

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO PARA CONCRETO REFORZADO BELGO 60

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Raúl Carlos Hurtado Espejo

ASESOR: MSc. Ing. Roberto Lazarte Gamero

Lima, Marzo del 2011

RESUMEN

Título: ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO PARA CONCRETO REFORZADO BELGO 60

Con la finalidad de verificar la soldabilidad de las barras corrugadas de acero para concreto reforzado BELGO 60, de fabricación brasilera, de acuerdo con los requerimientos de las normas ASTM A 615 y ASTM A 706, se plantea el presente trabajo. Estas barras son de acero de media aleación para concreto reforzado orientadas a aplicaciones donde las propiedades mecánicas y la composición química están limitadas por los requerimientos de la norma.

Este estudio tuvo como objetivo establecer procedimientos de soldadura para barras corrugadas de acero para concreto reforzado BELGO 60, para lo cual se siguió las recomendaciones del código ANSI/AWS D1.4 - 2005.

El tipo de junta estudiado es la Junta Directa a Tope – Soldadura de Canal en V Simple, posición de soldadura 1G, los diámetros de las barras objeto de este estudio son: a) 3/8", b) 5/8", c) 3/4" y d) 1".

Los ensayos realizados a las uniones soldadas fueron:

- Según requerimientos del código: inspección visual, tracción y macroataque.
- Complementarios: barrido de durezas y micrografía.

Luego del estudio se concluye que las barras corrugadas de acero para concreto reforzado BELGO 60, cumplen con los requerimientos de las normas ASTM A 615 y ASTM A 706, así mismo pueden ser unidas por soldadura siguiendo los procedimientos de soldadura propuestos, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) Emplear una técnica de soldeo oscilante, que permita realizar la unión en el menor número de pasadas, para garantizar un adecuado aporte de calor.
- b) Inmediatamente después de terminar la soldadura de la unión cubrir la junta para reducir la velocidad de enfriamiento y prevenir la formación de estructuras duras como la martensita.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	I
1. CONCEPTOS GENERALES	1
1.1. Propiedades del Material Base	1
1.1.1. Barra Corrugada ASTM A 615	1
1.1.2. Barra Corrugada ASTM A 706	7
1.2. Soldabilidad del Material Base	12
1.2.1. Soldabilidad de Barras Corrugadas ASTM A 615	12
1.2.1.1. Procesos de Soldadura	12
1.2.1.2. Temperatura de Pre calentamiento e Interpases	12
1.2.1.3. Material de Aporte	13
1.2.2. Soldabilidad de Barras Corrugadas ASTM A 706	16
1.2.2.1. Procesos de Soldadura	16
1.2.2.2. Temperatura de Pre calentamiento e Interpases	16
1.2.2.3. Material de Aporte	16
1.3. Consideraciones para la Especificación del Procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Specification - WPS)	17
1.3.1. Habilidad de Soldeo	17
1.3.1.1. Preparación del Material Base	17
1.3.1.2. Ensamble	17
1.3.1.3. Control de Distorsión, Contracción y Calor	18
1.3.1.4. Calidad de la Soldadura	18
1.3.2. Técnica de Soldeo	18
1.3.3. Calificación de la Especificación del Procedimiento de Soldadura	19
1.3.3.1. Limitación de las Variables	19
1.3.3.2. Tipos de Ensayos y sus Propósitos	19
1.3.3.3. Posición de las Soldaduras de Ensayo	19
1.3.3.4. Número, Tipo y Preparación de Ensamblajes para Ensayos	20
1.3.4. Ensayos No Destructivos	20
1.3.4.1. Inspección Visual	21
1.3.4.2. Radiografía Industrial	21
1.3.4.3. Partículas Magnéticas	21
1.3.4.4. Líquidos Penetrantes	21
1.3.4.5. Ultrasonido Industrial	22
1.3.5. Otros Ensayos	22
1.3.5.1. Barrido de Durezas	22

1.3.5.2.	Análisis Metalográfico	22
1.3.6.	Esfuerzos Admisibles	23
1.3.6.1.	Esfuerzos del Material Base	23
1.3.6.2.	Esfuerzos Admisibles en la Soldadura	23
1.3.6.3.	Áreas, Longitudes, Gargantas y Dimensiones Efectivas de Soldadura	23
2.	ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA	24
2.1.	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)	25
2.1.1.	Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/8"	25
2.1.2.	Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8"	26
2.1.3.	Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4"	27
2.1.4.	Procedimiento de Soldadura para Barra de 1"	28
2.2.	Ensayos de Calificación de los Procedimientos de Soldadura	31
2.2.1.	Ensayos de Calificación según Código ANSI/AWS D1.4-2005	31
2.2.1.1.	Inspección Visual	31
2.2.1.2.	Ensayo de Tracción	34
2.2.1.3.	Ensayo de Macroataque	35
2.2.2.	Ensayos Complementarios	36
2.2.2.1.	Barrido de Durezas (HV)	36
2.2.2.2.	Análisis Micrográfico	36
3.	ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
3.1.	Caracterización de Material Base	37
3.1.1.	Barra Corrugada BELGO 60 de 3/8"	37
3.1.1.1.	Análisis Químico	37
3.1.1.2.	Peso Lineal	37
3.1.1.3.	Ensayo de Tracción	38
3.1.1.4.	Ensayo de Doblado	38
3.1.2.	Barra Corrugada BELGO 60 de 5/8"	40
3.1.2.1.	Análisis Químico	40
3.1.2.2.	Peso Lineal	40
3.1.2.3.	Ensayo de Tracción	41
3.1.2.4.	Ensayo de Doblado	41
3.1.3.	Barra Corrugada BELGO 60 de 3/4"	43
3.1.3.1.	Análisis Químico	43

3.1.3.2.	Peso Lineal	43
3.1.3.3.	Ensayo de Tracción	44
3.1.3.4.	Ensayo de Doblado	44
3.1.4.	Barra Corrugada BELGO 60 de 1"	46
3.1.4.1.	Análisis Químico	46
3.1.4.2.	Peso Lineal	46
3.1.4.3.	Ensayo de Tracción	47
3.1.4.4.	Ensayo de Doblado	47
3.2.	Ensayos para la Calificación de los Procedimientos de Soldadura	49
3.2.1.	Ensayos de Calificación del WPS según ANSI/AWS D1.4-2005	49
3.2.1.1.	Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 3/8"	49
3.2.1.1.1.	Ensayo de Tracción	49
3.2.1.1.2.	Ensayo de Macroataque	49
3.2.1.2.	Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 5/8"	51
3.2.1.2.1.	Ensayo de Tracción	51
3.2.1.2.2.	Ensayo de Macroataque	51
3.2.1.3.	Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 3/4"	53
3.2.1.3.1.	Ensayo de Tracción	53
3.2.1.3.2.	Ensayo de Macroataque	53
3.2.1.4.	Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 1"	55
3.2.1.4.1.	Ensayo de Tracción	55
3.2.1.4.2.	Ensayo de Macroataque	55
3.2.2.	Ensayos Complementarios	57
3.2.2.1.	Ensayos a Junta de Barra de 3/8"	57
3.2.2.1.1.	Barrido de Durezas (HV)	57
3.2.2.1.2.	Análisis Micrográfico	58
3.2.2.2.	Ensayos a Junta de Barra de 5/8"	61
3.2.2.2.1.	Barrido de Durezas (HV)	61
3.2.2.2.2.	Análisis Micrográfico	62
3.2.2.3.	Ensayos a Junta de Barra de 3/4"	65
3.2.2.3.1.	Barrido de Durezas (HV)	65
3.2.2.3.2.	Análisis Micrográfico	66
3.2.2.4.	Ensayos a Junta de Barra de 1"	69

3.2.2.4.1. Barrido de Durezas (HV)	69
3.2.2.4.2. Análisis Micrográfico	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

El mercado nacional de la construcción utiliza como elemento estructural a la barra corrugada de acero para concreto reforzado, la cual requiere ser unida una a otra por un medio que garantice la adecuada transferencia de carga, es decir, su concetricidad, y la menor cantidad de unidades utilizadas comparado con el método convencional de traslape. Una alternativa de unión de estas barras es mediante la soldadura de las mismas.

En nuestro medio la barra corrugada más utilizada es la ASTM A 615, la cual no presenta las mejores propiedades de soldabilidad comparada con la barra corrugada ASTM A 706, según lo demostrado en tesis de grado anteriores, debido a que esta última exige un control más estricto de los elementos químicos que la componen.

Recientemente se han introducido a nuestro mercado las barras corrugadas BELGO 60, fabricadas en Brasil por ArcelorMittal, las cuales afirman satisfacer los requerimientos tanto de las barras corrugadas ASTM A 615 como de las ASTM A 706, así mismo aseguran ser soldables sin precalentamiento, lo cual significa un ahorro tanto económico como de tiempo en las uniones hechas en campo.

La barra corrugada BELGO 60 es comercializada en nuestro mercado en diversas presentaciones como son las de ϕ 6 mm, ϕ 8 mm, ϕ 12 mm, ϕ 3/8", ϕ 1/2", ϕ 5/8", ϕ 3/4", ϕ 1".

Con el propósito de garantizar la calidad de la unión soldada, se realizará el estudio de la soldabilidad de esta barra corrugada, para lo cual se elegirán las presentaciones de ϕ 3/8", ϕ 5/8", ϕ 3/4", ϕ 1", por tener la disponibilidad de las mismas.

Para conseguir la calidad adecuada de la junta soldada, nos basaremos principalmente en el Código de Soldadura Estructural para Acero de Refuerzo (Structural Welding Code – Reinforcing Steel) ANSI/AWS D1.4 - 2005, de la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society - AWS). Este código nos indicará el tipo de ensayos a realizar y el criterio de evaluación de los mismos para obtener una junta soldada que cumpla con los requerimientos especificados. Adicionalmente a los ensayos propuestos por el código, se realizarán ensayos que profundicen el estudio de la soldabilidad, como son: Barrido de Durezas (HV) y Análisis Micrográfico.

El tipo de junta a evaluar es aquella que presenta la mayor facilidad de ejecución frente a otras propuestas por el mismo código y que a criterio de especialistas en el campo de la construcción civil sería la de mayor utilidad. Esta es la junta a tope biselada para posición de eje de la barra horizontal.

Este estudio verificará las propiedades de soldabilidad de las barras corrugadas BELGO 60 y planteará soluciones a los problemas que en la unión soldada se presenten y que atenten contra la calidad e integridad de la misma. Con este fin, se especificarán procedimientos de soldadura para cada presentación estudiada y se realizarán ensayos para verificar la validez de los mismos.



