



8° CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA
Cusco, 23 al 25 de Octubre del 2007

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO
ASTM A 706 DE 3/4", EN JUNTA A TOPE**

MSc Ing. Roberto Lazarte Gamero, Ing. Álvaro Sotero Canales
rlazart@puce.edu.pe
Pontificia Universidad Católica del Perú
Sección Ingeniería Mecánica – Área de Materiales
Av. Universitaria. 1801, Lima 32 - Perú

RESUMEN

En la preparación del concreto reforzado para construcción es muy frecuente el uso de barras corrugadas de acero ASTM A 615. Sin embargo, en la norma técnica de este producto no se establece ninguna consideración para una posible unión por soldadura de estas barras. Una opción para enfrentar esta situación es el empleo de barras corrugadas de acero ASTM A 706. Esto es posible porque la norma técnica de estas barras establece límites de composición química y de carbono equivalente con la finalidad de mejorar su soldabilidad .

Dado que en el Perú se está iniciando la fabricación y uso de estas nuevas barras, el presente estudio intenta establecer procedimientos de soldadura debidamente estudiados y calificados con la finalidad de proporcionar al sector de la construcción una herramienta adecuada para la unión por soldadura de las barras de acero ASTM A 706.

El estudio se ha realizado teniendo como referencia las recomendaciones y exigencias de los Códigos ANSI/AWS D1.4, y ANSI/AWS D1.1, tal como lo sugiere la norma técnica correspondiente. Además se han utilizado otros procedimientos de análisis que permitan garantizar un adecuado conocimiento de la soldabilidad de las barras corrugadas de acero ASTM A 706 para su uso en concreto reforzado.

PALABRAS CLAVE: Soldabilidad, Acero ASTM A 706 , concreto reforzado, 3/4"

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la práctica de soldadura para barras corrugadas que se emplea en nuestro país, los dos tipos de junta más utilizadas son la junta indirecta a tope y la junta directa a tope. Este tipo de juntas se encuentran estandarizadas en diversos códigos internacionales de soldadura. Por esta razón, para el desarrollo del presente trabajo, se ha escogido la junta directa a tope en las posiciones 1G y 3G.

Dos aspectos importantes a tener en cuenta para elaborar un procedimiento de soldadura son la composición química y las propiedades mecánicas del material a soldar. La Tabla 1 nos muestra la composición química permisible para el acero ASTM A 706

Tabla 1: Composición química del acero ASTM A 706

Elemento	A 706
% carbono	0.33 máx.
% manganeso	1.56 máx.
% fósforo	0.043 máx.
% azufre	0.053 máx.
% silicio	0.55 máx.

El carbono equivalente (C.E.) de las barras de acero ASTM A 706 no debe ser mayor a 0.55, calculado de acuerdo con la Ec (1).

$$\text{C.E.} = \%C + \%Mn/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10. \quad (1)$$

La Tabla 2 nos presenta las propiedades mecánicas de resistencia y ductilidad para este acero

Tabla 2: Propiedades mecánicas según ASTM

Propiedad	A 706
σ_f , mín. (MPa)	550
σ_t (MPa)	420 – 540
δ_r , mín. en 8" (%)	14

La resistencia máxima no debe ser menor a 1.25 veces el límite de fluencia (valores encontrados en el ensayo de tracción).

Para la realización del presente trabajo se escogieron barras corrugadas de acero ASTM A 706 de 3/4". El proceso de soldadura utilizado es el de arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW), con junta directa a tope en posiciones 1G y 3G.

2.- Material base

La barra corrugada de 3/4", utilizada para el presente trabajo, corresponde a la designación de barras corrugadas de acero de baja aleación para concreto reforzado. Las tablas 3 y 4 nos muestran las características de composición y las propiedades mecánicas de la barra adquirida para este estudio.

Tabla 3: Composición química de la barra de 3/4" ASTM A 706

ELEMENTO	A 706	Barra de 3/4"
% carbono	0.33 máx.	0.30
% manganeso	1.56 máx.	1.17
% fósforo	0.043 máx.	0.025
% azufre	0.053 máx.	0.024

% silicio	0.55 máx.	0.26
% cobre	No especifica	0.14

La composición química de la barra de 3/4" cumple con las exigencias de ASTM A 706. El carbono equivalente, calculado de acuerdo con la Ec. (1) nos da un valor de 0.50, el mismo que es inferior al valor máximo permitido de 0.55.

