedades como resistencia a la tracción aumenta debido a la penetración, pero la dureza disminuye, reportado por Kursun (2011).

## Conclusiones

Al realizar la unión soldada del acero estructural ASTM A615 con electrodos E 6010 y E 7018, con el primero se obtiene estructuras del tipo ferrita acicular y de carburo globular fino, en el segundo ferrita acicular, carburo y bandas de martensita, pero sin presencia de grietas.

Al determinar las fases, en el electrodo E 6010 en la zona fundida existe mayor presencia de ferrita acicular (38,3 %) con respecto al E 7018 en esta misma zona (31,5 %), de igual manera lo hace la perlita (21,3 %) para el primero y de 66,11 % en el segundo, ambos en la ZAC, variaciones asociadas al ciclo térmico de soldadura, donde el flujo de calor afecta más la zona fundida que la afectada por el calor.

En el barrido de dureza realizado en las diferentes zonas para ambos electrodos se determinó que, para el E 6010 desde 230 HV incrementa hasta 383 HV en la ZAC, con un descenso de 285 HV en la ZF, para el E 7018 en la ZAC es de 224 HV y de 190 HV en la ZF.

### Referencias bibliográficas

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. 2002. AWS 01 Committee on structural welding. structural welding code steel. AWS D1.1/D1.1M: 2002. 18 ed. 550 N.W. LeJeune Road, Miami.

AWS D1.4 / D1.4M. 2005. Structural Welding Code-Reinforcing Steel.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS-D1.1/D1.1. 2010. Structural Welding Code-Steel.

CELY, M.; SOTOMAYOR, V.; MONAR, W. & CASTRO, P. 2018. Identificación de defectos en soldaduras de acero estructural ASTM A36 mediante ensayos no destructivos según el código AWS D1.1. *Revista Puce* 106(3): 81-109.

ISLAM, M.; BUIJK, A. & RAIS-ROHANI, M. 2014. Simulation based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design* 84: 54-64.

KURSUN, T. 2011. Effect of the GMAW and the GMAW-P welding processes on microstructure, hardness, tensile and impact strength of AISI 1030 steel joints fabricated by ASP316L austenitic stainless-steel filler metal. *Archivo de metalurgia y materiales* 56(8): 101-105.

MELGAREJO, M.; RAMÍREZ, C. & APERADOR, W. 2013. Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW. *INGE CUC* 9(2): 75-82.

- RAMÍREZ-SOTO, J.; PÉREZ-QUIROZ, J.; SALGADO-LÓPEZ, J.; MARTÍNEZ-MADRID, M.; PÉREZ-LÓPEZ, T.; RENDÓN-BELMONTE, M. & ÁLVAREZ-ALFARO, E. 2019. Comportamiento electroquímico de uniones disimiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantequillado con Inconel 182 y sin enmantequillado. *Revista ALCONPAT*.9(2): 167-18.
- REYES-CARCASÉS, D.; FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; ALCÁNTARA-BORGES, D. & RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I. 2018. Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025. *Minería y Geología* 34(1): 108-121.
- RODRÍGUEZ, M. Y RODRÍGUEZ, J. 2006. Se debe evitar la soldadura de barras de refuerzo en estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas de México. *Revista de Ingeniería Sísmica* 75(7): 69-94.
- WAHEED, R.; SHAKOOR, A. & AZAM, A. 2015. Welding distortion control in thin metal plates by altering heat input through weld parameters. *Technical Journal* 20(II): 171-7.
- ZAVALETA, N.; VERA, J.; DE CICCO, H. & DANON, A. 2015. Microstructural study of welded joints in a high temperature martensitic-ferritic ASTM A335 P91 steel. Intern. Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM-CONAMET 1140-1149.