1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Propiedades del Material Base

1.1.1. Barra Corrugada ASTM A 615

Las barras corrugadas ASTM A 615 son barras laminadas obtenidas a partir de palanquillas producidas por coladas en lingotes o colada continua, utilizando los procesos de “hogar abierto”, básico al oxígeno u hornos eléctricos.

Estas barras, con resalte y lisas, son utilizadas como refuerzo para concreto armado y normalmente no son soldadas.

Dichas barras están disponibles en nuestro mercado en presentación de 9 metros de longitud, según los diámetros nominales mostrados en la Tabla 1.01:

Tabla 1.01: Números de Designación de Barras con Resalte, Peso Nominal (masa), Dimensiones Nominales y Requerimientos de Deformación [1]

N° de Designación de Barra	Peso Nominal lb/pie [Kg/m]	Dimensiones Nominales ^A			Requerimientos de Deformación, pulg. [mm]		
		Diámetro pulg. [mm]	Sección Transversal pulg. ² [mm ²]	Perímetro Pulg. [mm]	Espaciamiento Promedio Máximo	Altura Promedio Mínima	GAP máx. (Cordón de 12.5% del perímetro nominal)
3 [10]	0.376 [0.560]	0.375 [9.5]	0.11 [71]	1.178 [29.9]	0.262 [6.7]	0.015 [0.38]	0.143 [3.6]
4 [13]	0.668 [0.994]	0.500 [12.7]	0.20 [129]	1.571 [39.9]	0.350 [8.9]	0.020 [0.51]	0.191 [4.9]
5 [16]	1.043 [1.552]	0.625 [15.9]	0.31 [199]	1.963 [49.9]	0.437 [11.1]	0.028 [0.71]	0.239 [6.1]
6 [19]	1.502 [2.235]	0.750 [19.1]	0.44 [284]	2.356 [59.8]	0.525 [13.3]	0.038 [0.97]	0.286 [7.3]
7 [22]	2.044 [3.042]	0.875 [22.2]	0.60 [387]	2.749 [69.8]	0.612 [15.5]	0.044 [1.12]	0.334 [8.5]
8 [25]	2.670 [3.973]	1.000 [25.4]	0.79 [510]	3.142 [79.8]	0.700 [17.8]	0.050 [1.27]	0.383 [9.7]
9 [29]	3.400 [5.060]	1.128 [28.7]	1.00 [645]	3.544 [90.0]	0.790 [20.1]	0.056 [1.42]	0.431 [10.9]
10 [32]	4.303 [6.404]	1.270 [32.3]	1.27 [819]	3.990 [101.3]	0.889 [22.6]	0.064 [1.63]	0.487 [12.4]
11 [36]	5.313 [7.907]	1.410 [35.8]	1.56 [1006]	4.430 [112.5]	0.987 [25.1]	0.071 [1.80]	0.540 [13.7]
14 [43]	7.65 [11.38]	1.693 [43.0]	2.25 [1452]	5.32 [135.1]	1.185 [30.1]	0.085 [2.16]	0.648 [16.5]
18 [57]	13.60 [20.24]	2.257 [57.3]	4.00 [2581]	7.09 [180.1]	1.58 [40.1]	0.102 [2.59]	0.864 [21.9]

^A La dimensión nominal de una barra con resaltes es equivalente al de una barra lisa que tiene el mismo peso por metro como la barra con resaltes.

Las barras utilizadas en este estudio son las de designación N° 3, N° 5, N°6 y N° 8, que son de ϕ 3/8”, ϕ 5/8”, ϕ 3/4” y ϕ 1” respectivamente, por estar a nuestro alcance.

Estas barras se clasifican de acuerdo a cuatro niveles de resistencia a la fluencia mínima, y son designadas como grado 40 [280 Mpa], grado 60 [420 MPa], grado 75 [520 MPa] y grado 80 [550 MPa] respectivamente.

Las barras utilizadas en este estudio son las de grado 60 [420 MPa], puesto que son las que se usan de forma obligatoria en nuestro mercado local.

La especificación de la barra corrugada, según ASTM A 615, no limita la composición química ni el carbono equivalente (CE). Cuando el acero va a ser soldado, se debe emplear un procedimiento de soldadura adecuado para la composición química y la aplicación particular de cada caso. Con este fin se recomienda el uso de la última versión del código ANSI/AWS D1.4 Código de Soldadura Estructural – Acero Reforzado. Este documento describe la selección adecuada de los procesos de soldadura, temperaturas de precalentamiento e interpase, los materiales de aporte, así como el rendimiento y los requerimientos de calificación del procedimiento.

a) Propiedades Mecánicas:

Las propiedades mecánicas requeridas para la barra corrugada grado 60 son las siguientes [2]:

- Esfuerzo de Tracción, mínimo: 620 MPa
- Esfuerzo de Fluencia, mínimo: 420 Mpa
- Alargamiento en 8 pulg. [203.2 mm], mínimo (%)

Tabla 1.02: Mínimo alargamiento de barra corrugada, en %

N° de Designación de la Barra	%
3, 4, 5, 6	9
7, 8	8
9, 10, 11, 14, 18	7

Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción de la barra corrugada se realiza bajo la norma ASTM A 370 Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero [3].

Probeta de Ensayo de Tracción

Todas las probetas de ensayo deben presentar la sección completa de la barra corrugada, tal como ha sido conformada.

Las probetas para ensayos de tracción deben ser lo suficientemente largas para proveer 8 pulg. (203.2 mm) de longitud calibrada, una distancia de por lo menos 2 diámetros de barra entre cada marca de calibración y las mordazas, más una longitud adicional suficiente para llenar las mordazas completamente dejando alguna longitud de exceso que sobresalga más allá de cada mordaza. Un esquema de la probeta se muestra en la Figura 1.01:

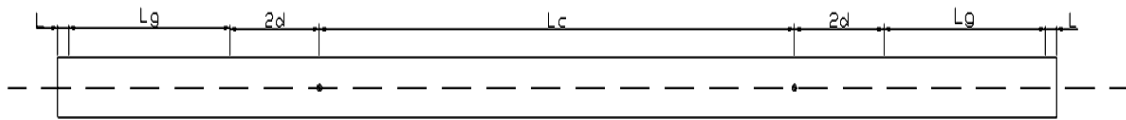


Figura 1.01: Probeta para Ensayo de Tracción de Barra Corrugada.

Donde:

L: longitud de exceso

Lg: longitud de la mordaza

2d: dos veces el diámetro nominal de la barra corrugada

Lc: longitud calibrada

La Tabla 1.03, muestra los valores de L, Lg, 2d, Lc y la longitud mínima de probeta, calculados para cada diámetro de barra corrugada utilizada en el estudio.

Tabla 1.03: Longitud Total Mínima de Probeta de Tracción de Barra Corrugada

N° de Designación de Barra	L mm	Lg mm	2d mm	Lc mm	Longitud Total Mín. mm
3	6.0	69.0	19.0	203.2	391.2
5	6.0	69.0	31.8	203.2	416.8
6	6.0	69.0	38.2	203.2	429.6
8	6.0	69.0	50.8	203.2	454.8

b) Composición Química:

El fabricante deberá hacer un análisis de cada colada a partir de probetas tomadas preferentemente durante el vaciado de las coladas. Se deberá determinar los porcentajes de carbono, manganeso, fósforo y azufre. El contenido de fósforo no deberá exceder el 0,06%.

Un comprador podrá hacer un análisis de las barras terminadas. El contenido de fósforo así determinado no deberá exceder aquel especificado en el párrafo anterior por más del 25% [4].

c) Dimensión y Peso:

Las barras corrugadas reforzadas deben ser evaluadas sobre la base de su peso nominal. El peso determinado usando el peso medido de la probeta de ensayo y redondeado en concordancia con la Norma ASTM E 29, debe ser por lo menos 94% del peso aplicable por unidad de longitud prescrita en la Tabla 1.01. En ningún caso el sobrepeso de una barra corrugada debe ser causa de rechazo [5].

d) Propiedades de Doblado:

La probeta de doblado debe resistir a ser doblada alrededor de un pin sin presentar fisuración en el radio exterior de la porción doblada. Los requerimientos para el grado de doblado y tamaños de pines están descritos en la Tabla 1.04 [6]:

Tabla 1.04: Diámetros de Pin para Doblado de Barras Corrugas

N° de Designación de Barra	Diámetro del Pin para Doblado ^A
3, 4, 5	$3 \frac{1}{2} d^B$
6, 7, 8	$5 d$
9, 10, 11	$7 d$
14, 18	$9 d$

^A Ensayo de Dobleza a 180° a menos que se especifique algo diferente

^B d = Diámetro Nominal de la probeta

El ensayo de doblado debe ser realizado en probetas de suficiente longitud para asegurar un doblado libre y con un aparato que provea:

- Aplicación continua y uniforme de carga a lo largo de la duración de la operación de doblado.

- Movimiento no restringido de la probeta en los puntos de contacto con el aparato y doblado alrededor de un pin libre para rotar.
- Envolvimiento cercano de la probeta alrededor del pin, durante la operación de doblado.

Probeta de Ensayo de Doblado

La probeta para el ensayo de doblado, debe tener ciertas dimensiones, de acuerdo al equipo de doblado a utilizar, cuyo esquema se muestra en la Figura 1.02 [7]:

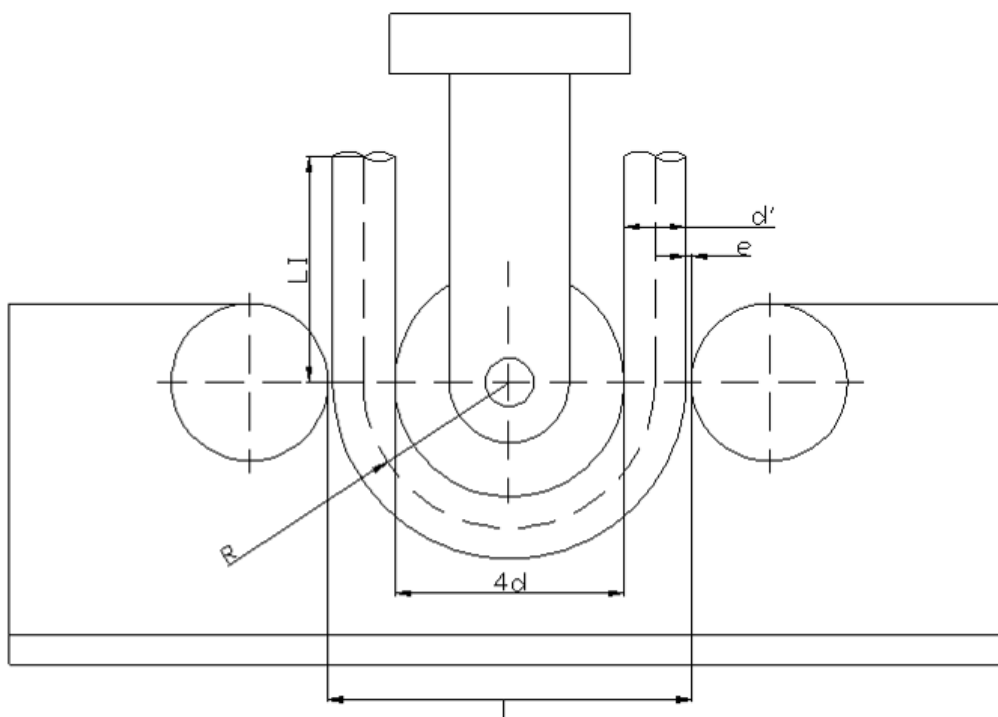


Figura 1.02: Esquema del Equipo para Ensayo de Dobleza en Barra Corrugada

Donde:

D: diámetro del pin a utilizar, de acuerdo con la Tabla 1.04.

d': diámetro de la barra corrugada, medido con las corrugas.

e: luz entre radio exterior de curvatura de la barra y el apoyo.