Tabla 4: Propiedades mecánicas de la barra de 3/4" ASTM A 706

PROPIEDAD	A 706	Barra de 3/4"
σ_f , mín. (MPa)	550	641
σ_t (MPa)	420 – 540 MPa	439
δ_r , mín. en 8" (%)	14	17.8

Las propiedades de tracción de la barra de 3/4" cumplen con las exigencias de ASTM A 706. La resistencia máxima es 1.46 veces el límite de fluencia, lo que es superior al mínimo exigido de 1.25 veces.

3.- Procedimientos de soldadura

De acuerdo con las especificaciones de los códigos ANSI/AWS D1.4-98 y AWS D1.1-04, y de las recomendaciones del fabricante del material de aporte E8018-C3, se han elaborados los procedimientos de soldadura para junta directa a tope en posiciones 1G y 3G. Estas posiciones se han escogido en base a recomendaciones de ingenieros civiles del Laboratorio de Estructuras - PUCP. En la Fig. 1 y en la Fig. 2 se muestra la disposición de los elementos a unir para las posiciones 1G y 3G

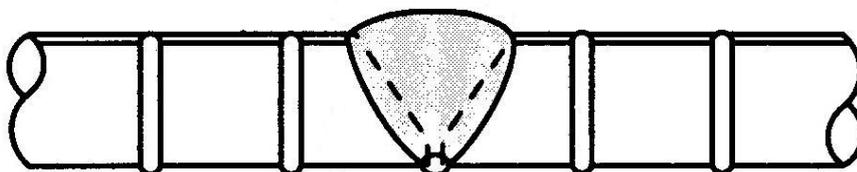


Fig.1: Disposición de la junta directa a tope en posición 1G



Fig.2: Disposición de la junta directa a tope en posición 3G

3.1 Procedimiento de soldadura para la junta en posición 1G

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-98, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	ASTM A706 Gr. 60
Tamaño de Barra	N° 6 (Ø 3/4")
Tipo de Revestimiento de la Barra	----
Material de Respaldo	----
Tamaño de Respaldo	----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.50
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Progresión Vertical	----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación de Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	----
Rango del flujo de gas	----
Pase simple o múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	RECTA Y MULTIPASE (Ver Foto)
Arco simple o múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO) SOLDADURA DE RESPALDO (BACK GOUGE) - Posición de Soldadura 1G.
Tratamiento de la Raíz	
Pre calentamiento y Temperatura de Interpase	----
Limpieza	Con escobilla metálica: Inicial e Interpases. Con Esmeril: Previo a Soldadura de Respaldo (Back Gouge)

PASE N°	DIÁMETRO DE ELECTRODO	PARÁMETROS DE SOLDADURA		VELOCIDAD** (cm/min)	CALOR DE APORTE** (kJ/cm)
		AMPERIOS	VOLTIOS		
1-n	1/8"	115-125	20-25	20 - 30	4.0 - 6.0
Soldadura de Respaldo*	1/8"	115-130	20-25	20 - 25	5.0 - 6.2

* : Posición de Soldadura 1G. Puede ser de 2 pases.

** : Valores estimados.

En la Fig. 3 se muestra la disposición de los elementos a soldar, la técnica y secuencia utilizadas para esta posición.

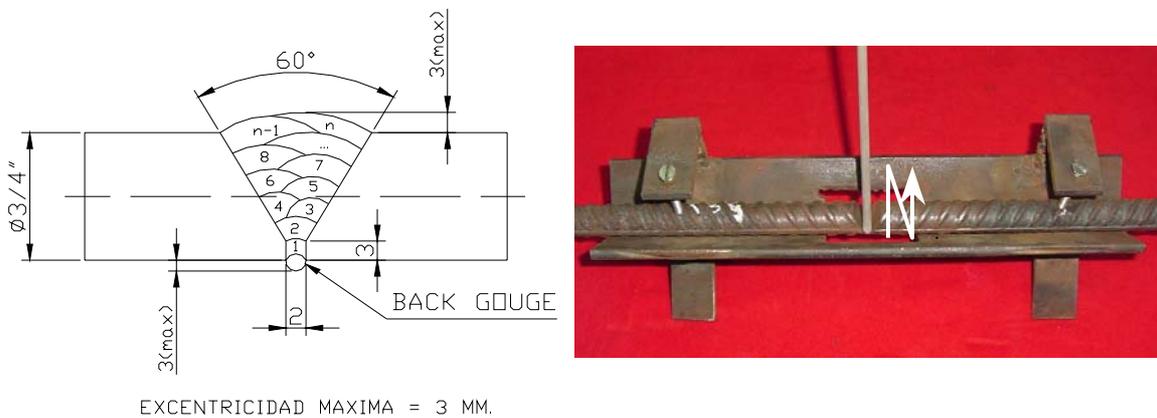


Fig.3: Detalle geométrico y técnica de soldeo para la posición 1G

3.2 Procedimiento de soldadura para la junta en posición 3G

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-98, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	ASTM A706 Gr. 60
Tamaño de Barra	N° 6 (Ø 3/4")
Tipo de Revestimiento de la Barra	----
Material de Respaldo	----
Tamaño de Respaldo	----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.50
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	2G
Progresión Vertical	----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación de Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	----
Rango del flujo de gas	----
Pase simple o múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	RECTA Y MULTIPASE (Ver foto)
Arco simple o múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Tratamiento de la Raíz	SOLDADURA DE RESPALDO (BACK GOUGE)
Precalentamiento y Temperatura de Interpase	----
Limpieza	Con escobilla metálica (Inicial e Interpases) Con Esmeril: Previo a Soldadura de Respaldo (Back Gouge)

PASE N°	DIÁMETRO DE ELECTRODO	PARÁMETROS DE SOLDADURA		VELOCIDAD** (cm/min)	CALOR DE APORTE** (kJ/cm)
		AMPERIOS	VOLTIOS		
1-n	1/8"	120-130	20-25	20 – 30	4.2 – 6.3
Soldadura de Respaldo*	1/8"	120-130	20-25	23 – 26	4.8 – 5.5

* : Puede ser de 2 pases. ** : Valores estimados.

En la Fig. 4 se muestra la disposición de los elementos a soldar, la técnica y secuencia utilizadas para esta posición.

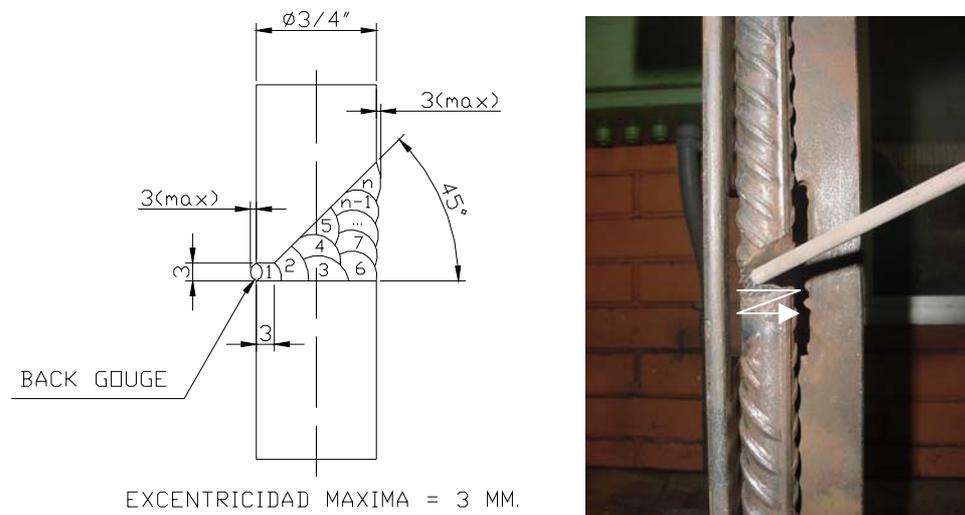


Fig. 4: Detalle geométrico y técnica de soldeo para la posición 1G

4. Evaluación de procedimientos de soldadura

La evaluación de los dos procedimientos de soldadura se han realizado a través de ensayos requeridos por ANSI/AWS D1.4 – 98: ensayo visual, tracción y macroataque. Adicionalmente a estos ensayos se han efectuado las siguientes pruebas: dureza, análisis metalográfico y partículas magnéticas.

4.1 Ensayo visual:

El ensayo visual realizado en los especímenes soldados, para las posiciones 1G y 3G, no detectó presencia de discontinuidades que afecten el cumplimiento de las exigencias de ANSI/AWS D1.4-98 y AWS D1.1-04.