L: separación entre apoyos = $D + 2 \cdot d' + 2 \cdot e$

Ll: longitud de la barra libre.

R: radio medio de curvatura de la barra.

La longitud de probeta de doblado (L_p) será: $L_p = \pi \cdot R + 2 \cdot L_I$. La Tabla 1.05, muestra las longitudes mínimas de las probetas de doblado en función del diámetro nominal de la barra corrugada.

Tabla 1.05: Dimensiones de la Probeta de Doble en Barra Corrugada

N° de Designación de Barra	D mm	d' mm	e mm	L mm	L _I mm	R mm	L _p mm
3	33.25	10.0	1.6	56.45	50.0	21.63	167.95
5	55.65	16.4	1.6	91.65	50.0	36.03	213.19
6	95.50	19.6	1.6	137.9	50.0	57.55	280.79
8	127.0	25.9	1.6	182.0	50.0	76.45	340.17

La longitud de probeta máxima será de 432mm debida a limitaciones geométricas de la máquina de ensayo.

1.1.2. Barra Corrugada ASTM A 706

Las barras corrugadas ASTM A 706, para concreto reforzado, son fabricadas con aceros de baja aleación, y están orientadas a aplicaciones donde las propiedades mecánicas y la composición química restringidas son requeridas para cumplir con aplicaciones de propiedad tensil controlada o para mejorar la soldabilidad [8].

Dichas barras son utilizadas como refuerzo para concreto y donde se requiera el soldado de estructuras.

Estas barras están disponibles en nuestro mercado en presentación de 9 metros de longitud, según los diámetros nominales mostrados en la Tabla 1.06:

Tabla 1.06: Números de Designación de Barras con Resalte, Peso Nominal (masa), Dimensiones Nominales y Requerimientos de Deformación [9]

N° de Designación de Barra	Peso Nominal lb/pie [Kg/m]	Dimensiones Nominales ^A			Requerimientos de Deformación, pulg. [mm]		
		Diámetro pulg. [mm]	Sección Transversal pulg. ² [mm ²]	Perímetro Pulg. [mm]	Espaciamiento Promedio Máximo	Altura Promedio Mínima	GAP máx. (Cordón de 12.5% del perímetro nominal)
3 [10]	0.376 [0.560]	0.375 [9.5]	0.11 [71]	1.178 [29.9]	0.262 [6.7]	0.015 [0.38]	0.143 [3.6]
4 [13]	0.668 [0.994]	0.500 [12.7]	0.20 [129]	1.571 [39.9]	0.350 [8.9]	0.020 [0.51]	0.191 [4.9]
5 [16]	1.043 [1.552]	0.625 [15.9]	0.31 [199]	1.963 [49.9]	0.437 [11.1]	0.028 [0.71]	0.239 [6.1]
6 [19]	1.502 [2.235]	0.750 [19.1]	0.44 [284]	2.356 [59.8]	0.525 [13.3]	0.038 [0.97]	0.286 [7.3]
7 [22]	2.044 [3.042]	0.875 [22.2]	0.60 [387]	2.749 [69.8]	0.612 [15.5]	0.044 [1.12]	0.334 [8.5]
8 [25]	2.670 [3.973]	1.000 [25.4]	0.79 [510]	3.142 [79.8]	0.700 [17.8]	0.050 [1.27]	0.383 [9.7]
9 [29]	3.400 [5.060]	1.128 [28.7]	1.00 [645]	3.544 [90.0]	0.790 [20.1]	0.056 [1.42]	0.431 [10.9]
10 [32]	4.303 [6.404]	1.270 [32.3]	1.27 [819]	3.990 [101.3]	0.889 [22.6]	0.064 [1.63]	0.487 [12.4]
11 [36]	5.313 [7.907]	1.410 [35.8]	1.56 [1006]	4.430 [112.5]	0.987 [25.1]	0.071 [1.80]	0.540 [13.7]
14 [43]	7.65 [11.38]	1.693 [43.0]	2.25 [1452]	5.32 [135.1]	1.185 [30.1]	0.085 [2.16]	0.648 [16.5]
18 [57]	13.60 [20.24]	2.257 [57.3]	4.00 [2581]	7.09 [180.1]	1.58 [40.1]	0.102 [2.59]	0.864 [21.9]

^A La dimensión nominal de una barra con resaltes es equivalente al de una barra lisa que tiene el mismo peso por metro como la barra con resaltes.

Las barras utilizadas en este estudio son las de designación N° 3, N° 5, N°6 y N° 8, que son de ϕ 3/8", ϕ 5/8", ϕ 3/4" y ϕ 1" respectivamente, por estar a nuestro alcance.

Estas barras son de dos niveles de fluencia mínimas, designadas como grado 60 [420 MPa] y grado 80 [550 MPa] respectivamente.

Las barras utilizadas en este estudio son las de grado 60 [420 MPa], puesto que son de uso obligatorio en nuestro mercado local.

La especificación de la barra corrugada, según ASTM A 706, limita las propiedades mecánicas para proveer las propiedades de fluencia y de tracción deseadas para aplicaciones de propiedad tensil controlada.

Esta especificación limita también la composición química y el carbono equivalente (CE) con el fin de mejorar la soldabilidad del material (estos valores no se encuentran limitados en el caso de la barra corrugada ASTM A 615). Cuando el acero va a ser soldado, se debe emplear un procedimiento de soldadura adecuado para la composición química y la aplicación particular de cada caso. Con este fin se recomienda el uso de la última edición del código ANSI/AWS D1.4 Código de Soldadura Estructural – Acero de Refuerzo. Este documento describe la selección adecuada de procesos de soldadura, temperaturas de precalentamiento e interfase, los materiales de aporte, así como el rendimiento y los requerimientos de calificación del procedimiento.

a) Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas requeridas para la barra corrugada grado 60 son las siguientes:

- Esfuerzo de Tracción, mínimo: 550 MPa
(El Esfuerzo de Tracción no debe ser menor a 1.25 veces el Esfuerzo de Fluencia Real)
- Esfuerzo de Fluencia, mínimo: 420 MPa
- Esfuerzo de Fluencia, máximo: 540 MPa
- Alargamiento en 8 pulg. [203.2 mm], mínimo (%)

Tabla 1.07: Mínimo alargamiento de barra corrugada, en %

N° de Designación de la Barra	%
3, 4, 5, 6	14
7, 8, 9, 10, 11	12
14, 18	10

Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción de la barra corrugada se realiza bajo la norma ASTM A 370 Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero [10].

Probeta de Ensayo de Tracción

Las probetas del ensayo de tracción son similares que para el caso de las barras corrugadas ASTM A 615, descritas anteriormente.

b) Composición Química

Los porcentajes para el Análisis de Colada no deben exceder los valores de la Tabla 1.08:

Tabla 1.08: Máxima Composición Química de la Barra Corrugada (Análisis de Colada)

Elemento	% máximo
Carbono	0.30
Manganeso	1.50
Fósforo	0.035
Azufre	0.045
Silicio	0.50

Los microaleantes que se encuentran son: Manganeso, Silicio, Cobre, Níquel, Cromo, Molibdeno, Vanadio, Columbino, Titanio y Zirconio.

La composición química mostrada por un análisis de producto debe estar limitada por los valores de la Tabla 1.09:

Tabla 1.09: Máxima Composición Química de la Barra Corrugada (Análisis de Producto)

Elemento	% máximo
Carbono	0.33
Manganeso	1.56
Fósforo	0.043
Azufre	0.053
Silicio	0.55

El análisis de colada debe ser tal que provea un carbono equivalente (C.E.) no mayor a 0.55%, calculado con la Fórmula 1.01 [11]:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (\text{Fórmula 1.01})$$

c) Dimensiones y Peso

Las barras corrugadas reforzadas deben ser evaluadas sobre la base de su peso nominal. El peso determinado usando el peso medido de la probeta de ensayo y redondeado en concordancia con la Norma ASTM E 29, debe ser por lo menos 94% del peso aplicable por unidad de longitud prescrita en la Tabla 1.06. En ningún caso el sobrepeso de una barra corrugada debe ser causa de rechazo [12].

d) Propiedades de Doblado

La probeta de doblado debe resistir a ser doblada alrededor de un pin sin presentar fisuración en el radio exterior de la porción doblada. Los requerimientos para el grado de doblado y tamaños de pines están descritos en la Tabla 1.10:

Tabla 1.10: Diámetros de Pin para Doblado de Barras Corrugadas

N° de Designación de Barra	Diámetro del Pin para Doblado
3, 4, 5	$3 \frac{1}{2} d^A$
6, 7, 8	$4 d$
9, 10, 11	$6 d$
14, 18	$8 d$

^A d = Diámetro Nominal de la probeta

El ensayo de doblado debe ser realizado en probetas de suficiente longitud para asegurar un doblado libre y con un aparato que provea:

- Aplicación continua y uniforme de carga a lo largo de la duración de la operación de doblado.
- Movimiento no restringido de la probeta en los puntos de contacto con el aparato y doblado alrededor de un pin libre para rotar.
- Envolvimiento cercano de la probeta alrededor del pin, durante la operación de doblado [13].