4.2 Ensayo de tracción:

Se realizaron dos ensayos de tracción por cada posición. En la posición 1G, los valores de **resistencia máxima** obtenidos fueron de **666 y 665 MPa**. Para la posición 3G se obtuvo valores de **644 y 645 MPa**. Los cuatro valores encontrados cumplen con el requerimiento mínimo de **525 MPa** (1.25 x 420 MPa, donde 420 corresponde al mínimo valor del límite de fluencia especificado para el acero ASTM A 706.)

4.3 Macroataque:

Se realizaron dos ensayos de macroataque por cada posición. Los resultados para la **posición 1G**, probetas 13 y 16, se muestran en la Tabla 5

Tabla 5: Resultado del ensayo de macroataque en muestras de la junta 1G

N° Probeta	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
13	IEA	MA	0.3 mm x 1 mm	No contemplado	-----
	P	MA	0.2 mm	Σ max = 10 mm en 25 mm *	Conforme
	P	MA	0.1 mm		
16	P	MA (cerca de LF)	0.2 mm	Σ max = 10 mm en 25 mm *	Conforme
	P	MA	0.4 mm		

*: Utilizando el criterio de calificación de soldaduras de bisel acampanadas y de filete

Leyenda:

IEA: Inclusiones transversales de Escoria Aislada P: Porosidad
 MA: Metal de Aporte LF: Línea de Fusión

La Fig. 5 muestra las secciones transversales de las probetas evaluadas mediante macroataque para la posición 1G



Fig. 5: Macrografía de las dos muestras evaluadas para posición 1G

Los resultados del ensayo de macroataque para la **posición 3G**, probetas 32 y 35 se muestran en la Tabla 6

Tabla 6: Resultado del ensayo de macroataque en muestras de la Junta 3G

N° Probeta	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
32	IEA	MA	0.7 x 0.3 mm	No contemplado	----
	P	MA	0.3 mm	Σ max = 10 mm en 25 mm *	CONFORME
	P	MA	1.0 mm		
	PA	MA	3.9 mm		
	IEA	MA	0.6 x 0.2 mm	No contemplado	----
	IEA	LF (Barra Superior)	0.2 x 0.5 mm	No contemplado	----
35	IEA	MA	1.4 x 0.4 mm	No contemplado	----
	IEA	MA	0.6 x 0.1 mm	No contemplado	----
	IEA	MA	1.0 x 0.4 mm	No contemplado	----

*: Utilizando el criterio de calificación de soldaduras de bisel acampanadas y de filete.

Legenda:

IEA: Inclusión de Escoria Aislada P: Porosidad PA: Porosidad Agrupada
 MA: Metal de Aporte LF: Línea de Fusión

La Fig. 6 muestra las secciones transversales de las probetas evaluadas mediante macroataque para la posición 3G

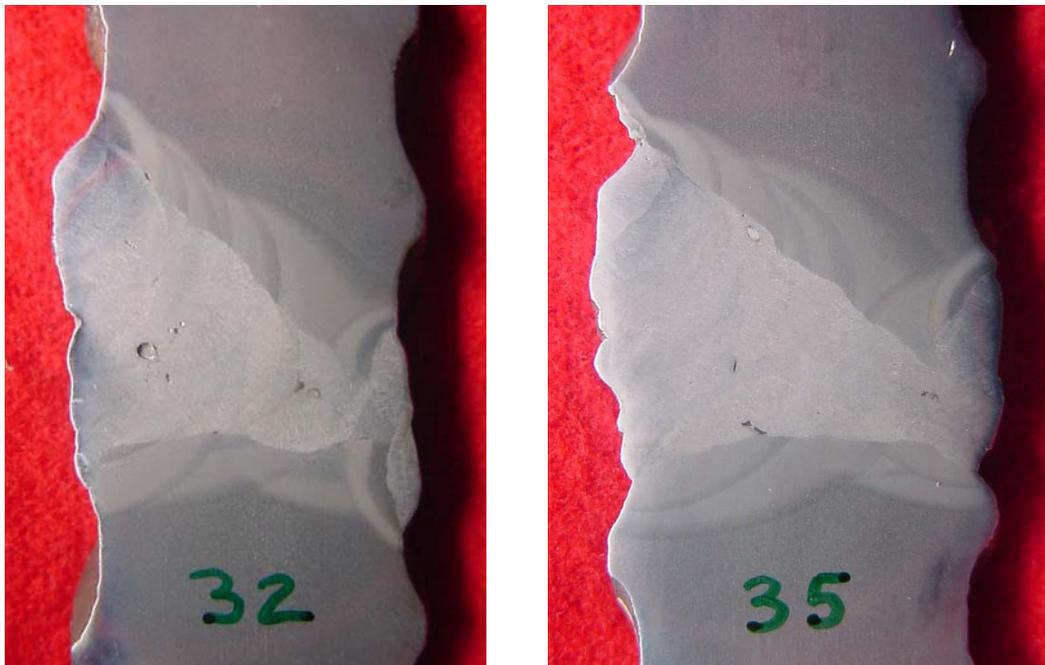


Fig. 6: Macrografía de las dos muestras evaluadas para posición 3G

Los resultados obtenidos en el ensayo de macroataque, para las posiciones 1G y 3G, cumplen con los requerimientos correspondientes para este tipo de juntas soldadas.

4.5 Partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas no detectó presencia de fisuras superficiales en las probetas evaluadas, tanto para la posición 1G como para la posición 3G. La Fig. 7 nos muestra fotografías de esta inspección

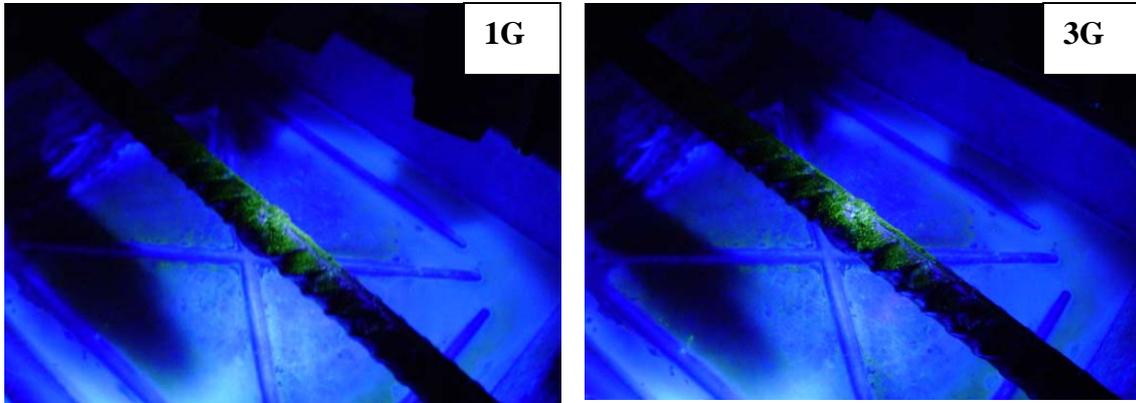


Fig. 7: inspección por líquidos penetrantes fluorescentes en las juntas 1G y 3G

4.6 Radiografía industrial

Se realizaron cuatro ensayos de radiografía industrial por cada posición y se detectó presencia de porosidades en las probetas evaluadas, tanto para la posición 1G como para la posición 3G. Las dimensiones de las porosidades encontradas para la **posición 1G**, están por debajo del máximo valor permitido, tanto en forma individual como cuando se realiza la sumatoria de las porosidades encontradas. El máximo poro individual tiene un tamaño de 1.9 mm (menor al valor límite de 2 mm) y la máxima sumatoria de porosidades da un valor de 4 mm (igual al valor máximo permitido). Las Figs. 8, 9, 10 y 11 nos muestran las radiografías de las probetas 1, 2, 5 y 6 correspondientes a la posición 1G.



Fig. 8: Muestras 1 y 2, posición 0°.



Fig. 9: Muestras 1 y 2, posición 90°.