Probeta de Ensayo de Doblado

Las probetas para el ensayo de doblado son similares que para el caso de las barras corrugadas ASTM A 615, descritas anteriormente, a excepción de la longitud de la probeta “Lp” la cual se muestra en la Tabla 1.11:

Tabla 1.11: Dimensiones de la Probeta de Doble en Barra Corrugada

N° de Designación de Barra	D mm	d' mm	e mm	L mm	LI mm	R mm	Lp mm
3	28.5	10.0	1.6	51.7	50.0	19.25	160.47
5	47.7	16.4	1.6	83.7	50.0	32.05	200.69
6	76.4	19.6	1.6	118.8	50.0	48.00	250.79
8	101.6	25.9	1.6	156.6	50.0	63.75	300.27

La longitud de probeta máxima será de 432 mm debida a limitaciones geométricas de la máquina de ensayo.

Finalmente, puesto que el requerimiento más alto lo considera la norma ASTM A 706, por tener diámetros de pin más pequeños, lo que significa un mayor grado de doblado, tomaremos estos diámetros para desarrollar los ensayos de doblado.

1.2. Soldabilidad del Material Base

1.2.1. Soldabilidad de Barras Corrugadas ASTM A 615

1.2.1.1. Procesos de Soldadura

El código ANSI/AWS D1.4-05 recomienda soldar las barras corrugadas ASTM A 615 utilizando cualquiera de los siguientes procesos:

- Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW),
- Soldadura por Arco de Metal y Gas (Gas Metal Arc Welding – GMAW), y
- Soldadura por Arco con Núcleo Fundente (Flux Cored Arc Welding – FCAW)

Otros procesos de soldadura pueden ser utilizados siempre y cuando sean aprobados por el Ingeniero Responsable, dado que algunos requerimientos de prueba de calificación especial no cubiertos por el código son cumplidos para asegurar que las soldaduras obtenidas sean satisfactorias para la aplicación requerida.

Para nuestro caso, se empleó el proceso de soldadura SMAW por ser el de mayor utilización en nuestro medio [14].

1.2.1.2. Temperatura de Pre calentamiento e Interpases

La mínima temperatura de pre calentamiento e interpases debe estar en concordancia con la Tabla 1.12, utilizando el valor de Carbono Equivalente más alto del metal base.

Para el caso de la barra corrugada ASTM A 615, el valor del carbono equivalente se calculará con la Fórmula 1.02:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} \quad (\text{Fórmula 1.02})$$

De no contarse con la información de la composición química del metal base, la temperatura de pre calentamiento e interfase será:

- Para barras número 6 [19] o menor, usar un pre calentamiento mínimo de 150°C.
- Para barras número 7 [22] o mayor, usar un pre calentamiento mínimo de 260°C.

Tabla 1.12: Mínima Temperatura de Pre calentamiento e Interpases^{a, b}

Carbon equivalente (C.E.) Rango, % ^{c, d}	Tamaño de la Barra Reforzada	SMAW con electrodos de bajo hidrogeno, GMAW o FCAW	
		Temperatura Mínima	
		°F	°C
Hasta 0,40	Hasta 11 [36] inclusive 14 y 18 [43 y 57]	ninguna ^e 50	ninguna ^e 10
Más de 0.40 hasta 0.45 inclusive	Hasta 11 [36] inclusive 14 y 18 [43 y 57]	ninguna ^e 50	ninguna ^e 10
Más de 0.45 hasta 0.55 inclusive	Hasta 6 [19] inclusive 7 a 11 [22 a 36] 14 y 18 [43 y 57]	ninguna ^e 50 200	ninguna ^e 10 90
Más de 0.55 hasta 0.65 inclusive	Hasta 6 [19] inclusive 7 a 11 [22 a 36] 14 y 18 [43 y 57]	100 200 300	40 90 150
Más de 0.65 hasta 0.75	Hasta 6 [19] inclusive 7 a 18 [22 a 57]	300 400	150 200
Más de 0.75	Hasta 6 [19] inclusive 7 a 18 [22 a 57]	300 500	150 260

^a Cuando el acero reforzado será soldado con un acero al carbono, los requerimientos de pre calentamiento del acero estructural deben ser considerados (ver AWS D1.1, tabla titulada Temperatura Mínima de Pre calentamiento e Interpases Pre calificada).

^b Las soldaduras no deben ser hechas cuando la temperatura ambiente este por debajo de 0°F [-18°C].

^c Después de que la soldadura es completada, las barras deberán seguir un enfriamiento natural hasta la temperatura ambiente. Enfriamientos acelerados están prohibidos.

^d Cuando no se cuenta con el analisis químico, el carbono equivalente debe ser asumido por encima de 0.75%.

^e Cuando el metal base esta por debajo de 32°F [0°C], el metal base debe ser pre calentado hasta al menos 70°F [20°C], o más, y mantenido a esta temperatura mínima durante la soldadura.

La soldadura no debe realizarse cuando la temperatura ambiente es menor de -18°C, o cuando las superficies a ser soldadas están expuestas a lluvia o nieve. Para los procesos GMAW y FCAW-G (Soldadura por Arco con Núcleo de Fundente Protegida con Gas), la soldadura no debe ser ejecutada cuando la velocidad del viento exceda a 8 km/h [15].

1.2.1.3. Material de Aporte

Para cualquier conexión soldada con el código ANSI/AWS D1.4-05, la relación de resistencia entre metal base y metal de aporte que se muestra en la Tabla 1.13 debe ser usada en conjunto con la tabla del Anexo I, para determinar si se requiere metales de aporte con igual o menor resistencia.

Cuando se unen aceros de diferente grado, el metal de aporte debe ser seleccionado en base al acero de menor resistencia a la tracción.

En el presente estudio nos limitaremos a revisar los electrodos del proceso SMAW por ser el empleado en el mismo [16].

Tabla 1.13: Requerimientos de Esfuerzo del Metal de Aporte con Respecto al Metal Base

Relación de resistencia	Metal Base	Requerimientos de Resistencia del Metal de Aporte
Igual	Algún acero reforzado consigo mismo o algún acero reforzado con algún otro acero con una resistencia mínima a la tracción comparable.	Algún metal de aporte listado en el mismo grupo de resistencia de la Tabla del Anexo I.
	Algún acero reforzado de un grupo con cualquier acero reforzado u otro acero con una resistencia mínima a la tracción menor.	Algún metal de aporte listado para el mismo grupo de resistencia de la Tabla del Anexo I como el acero con menor resistencia mínima a la tracción.
Menor	Algún acero reforzado con un acero reforzado o algún acero reforzado u otro acero con una resistencia mínima a la tracción comparable.	Algún metal de aporte listado en el grupo de resistencia inmediato inferior de la Tabla del Anexo I.

Electrodos SMAW

Los electrodos de Soldadura por Arco con Electrodo Revestido – SMAW, deben cumplir los requerimientos de la última edición de ANSI/AWS A5.1, Especificación para Electrodos de Acero al Carbono para Soldadura de Arco con Electrodo Revestido, o los requerimientos de ANSI/AWS A5.5, Especificación para Electrodos de Acero de Baja Aleación para Soldaduras de Arco con Electrodo Revestido.

Condiciones de Almacenamiento de los Electrodos de Bajo Hidrógeno

Todos los electrodos que tengan recubrimiento de bajo hidrógeno, de acuerdo con ANSI/AWS A5.1 y ANSI/AWS A5.5, deben ser vendidos en contenedores herméticamente sellados o deben ser resecados antes de ser usados. Inmediatamente después de abrir el contenedor herméticamente sellado, los electrodos deben ser almacenados en hornos que mantengan una temperatura de por lo menos 120°C.

Tiempos de Exposición a la Atmosfera de los Electrodos Aprobados

Después que los contenedores herméticamente sellados son abiertos o después que los electrodos han sido removidos de los hornos de resecado o almacenamiento, la exposición del electrodo a la atmósfera no debe exceder de los valores recomendados en la Tabla 1.14, para la clasificación de electrodo específica con designaciones suplementarias opcionales, cuando sea aplicable:

Tabla 1.14: Exposición Atmosférica Permisible de Electrodo de Bajo Hidrógeno [17].

Electrodo	Columna A (Horas)	Columna B (Horas)
A5.1		
E70XX	4 máx.	
E70XXR	9 máx.	De 4 a 10 máx.
E70XXHZR	9 máx.	
E7018M	9 máx.	
A5.5		
E70XX-X	4 máx.	De 4 a 10 máx.
E80XX-X	2 máx.	De 2 a 10 máx.
E90XX-X	1 máx.	De 1 a 5 máx.
E100XX-X	1/2 máx.	De 1/2 a 4 máx.
E110XX-X	1/2 máx.	De 1/2 a 4 máx.

Los electrodos que han sido expuestos a la atmósfera por periodos menores que los permitidos por la columna A de la Tabla 1.14, pueden ser devueltos a un horno mantenido a 120°C, como mínimo; después de un período de permanencia de 4 horas a 120°C, como mínimo, los electrodos pueden ser nuevamente empleados. Electrodo que se encuentren húmedos no deben ser usados.

El tiempo de exposición alternativo de los electrodos mostrados en la columna B de la Tabla 1.14, pueden ser usados, realizando ensayos que establezcan el máximo tiempo permitido. Los ensayos deben ser ejecutados de acuerdo con la norma ANSI/AWS A5.5, subsección 3.10, para cada clasificación de electrodo y para cada fabricante.

Electrodos Resecados

Los electrodos que han sido expuestos a la atmósfera por períodos mayores a los permitidos por la Tabla 1.14, deben ser ressecados como sigue:

- (1) Todos los electrodos que tengan recubrimiento de bajo hidrógeno, de acuerdo con ANSI/AWS A5.1, deben ser ressecados por lo menos 2 horas entre 206°C y 430°C, ó
- (2) Todos los electrodos que tengan recubrimiento de bajo hidrógeno, de acuerdo con ANSI/AWS A5.5, deben ser ressecados por lo menos 1 hora entre 370°C y 430°C.

El electrodo no debe ser ressecado más de una vez.

1.2.2. Soldabilidad de Barras Corrugadas ASTM A 706

1.2.2.1. Procesos de Soldadura

Los procesos de soldadura recomendados por el código ANSI/AWS D1.4-05 para soldar barras corrugadas ASTM A 706, son los mismos que los recomendados para el caso de barras corrugadas ASTM A 615.

Otros procesos de soldadura utilizados, y que no están contenidos en el código, son: Soldadura por Vuelco [18] y [19] (Upset Welding – UW), Soldadura por Destello [20] (Flash Welding – FW), Soldadura por Termita [21] (Thermit Welding – TW) y Soldadura con Gas y Presión [22] (Pressure Gas Welding – PGW)

En este caso también utilizaremos el proceso de soldadura SMAW.