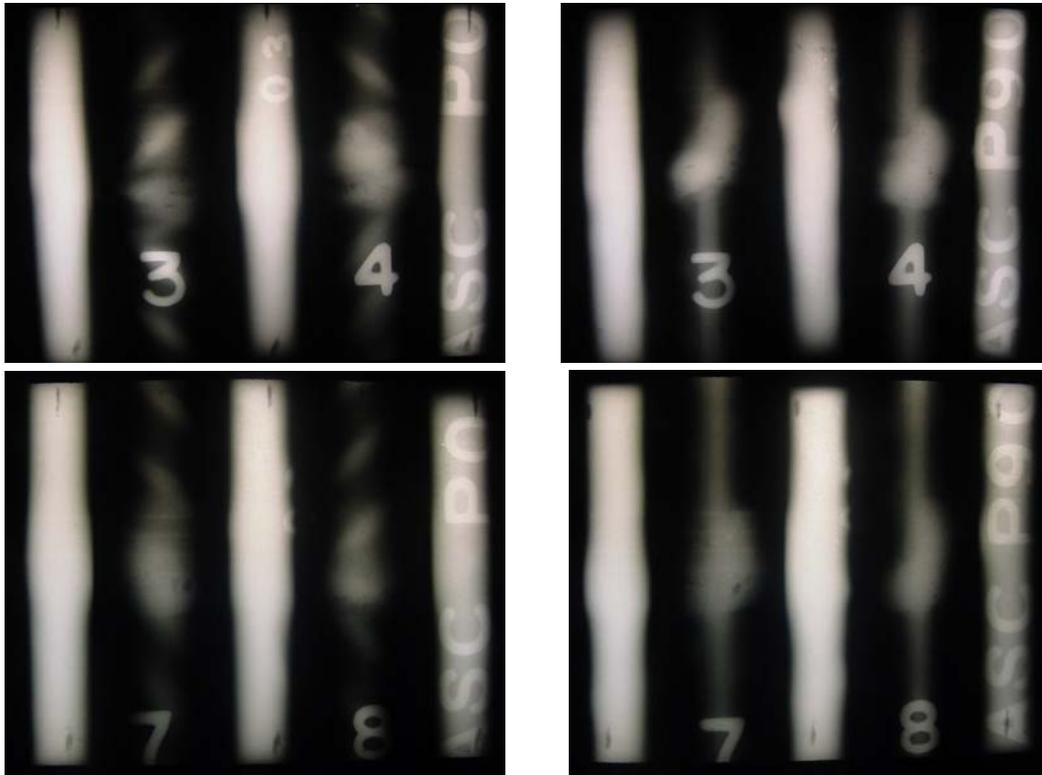


Fig. 10: Muestras 5 y 6, posición 0°.



Fig. 11: Muestras 5 y 6, posición 90°.

Las dimensiones de las porosidades encontradas para la **posición 3G**, están por encima del máximo permitido, tanto en forma individual como cuando se realiza la sumatoria de las porosidades encontradas. Se encontraron 6 poros individuales que superan el máximo tamaño permitido de 2 mm, siendo el tamaño máximo encontrado de 2.3 mm. En 7 de las 8 sumatorias de porosidades realizadas se obtienen valores superiores al máximo permitido (4 mm). Estas sumatorias varían entre 4.3 y 7.4 mm. Las Figs. 12, 13, 14 y 15 nos muestran las radiografías de las probetas 3, 4, 7 y 8 correspondientes a la posición 3G.



4.7 Barrido de dureza

Este ensayo se realizó en las secciones transversales de las 4 probetas evaluadas por macroataque (2 por cada posición). El barrido de durezas se hizo tanto en la cara como en la raíz siguiendo una línea que atraviesa el material base, ZAC y material de aporte, tal como se muestra en la Fig. 16. Se utilizó el ensayo de Microdureza Vickers, con una carga de 500 g.

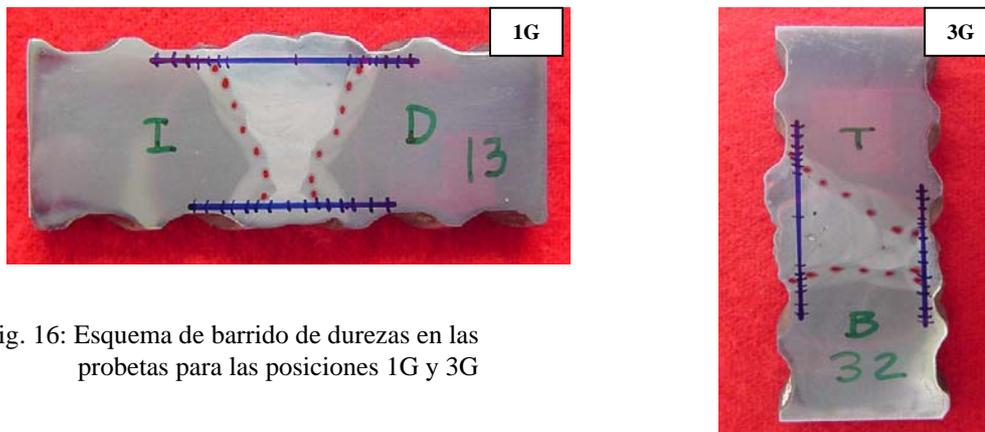


Fig. 16: Esquema de barrido de durezas en las probetas para las posiciones 1G y 3G

Para la **posición 1G** el máximo endurecimiento encontrado fue de **525 HV** (probeta 16), el mismo que está ubicado en la ZAC de la raíz. En la probeta 13 también se encontró un endurecimiento significativo de **450 HV** en la ZAC de la cara. La figura 17 nos muestra los resultados obtenidos en este ensayo para la probeta 16 (máximo endurecimiento)



Fig. 17: Barrido de dureza en la probeta 16

Para la **posición 3G** el máximo endurecimiento encontrado fue de **550 HV** (probeta 32), el mismo que está ubicado en la ZAC de la raíz. En la probeta 35 también se encontró un endurecimiento significativo de **525 HV** en la ZAC de la raíz. La figura 18 nos muestra los resultados obtenidos en este ensayo para la probeta 32 (máximo endurecimiento).



Fig. 18: Barrido de dureza en la probeta 32

Con la finalidad de comparar estos altos resultados de dureza, con respecto a los de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción, se hizo una medición de dureza en estas últimas. Los resultados máximos encontrados fueron de 525 HV y de 350 HV para el caso de la **posición 1G**.

En el caso de la **posición 3G**, los resultados máximos encontrados en las probetas traccionadas fueron de 520 HV y de 460 HV. Estos resultados, encontrados para ambas posiciones de soldadura, nos indican también la presencia de zonas altamente endurecidas en dichas probetas. Es importante recordar que las probetas sometidas al ensayo de tracción cumplieron con los requisitos correspondientes para dicho ensayo

Teniendo como referencia el **valor límite de 400 HV** (anexo XI del código AWS D1.1, punto XI 3.3), los valores de máxima dureza que se han encontrado (550 HV y 525 HV), superan hasta en 1.38 veces a dicho límite. Si bien el ensayo de dureza no es requerido por AWS para calificar estos procedimientos, es importante evaluar su implicancia en condiciones de servicio.

4.8 Análisis metalográfico

Este análisis se hizo siguiendo los puntos asociados a los barridos de dureza y teniendo como principales zonas de observación aquellas que presentaron mayor grado de endurecimiento. La microestructura del material base y del material de aporte se muestran en la Fig. 19. La microestructura del material base está formada por granos de ferrita y colonias de perlita, la misma que es compatible con un acero de medio carbono en estado de laminación en caliente. La microestructura del material de aporte, electrodo revestido E 8018 - C3, está constituida por ferrita acicular y ferrita masiva; esta microestructura es normal para este tipo de electrodos.

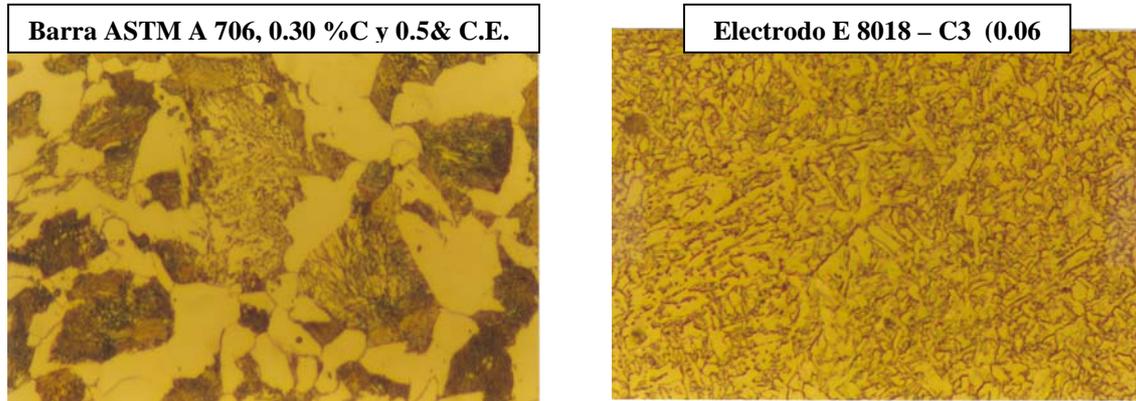


Fig. 19: Microestructura del material base y del material de aporte. 500X

La microestructura correspondiente al máximo endurecimiento obtenido para la **posición 1G** (probeta 16, zona de 525 HV), se muestra en la Fig. 20. En esta misma figura se muestra la observación micrográfica de la zona de máximo endurecimiento para la **posición 3G** (probeta 32, 550 HV). Estas microestructuras son compatibles con una significativa presencia de martensita en dichas zonas.