1.2.2.2. Temperatura de Pre calentamiento e Interpases

La mínima temperatura de pre calentamiento e interpases debe de estar en concordancia con la Tabla 1.12, utilizando el valor de Carbono Equivalente más alto del metal base.

El carbono equivalente (C.E.) debe ser calculado usando la composición química, como aparece en el reporte de análisis químico, por la Fórmula 1.01.

De no contarse con información de la composición química del metal base, utilizar la Tabla 1.12 con valores de carbono equivalente “sobre 0.45% hasta 0.55% inclusive”.

La soldadura no debe realizarse cuando la temperatura ambiente es menor de -18°C , o cuando las superficies a ser soldadas están expuestas a lluvia o nieve. Para los procesos GMAW y FCAW-G (Soldadura por Arco con Núcleo de Fundente Protegida con Gas), la soldadura no debe ser ejecutada cuando la velocidad del viento exceda a 8 km/h.

1.2.2.3. Material de Aporte

El material de aporte para la soldadura de barras ASTM A 706 sigue criterios similares a los empleados para la soldadura de barras ASTM A 615, los cuales se describieron anteriormente.

1.3. Consideraciones para la Especificación del Procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Specification – WPS)

1.3.1. Habilidad de Soldeo

1.3.1.1. Preparación del Material Base

Las superficies a ser soldadas deben estar libres de resaltes, rayones, fisuras u otros defectos que afecten negativamente la calidad y la resistencia de la soldadura. Las superficies a ser soldadas y las superficies adyacentes a la soldadura deben estar también libres de escamas sueltas o gruesas, escoria, óxido, humedad, grasa, recubrimiento epóxico u otro material externo que impida una soldadura adecuada o produzca humos desagradables. Escamas de laminación que soporten escobillado de alambre fuerte, una capa delgada de óxido, o un compuesto anti-salpicadura pueden quedar sobre la superficie.

Los extremos de las barras reforzadas en juntas directas a tope se les deben dar forma para constituir el canal de soldadura, por oxicorte, corte por arco con aire y carbono, por sierra u otro medio mecánico. La rugosidad del oxicorte no debe ser mayor que el límite de 50 μm definido en ANSI/ASME B46.1, Textura Superficial. La rugosidad que exceda este valor y muescas o cavidades ocasionales que no excedan 5 mm en profundidad, en otras superficies satisfactorias, deben ser removidas por mecanizado o esmerilado. Las barras para juntas directas a tope que tengan extremos cizallados deben ser cortadas por detrás del área deformada por el cizallado.

1.3.1.2. Ensamble

Los miembros de la junta deben ser alineados de tal forma que se minimice la excentricidad. Las juntas directas a tope soldadas no deben estar desalineadas en la junta más de los valores presentados en la Tabla 1.15:

Tabla 1.15: Desalineamiento Máximo Permitido en Juntas a Tope.
(Fuente ANSI/AWS D1.4-05)

N° de Designación de Barra	Desalineamiento Máximo (mm)
10 o menor	3
De 11 a 14	5
18	6

1.3.1.3. Control de Distorsión, Contracción y Calor

En el ensamble y unión de partes de una estructura o un miembro prefabricado, el procedimiento y secuencia seguidos deben minimizar la distorsión y la contracción.

Cuando la soldadura es ejecutada en barras u otros componentes estructurales que ya están insertados en concreto, una tolerancia debe ser hecha para la expansión térmica del acero, para prevenir el desmoronamiento o fisuración del concreto o una destrucción significativa de la conexión entre el concreto y el acero. El calor de la soldadura puede causar daño localizado al concreto.

1.3.1.4. Calidad de Soldadura

La calidad de la soldadura deberá cumplir con los requerimientos estipulados en la última edición del código ANSI/AWS D1.4. Subsección 4.4 – “Quality of Welds”. Este apartado se menciona más adelante, en el apartado 2.2.1.1 [23].

1.3.2. Técnica de Soldeo

Golpes de Arco

Los golpes de arco fuera de la zona de soldadura permanente deben ser evitados, especialmente en las barras de acero reforzadas.

Soldaduras de Apuntalamiento

Las soldaduras de apuntalamiento que no llegan a ser parte de soldaduras permanentes, deben ser prohibidas a menos que sean autorizadas por el ingeniero responsable. Las soldaduras de apuntalamiento deben estar sujetas a los requerimientos de soldaduras de código, incluyendo precalentamiento, selección de electrodo y criterio de aceptación de discontinuidades.

Progresión de Soldadura

Las soldaduras hechas en posición vertical, posición 3G, deben usar progresión ascendente [24].

1.3.3. Calificación de la Especificación del Procedimiento de Soldadura

1.3.3.1. Limitación de las Variables

El tamaño más grande a ser soldado en producción debe ser usado para la calificación. No se requiere la calificación para cada especificación y tipo de barra reforzada.

La calificación del WPS debe ser ejecutada usando un acero que tenga por lo menos un carbono equivalente (C.E.) igual al C.E. más alto a ser encontrado en producción. Luego, el WPS es calificado para el valor de C.E. más alto calificado y todos los valores menores.

Un cambio de aceros o barras no recubiertas a aceros o barras recubiertas, donde la capa de recubrimiento se encuentra en los 50 mm cercanos a la preparación de la junta soldada, o alguna distancia mayor requerida para prevenir que el revestimiento sea derretido y que contamine el metal de soldadura, debe requerir recalificación. (El límite de 50 mm se debería mantener para cualquier revestimiento que no será derretido y que contamine la soldadura, cuando las barras estén en el plano vertical).

Algún cambio más allá de las limitaciones de las variables esenciales de la tabla del Anexo II, debe requerir recalificación del WPS [25].

1.3.3.2. Tipos de Ensayos y sus Propósitos

Los siguientes ensayos son para determinar el esfuerzo de tracción y el grado de sanidad de las juntas soldadas hechas bajo una especificación del WPS dado:

- (1) Ensayo de Tracción de sección completa (para el esfuerzo de tracción)
- (2) Ensayo de Macroataque (para la sanidad de la soldadura) [26]

1.3.3.3. Posición de las Soldaduras de Ensayo

Las posiciones de las soldaduras pueden ser determinadas de la Figura III-1 (canal) y la Figura III-2 (filete) del Anexo III. Las posiciones de prueba están definidas en el Anexo IV. Un WPS debe ser requerido para cada posición de soldadura de producción [27].

1.3.3.4. Número, Tipo y Preparación de Ensamblajes para Ensayos

Número y Tipo de Ensamblajes para Ensayos

El número y tipo de ensamblajes que deben ser ensayados para calificar un WPS se muestra en la tabla del Anexo V.

De la Figura V-1 (C) y (D), se calcula la longitud efectiva del cordón (L_1) a través de la Fórmula 1.03:

$$L_1 = \frac{5.23 * \sigma_{MTEB} * D}{\sigma_{METW} * n} \quad (\text{Fórmula 1.03})$$

Donde:

- σ_{MTEB} : mínimo esfuerzo de tracción especificado de la barra (para barras de σ_{MTEB} desigual, utilizar el menor de los dos)
- D : diámetro de la barra sólida
- σ_{MTEW} : mínimo esfuerzo de tracción especificado del metal de soldadura
- n : número de soldaduras de canal de bisel acampanados de conexión entre una barra y dos planchas (o un ángulo)

Los ensamblajes de ensayos para soldaduras de canal en juntas en T pueden ser juntas directas a tope que tengan la misma configuración del canal como la junta en T a ser usada en construcción, o el ensamble de junta en T mostrado en la Figura V-1 (B) [28].

1.3.4. Ensayos No Destructivos

Cuando los ensayos no destructivos diferentes a la inspección visual son requeridos, debe ser indicado en la información presentada a los compradores. Esta información debe designar las soldaduras a ser examinadas, la extensión de la evaluación de cada soldadura, y el método de ensayo.

Las soldaduras ensayadas no destructivamente que no satisfagan los requerimientos del código ANSI/AWS D1.4-05 deben ser reparadas usando las provisiones aplicables del mismo.

1.3.4.1. Inspección Visual

La inspección visual debe ser realizada antes, durante y después de realizada la unión soldada. Para el caso de las barras corrugadas ASTM A 615 y ASTM A 706 se deberá buscar que la unión soldada cumpla con los requerimientos de calidad estipulados en la subsección 4.4 del código ANSI/AWS D1.4-05.

1.3.4.2. Radiografía Industrial

Cuando la evaluación radiográfica es usada, el procedimiento y la técnica deben estar en concordancia con la práctica industrial estándar. Ver la última edición del ANSI/AWS D1.1, sección 6, a excepción de 6.17, procedimiento radiográfico, para un ejemplo de tal práctica.

Los estándares de aceptación deben estar en concordancia con los puntos (2) a (8) mencionados en lo concerniente a la calidad de soldadura.

La metodología de evaluación debe estar conforme con:

- ASTM E 94, Práctica Recomendada Estándar para Ensayo Radiográfico.
- ASTM E 142, Método Estándar para Controlar la Calidad del Ensayo Radiográfico.
- ASTM E 747, Control de Calidad del Ensayo Radiográfico usando Penetrámetros Tipo Alambre.
- ASTM E 1032, Evaluación Radiográfica de Soldaduras.

1.3.4.3. Partículas Magnéticas

Cuando un ensayo por partículas magnéticas es usado, el procedimiento y técnica deben estar en concordancia con ASTM E 709, Práctica Estándar para Evaluación por Partículas Magnéticas, y el estándar de aceptación debe estar en concordancia con el apartado calidad de soldadura.

1.3.4.4. Líquidos Penetrantes

Para detectar discontinuidades que están abiertas a la superficie, la inspección por líquidos penetrantes puede ser usada. Los métodos estándar explicados en ASTM E

165, Práctica Estándar para Inspección por Líquidos Penetrantes, deben ser usados para la inspección por líquidos penetrantes, y los estándares de aceptación deben estar en concordancia con el apartado calidad de soldadura.

1.3.4.5. Ultrasonido Industrial

La inspección por ultrasonido industrial de las juntas directas a tope en barras corrugadas reforzadas no es considerada factible, excepto por técnicas altamente especializadas, y no es recomendada [29].

1.3.5. Otros Ensayos

1.3.5.1. Barrido de Durezas

El barrido de durezas en la junta soldada se realiza posterior al ensayo de macroataque con el cual se determina las zonas en la unión soldada (material de aporte, línea de fusión, zona afectada por el calor – ZAC y material base). Se realiza la medición con dureza Vickers, debido al pequeño tamaño de la zona afectada por el calor. Los pasos para la medición de durezas se realizan de acuerdo con la norma ASTM E 92 Método de Ensayo Estándar para Dureza Vickers de Materiales Metálicos.

1.3.5.2. Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico de las uniones soldadas se utilizan los criterios acotados por las siguientes normas:

- ASTM E 3, Preparación de Especímenes Metalográficos.
- ASTM E 7, Terminología de Metalografía.
- ASTM E 45, Determinación de Contenido de Inclusiones en el Acero.
- ASTM E 112, Determinación del Tamaño de Grano Promedio.
- ASTM E 340, Macroataque de Metales y Aleaciones.
- ASTM E 407, Microataque de Metales y Aleaciones.

1.3.6. Esfuerzos Admisibles

1.3.6.1. Esfuerzos en el Material Base

Los esfuerzos admisibles en el metal base deben ser aquellos especificados en el código aplicable o especificación general para la construcción de concreto reforzado.

1.3.6.2. Esfuerzos Admisibles en la Soldadura

Excepto como está modificado por el Anexo V, los esfuerzos admisibles para soldaduras de canal o en bisel en V de juntas de penetración completa, en juntas directas a tope sujetas a tracción o compresión deben ser igual a los correspondientes esfuerzos admisibles para el metal base de acero reforzado, considerando que el metal de aporte usado tenga una clasificación de resistencia por lo menos igual al esfuerzo de tracción del metal base a ser soldado.

Los esfuerzos admisibles para soldaduras de filete, soldaduras de canal en bisel acampanado y soldaduras de canal en V acampanado, deben estar en concordancia con la Tabla del Anexo VI.

1.3.6.3. Áreas, Longitudes, Gargantas y Dimensiones Efectivas de Soldadura

- (1) Soldaduras en canal de juntas de penetración completa en juntas directas a tope.- El área de soldadura efectiva debe ser el área de sección transversal nominal de la barra a ser soldada (ver Figura VI-2). Si barras de diferente tamaño son soldadas, el área de soldadura debe estar basada en la barra de menor tamaño.
- (2) Soldaduras en canal con bisel acampanado y en V acampanada.- El área de soldadura efectiva debe ser la longitud de soldadura efectiva multiplicada por el tamaño de soldadura efectivo (ver Anexo VII).
- (3) Soldaduras en filete.- El área de soldadura efectiva debe ser la longitud de soldadura efectiva multiplicada por la garganta efectiva (El esfuerzo en las soldaduras en filete debe ser considerado como aplicado a ésta área de soldadura efectiva, para cualquier dirección de carga aplicada) [30].

2. ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

Los procedimientos de soldadura se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos por el código ANSI/AWS D1.4-05 y las recomendaciones del fabricante del material de aporte, SOLDEXA S.A. (Electrodo Revestido E8018-C3, ver Anexo VIII).

El tipo de junta escogida para este estudio fue seleccionada de las juntas recomendadas por el código AWS D1.4 – 05, por ser la más empleada en nuestro medio, según lo consideran los especialistas de la construcción, es decir, ingenieros de la sección Ingeniería Civil consultados. La Figura 2.01, muestra el tipo de junta utilizada.

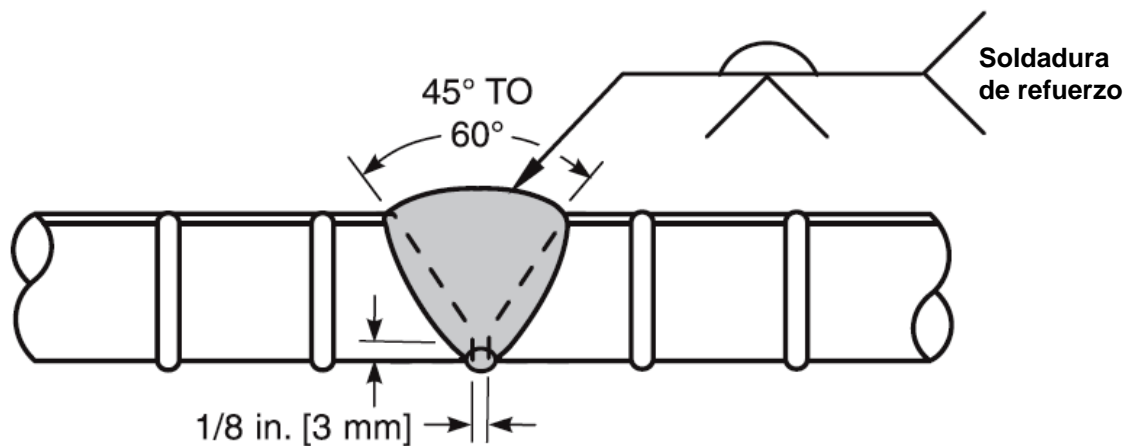


Figura 2.01: Diseño de Junta a emplear [31].

Los tipos de uniones se describen a continuación:

- Barra de 3/8"**, Junta Directa a Tope – Soldadura de Canal en V Simple. Posición de Soldadura: 1G.
- Barra de 5/8"**, Junta Directa a Tope – Soldadura de Canal en V Simple. Posición de Soldadura: 1G.
- Barra de 3/4"**, Junta Directa a Tope – Soldadura de Canal en V Simple. Posición de Soldadura: 1G.
- Barra de 1"**, Junta Directa a Tope – Soldadura de Canal en V Simple. Posición de Soldadura: 1G

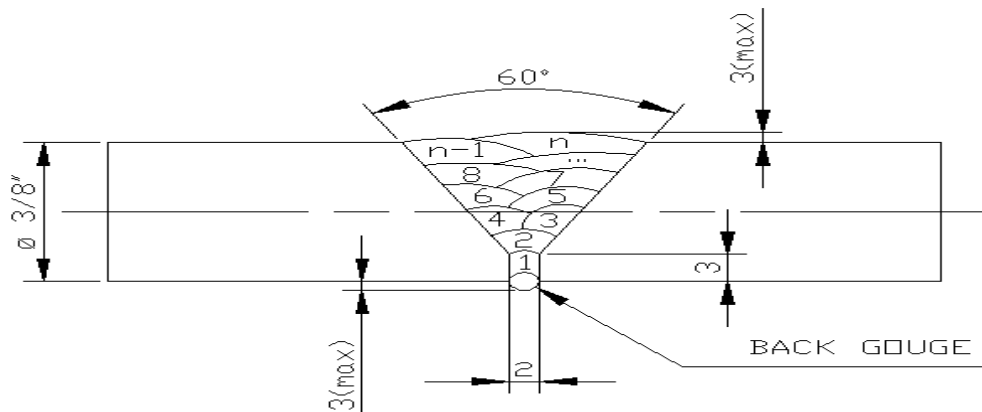
2.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

2.1.1. Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/8"

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE- REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60
Tamaño de Barra	N° 3 (φ 3/8")
Material de Respaldo	-----
Tamaño de Respaldo	-----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0,36
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Progresión Vertical	-----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación del Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	-----
Rango del Flujo de Gas	-----
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Tratamiento de la Raíz	Posición de soldadura 1G
Pre calentamiento y Temperatura Interpase	-----
Limpieza	Con escobilla metálica: Inicial e Interpases Con esmeril: Previo a Soldadura de refuerzo

Pase No.	Tamaño Electrodo	Corriente de soldadura		Velocidad (cm/min)	Calor de Aporte (kJ/cm)
		Amperaje	Voltaje		
1 – n*	3/32"	75 – 85	20 – 25	20 – 30	3,0 – 6,3
Soldadura de Refuerzo (Back Gauge)	3/32"	75 – 85	20 – 25	20 – 25	3,0 – 6,3

(*) n recomendado = 2.



EXCENTRICIDAD MAXIMA = 3 mm.

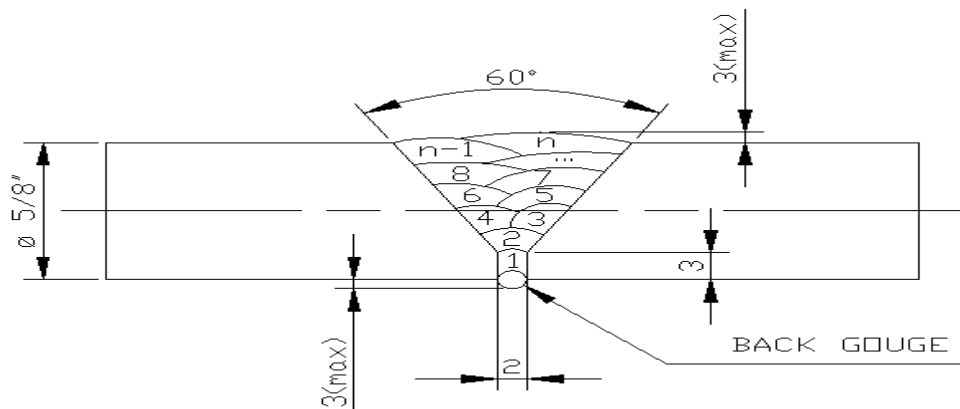
Figura 2.02: Detalle geométrico de la junta soldada de barra de 3/8".

2.1.2. Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8"

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE- REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60
Tamaño de Barra	N° 5 (φ 5/8")
Material de Respaldo	----
Tamaño de Respaldo	----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0,51
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Progresión Vertical	----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación del Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	----
Rango del Flujo de Gas	----
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Tratamiento de la Raíz	Posición de soldadura 1G
Pre calentamiento y Temperatura Interpase	----
Limpieza	Con escobilla metálica: Inicial e Interpases Con esmeril: Previo a Soldadura de refuerzo

Pase No.	Tamaño Electrodo	Corriente de soldadura		Velocidad (cm/min)	Calor de Aporte (kJ/cm)
		Amperaje	Voltaje		
1 – n*	3/32"	75 - 85	20 – 25	20 – 30	3,0 – 6,3
Soldadura de Refuerzo (Back Gauge)	3/32"	75 - 85	20 – 25	20 – 30	3,0 – 6,3

(*) n recomendado = 3.



EXCENTRICIDAD MAXIMA = 3 mm.

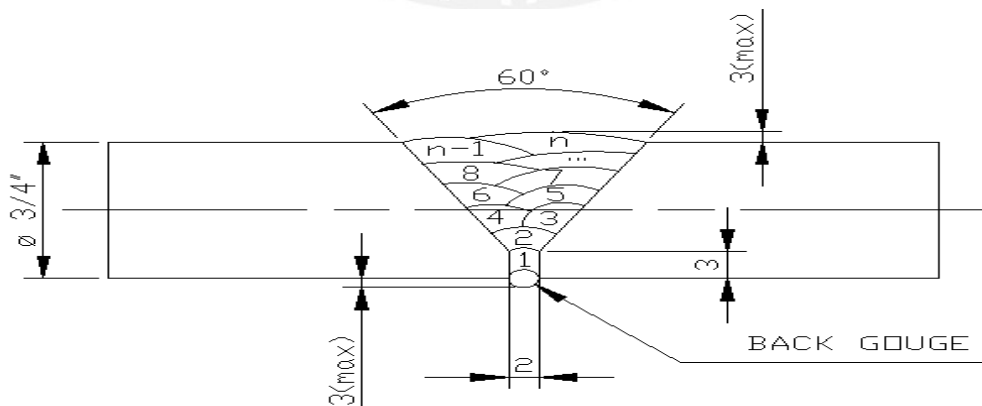
Figura 2.03: Detalle geométrico de la junta soldada de barra de 5/8".