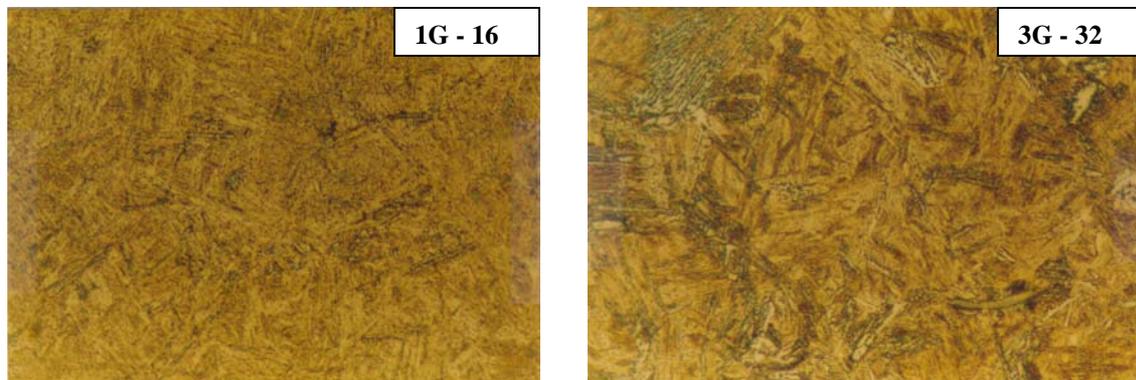


Fig. 20: Microestructura de zonas endurecidas, posiciones 1G y 3G. 1000X

5. Conclusiones y recomendaciones

- 5.1 Los dos procedimientos presentados para la unión por soldadura de barras corrugadas de acero ASTM A 706 de 3/4" en junta directa a tope en posiciones 1G y 3G, cumplen con los requerimientos establecidos en ANSI/AWS D1.4 - 98, Structural Welding Code - Reinforcing Steel, correspondientes a ensayo visual, macrografía y ensayo de tracción.
- 5.2 A pesar de que ANSI/AWS D1.4 - 98, Structural Welding Code - Reinforcing Steel no pide realizar ensayos de radiografía, dureza y metalografía, los resultados obtenidos nos indican alto grado de endurecimiento en la ZAC y presencia significativa de porosidades al interior del cordón

de soldadura. Para el tipo de barra, tipo de junta y procedimiento de soldadura utilizados, deben tomarse precauciones debido a la aparición de zonas de elevada dureza que no son contempladas por el código ANSI/AWS D1.4 - 98.

- 5.3 Para el proceso utilizado para la junta 1G se recomienda mantener un calor de aporte en un rango de 6.0 a 7.2 kJ/cm, manteniendo una corriente mínima de 130 A y un voltaje mínimo de 23 V. Se podrán hacer pruebas, incrementando el valor de la corriente, teniendo en cuenta el límite del fabricante del electrodo (160 A) y la aparición de discontinuidades no aceptables.
- 5.4 Disminuir la longitud de arco al mínimo posible con la finalidad de reducir la presencia de discontinuidades.
- 5.5 Evitar corrientes de aire durante la ejecución de la soldadura con la finalidad de controlar la velocidad de enfriamiento.
- 5.6 Realizar ensayos de doblado como parte del proceso de calificación de este tipo de procedimientos de soldadura.

Referencias

- 1. American Welding Society, AWS D1.1, STRUCTURAL WELDING CODE. 2004.
- 2. American Welding Society, ANSI/AWS D1.4, STRUCTURAL WELDING CODE – REINFORCING STEEL. 1998.
- 3. American Society for Testing and Materials, ASTM A706/A706M-04a Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement. 2004.
- 4. American Society for Testing and Materials, ASTM A572/A572M-04 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. 2004.
- 5. American Welding Society, WELDING HANDBOOK, VOL. 4, MATERIALS AND APPLICATIONS – PART 2, 8TH EDITION. 1998
- 6. Omer W. Blodget, DESIGN OF WELDED STRUCTURES. 1996.
- 7. American Welding Society, WELDING HANDBOOK, VOL. 1, WELDING TECHNOLOGY, 8TH EDITION. 1987
- 8. EXSA S.A. – Oerlikon, Manual de Soldadura y Catálogo de Productos.