2.1.3. Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4"

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE- REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60
Tamaño de Barra	N° 6 (φ 3/4")
Material de Respaldo	----
Tamaño de Respaldo	----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0,51
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Progresión Vertical	----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación del Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	----
Rango del Flujo de Gas	----
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Tratamiento de la Raíz	Posición de soldadura 1G
Pre calentamiento y Temperatura Interpase	----
Limpieza	Con escobilla metálica: Inicial e Interpases Con esmeril: Previo a Soldadura de refuerzo

Pase No.	Tamaño Electrodo	Corriente de soldadura		Velocidad (cm/min)	Calor de Aporte (kJ/cm)
		Amperaje	Voltaje		
1 - n*	1/8"	115 - 130	20 - 25	20 - 30	4,6 - 9,7
Soldadura de Refuerzo (Back Gauge)	1/8"	115 - 130	20 - 25	20 - 30	4,6 - 9,7

(*) n recomendado = 4.



EXCENRICIDAD MAXIMA = 3 mm.

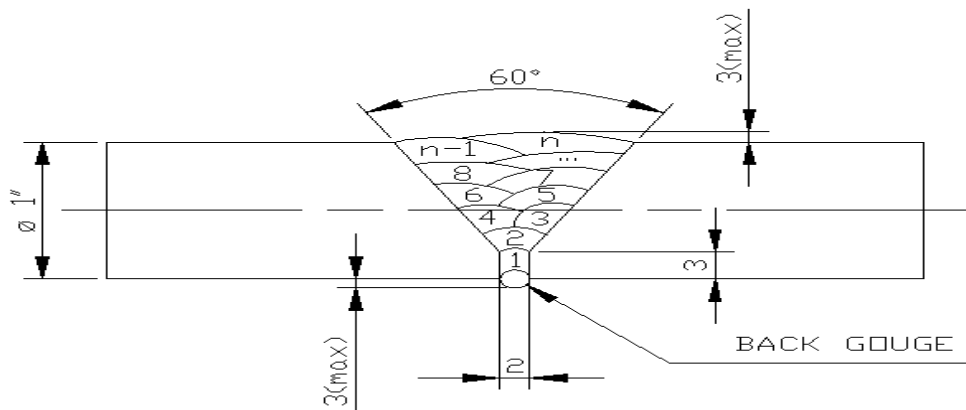
Figura 2.04: Detalle geométrico de la junta soldada de barra de 3/4".

2.1.4. Procedimiento de Soldadura para Barra de 1"

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60
Tamaño de Barra	N° 8 (φ 1")
Material de Respaldo	----
Tamaño de Respaldo	----
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0,51
Manual o Mecánica	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Progresión Vertical	----
Especificación del Material de Aporte	ANSI/AWS A5.5-96
Clasificación del Material de Aporte	E8018-C3
Gas de Protección	----
Rango del Flujo de Gas	----
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Tratamiento de la Raíz	Posición de soldadura 1G
Pre calentamiento y Temperatura Interfase	----
Limpieza	Con escobilla metálica: Inicial e Interpases Con esmeril: Previo a Soldadura de refuerzo

Pase No.	Tamaño Electrodo	Corriente de soldadura		Velocidad (cm/min)	Calor de Aporte (kJ/cm)
		Amperaje	Voltaje		
1 – n*	1/8"	115 - 130	20 – 25	20 – 30	4,6 - 9,7
Soldadura de Refuerzo (Back Gauge)	1/ 8"	115 - 130	20 – 25	20 – 30	4,6 – 9,7

(*) n recomendado = 5.



EXCENTRICIDAD MAXIMA = 3 mm.

Figura 2.05: Detalle geométrico de la junta soldada de barra de 1".

Los parámetros de soldadura utilizados en la calificación de los WPS's y los calores de aporte utilizados se presentan a continuación.

Barra Corrugada de 3/8":

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Tracción A	1	75	83	21	24	Tracción B	1	75	80	20	23
	2	76	85	20	23		2	76	81	20	24
	Refuerzo	75	80	22	25		Refuerzo	75	78	21	24

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Macro A	1	76	81	22	25	Macro B	1	75	85	20	25
	2	78	83	21	25		2	78	83	21	25
	Refuerzo	76	82	20	25		Refuerzo	75	84	20	24

Barra Corrugada de 5/8":

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Tracción A	1	75	85	20	25	Tracción B	1	75	85	20	25
	2	78	84	22	24		2	78	85	21	24
	3	79	75	22	25		3	80	85	21	24
	Refuerzo	75	80	21	24		Refuerzo	75	81	20	24

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Macro A	1	75	85	20	25	Macro B	1	75	85	20	25
	2	78	83	21	24		2	77	84	20	24
	3	79	85	21	25		3	78	83	21	24
	Refuerzo	75	80	20	24		Refuerzo	75	81	20	24

Barra Corrugada de 3/4”:

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Tracción A	1	124	128	20	23	Tracción B	1	118	123	21	24
	2	126	130	22	25		2	117	122	22	23
	3	120	125	22	25		3	118	120	21	23
	4	121	125	22	24		4	118	121	22	24
	Refuerzo	124	128	21	24		Refuerzo	122	123	21	24

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Macro A	1	121	123	20	22	Macro B	1	117	125	20	23
	2	121	126	20	23		2	116	121	21	23
	3	117	124	20	24		3	116	125	20	22
	4	116	125	21	23		4	117	124	21	24
	Refuerzo	118	122	20	21		Refuerzo	116	122	21	22

Barra Corrugada de 1”:

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Tracción A	1	121	125	21	25	Tracción B	1	119	122	20	22
	2	121	126	21	24		2	118	122	20	22
	3	122	126	20	22		3	120	124	20	24
	4	116	119	20	22		4	122	125	22	24
	5	116	125	20	23		5	120	124	22	24
	Refuerzo	123	126	21	22		Refuerzo	120	126	21	22

Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)		Probeta	Pase N°	Corriente (A)		Voltaje (V)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Macro A	1	119	123	21	24	Macro B	1	117	125	20	23
	2	122	126	20	23		2	118	125	20	21
	3	117	123	20	22		3	116	120	20	21
	4	119	123	20	22		4	116	121	21	24
	5	117	119	21	23		5	116	122	20	24
	Refuerzo	123	127	20	23		Refuerzo	121	126	20	23

2.2. Ensayos de Calificación de los Procedimientos de Soldadura

2.2.1. Ensayos de Calificación según Código ANSI/AWS D1.4-05

2.2.1.1. Inspección Visual

La inspección visual debe ser realizada antes, durante y después de realizada la unión soldada [32]:

(1) Antes de la soldadura, verificar:

- a. Preparación de la junta, dimensiones y limpieza.
- b. Dimensiones libres de laminas de respaldo, anillos o insertos consumibles.
- c. Alineamiento y encaje de las partes a ser soldadas.
- d. Proceso de soldadura y ajuste de máquina.
- e. Temperatura de precalentamiento especificada.
- f. Calidad de la soldadura de apuntalamiento.

(2) Durante la soldadura, verificar:

- a. Tratamiento de las soldaduras de apuntalamiento.
- b. Calidad del pase de raíz y las capas de soldadura siguientes.
- c. Temperatura de precalentamiento e interpases adecuada.
- d. Secuencia de pases de soldadura.
- e. Limpieza interpases.
- f. Condiciones de la raíz previa a la soldadura del segundo lado.
- g. Distorsión.
- h. Conformidad con el procedimiento de soldadura aplicable.

(3) Después de la soldadura, verificar:

- a. Apariencia final de la soldadura.
- b. Tamaño final de la soldadura.
- c. Extensión de la soldadura.

- d. Discontinuidades: fisuras, mordeduras, traslape, porosidad e inclusiones de escoria expuestas, refuerzo inaceptable y no uniformidad de las caras de soldadura.
- e. Exactitud dimensional.
- f. Cantidad de distorsión.
- g. Tratamiento térmico post-soldadura.

Criterios de Aceptación para las Barras Corrugadas ASTM A615 y ASTM A706

Las soldaduras que no satisfagan los requerimientos de calidad de (1) a (8) inclusive, deben ser reparadas por remoción de las porciones inaceptables o por una nueva soldadura, la que sea aplicable.

- (1) Los perfiles de soldadura a tope deben estar conforme a la Figura (D) del Anexo IX. El refuerzo (R) de la soldadura a tope no debe exceder los 3mm.
- (2) Las soldaduras no deben tener fisuras ni en el metal de soldadura, ni en la zona afectada por el calor.
- (3) Debe haber fusión completa entre el metal de soldadura y el metal base, y entre los pases sucesivos de soldadura.
- (4) Todos los cráteres deben ser llenados hasta la sección transversal completa de la soldadura.
- (5) La soldadura debe estar libre de traslapes.
- (6) Profundidades de mordedura mayores a 1mm, en la sección sólida de la barra, no deben ser permitidas.
- (7) La suma de los diámetros de las porosidades vermiculares en las soldaduras de bisel acampanado y de filete no debe exceder a 10mm, en cualquier longitud de 25mm de soldadura, y no debe exceder de 14mm en cualquier longitud de 150mm de soldadura.
- (8) Cuando la inspección radiográfica de juntas directas a tope sea requerida, la máxima dimensión de alguna porosidad aislada o discontinuidad tipo fusión, o la suma de las máximas dimensiones de todas las porosidades o discontinuidades tipo fusión, no debe exceder los límites establecidos por la Tabla 2.01:

Tabla 2.01: Criterio de Aceptación Radiográfico para Soldaduras de Barras Corrugadas.

(Fuente ANSI/AWS D1.4-05)

Tamaño de Barra	Suma de Dimensiones de Discontinuidades		Dimensión de Discontinuidad Aislada	
	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
8 [25]	3/16	5	1/8	3
9 [29]	3/16	5	1/8	3
10 [32]	1/4	6	1/8	3
11 [36]	1/4	6	3/16	5
14 [43]	5/16	8	3/16	5
18 [57]	7/16	11	1/4	6

Nota: El criterio de aceptación para tamaños de barra menores que la N° 8, debe ser establecido por el ingeniero responsable.

Cuando la evaluación radiográfica es usada, el procedimiento y la técnica deben estar en concordancia con la práctica industrial estándar. Ver la última edición del ANSI/AWS D1.1, sección 6, excepto para 6.17, procedimiento radiográfico, para un ejemplo de tal práctica. Los estándares de aceptación deben estar en concordancia con los puntos (2) a (8) antes mencionados.

Nota: La inspección de las soldaduras de canal, en bisel acampanado y en V acampanado, o de filete por el método de evaluación radiográfica es, en general, considerada no factible, excepto por técnicas altamente especializadas, y no es recomendada.

- (9) Reparaciones de soldaduras hechas con SMAW, GMAW, FCAW deben ser hechas en concordancia con un WPS calificado, aprobado por un ingeniero y aplicable a estos procesos.
- (10) El tamaño de soldadura debe ser igual o mayor que el tamaño de soldadura especificado. La longitud de soldadura que contiene este tamaño de soldadura debe ser igual o mayor que la longitud de soldadura especificada. Cualquier porción de la longitud, incluyendo inicios y paradas, que contengan un tamaño de soldadura menor, no debe ser considerado en la longitud de soldadura [33].

2.2.1.2. Ensayo de Tracción

Probeta para Ensayo

La longitud mínima de los ensambles para ensayos de tracción de Juntas Directas a Tope será, a menos que una longitud mayor sea requerida para el ensayo, de por lo menos 16 veces el diámetro de la barra, con la soldadura localizada en el centro. Tal como se aprecia en la Figura 2.06 [34]:

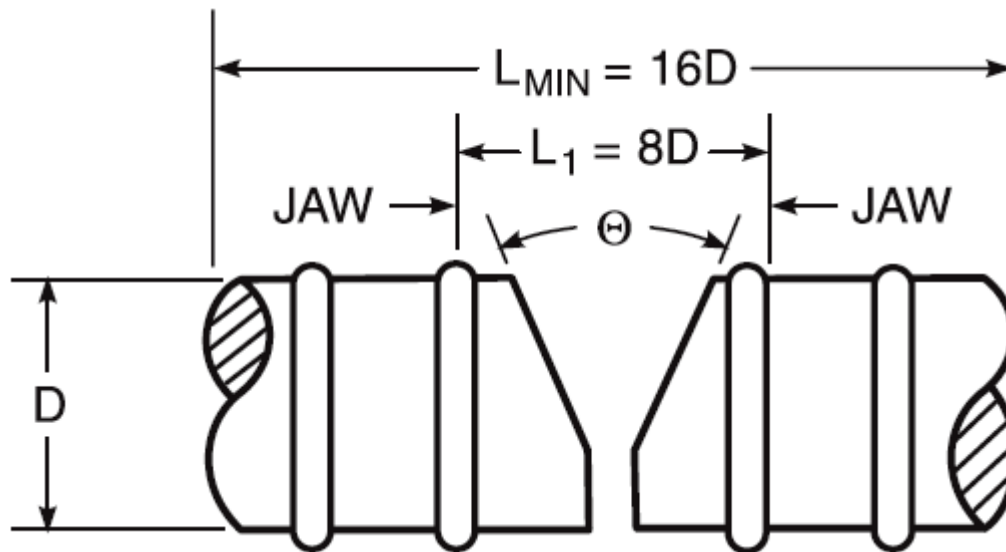


Figura 2.06: Probeta para Ensayo de Tracción de Junta Directa a Tope.

Método de Ensayo de la Probeta

La distancia mínima entre las mordazas de la maquina debe ser igual al menos a 8 veces el diámetro de la barra, para juntas directas a tope.

Las probetas deben ser rotas bajo carga de tracción, y la máxima carga debe ser determinada. El esfuerzo de tracción debe ser obtenido dividiendo la máxima carga entre el área transversal nominal de la barra [35].

Criterio de Aceptación

El esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado del tipo y grado de barra a ser unido, a menos que se encuentre especificado de otra manera por la especificación general. Debido a que el esfuerzo de fluencia mínimo especificado para las barras corrugadas ASTM A615 y ASTM A706 es de 420 MPa, el esfuerzo de tracción no deberá ser menor a 525 MPa [36].

2.2.1.3. Ensayo de Macroataque

Las probetas para el ensayo de macroataque, de juntas directas a tope, deben ser preparadas de la siguiente manera:

- El ensamble debe ser cortado mecánicamente en una posición transversal a la dirección de soldadura.
- La probeta de ensayo debe mostrar la sección de cruce longitudinal completa de la soldadura, la raíz de la soldadura y algún refuerzo (ver Figura 2.07).

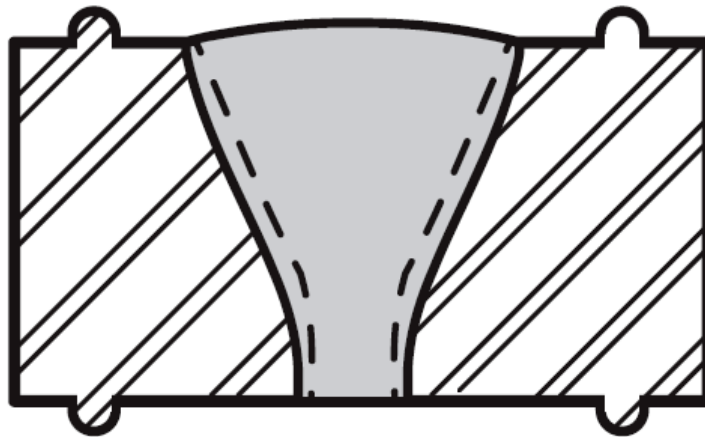


Figura 2.07: Probeta para Ensayo de Macroataque de Junta Directa a Tope.

Método de Ensayo de la Probeta

Todas las secciones transversales deben ser pulidas y atacadas con una solución adecuada para dar una clara definición a la soldadura [37]. El procedimiento utilizado se describe en el Anexo X.

Criterio de Aceptación

La probeta debe ser examinada en busca de discontinuidades, y cualquiera que tenga discontinuidades prohibidas por el apartado 2.2.1.1, sobre el criterio de aceptación para las barras corrugadas ASTM A615 y ASTM A706, debe ser considerada como fallida. Las secciones transversales atacadas deben tener penetración completa con el metal base, para soldadura de canal simple en V o doble V. Para soldaduras de canal con bisel acampanado y en V acampanada, el tamaño de la soldadura designado debe ser obtenido [38].

2.2.2. Ensayos Complementarios

2.2.2.1. Barrido de Durezas (HV)

La finalidad de este ensayo es identificar las zonas duras como consecuencia del cambio microestructural provocado por el aporte térmico y la velocidad de enfriamiento. La superficie debe estar debidamente preparada, debe presentar plenitud y paralelismo entre la superficie a indentar y la superficie de apoyo.

2.2.2.2. Análisis Micrográfico

El objetivo de este ensayo es evaluar los cambios microestructurales que se produzcan en los metales base, producto del aporte de calor propio del proceso de soldadura, identificando zonas perjudiciales para el componente, es decir, zonas frágiles. Para el análisis micrográfico de las uniones soldadas se utilizarán los criterios acotados por las normas mencionadas en el apartado 1.3.5.1 Análisis Metalográfico. El procedimiento utilizado se describe en el Anexo X.

3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización del Material Base

3.1.1. Barra Corrugada BELGO 60 de 3/8"

3.1.1.1. Análisis Químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de 3/8" se presenta en la Tabla 3.01:

Tabla 3.01: Composición Química de la Barra.

Muestra	% en Volumen									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
3/8"	0,13	1,30	0,18	0,019	0,032	0,05	0,05	0,01	0,22	0,01

En la Tabla 3.02 se compara los requerimientos de composición química estipulados en las normas ASTM A615 y ASTM A706, para la verificación del producto:

Tabla 3.02: Comparación de Composición Química de la Muestra de la Barra.

Elemento	Muestra	ASTM A615 % máximo	Observación	ASTM A706 %máximo	Observación
Carbono	0,13	-----	CONFORME	0,33	CONFORME
Manganeso	1,30	-----	CONFORME	1,56	CONFORME
Fósforo	0,019	0,075	CONFORME	0,043	CONFORME
Azufre	0,032	-----	CONFORME	0,053	CONFORME
Silicio	0,18	-----	CONFORME	0,55	CONFORME

La barra corrugada de 3/8" cumple con los requerimientos de elementos de aleación especificados por las normas de producto ASTM A615 y el ASTM A706.

3.1.1.2. Peso Lineal

En la Tabla 3.03 se compara el resultado del peso lineal de las barras con las especificaciones de las normas de producto:

Tabla 3.03: Comparación del Peso Lineal de Barra Corrugada

Muestra	Peso Lineal (kg/m)	Peso Lineal Nominal (kg/m)		Peso Lineal Mínimo = 94% (kg/m)
		ASTM A615	ASTM A706	
3/8"	0,531	0,560	0,560	0,5264

La muestra cumple con el requerimiento de Peso Lineal establecidos por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.1.3. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción se muestra en la Tabla 3.04:

Tabla 3.04: Resultado de Ensayo de Tracción a Barra Corrugada

MUESTRA		3/8"	REQUERIMIENTO		OBSERVACIÓN
Área (mm ²)		71,0			
Cargas (kN)	Fluencia	35,9	ASTM A615	ASTM A706	
	Máxima	46,4			
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	506	420 mín.	420 – 540	CONFORME
	Máxima	654	620 mín.	550	CONFORME
Longitud entre marcas (mm)		203,2			
Longitud final entre marcas (mm)		236,0			
Alargamiento (%)		16,1	9 mín.	14	CONFORME

Norma de Ensayo: ASTM A370-09.

La muestra cumple con los requerimientos de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y alargamiento especificados por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.1.4. Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado se realizó obteniendo una superficie libre de fisuración en la cara exterior de doblado, por lo que cumple con los requerimientos de ASTM A615 y ASTM A706.

Los resultados del ensayo de doblado se muestran en las Figuras 3.01 y 3.02.



Figura 3.01: Probeta de doblado de barra de 3/8" ensayada.



Figura 3.02: Superficie de la cara exterior de la probeta de doblado de barra de 3/8".

3.1.2. Barra Corrugada BELGO 60 de 5/8"

3.1.2.1. Análisis Químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de 5/8" se presenta en la Tabla 3.05:

Tabla 3.05: Composición Química de la Barra.

Muestra	% en Volumen									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
5/8"	0,28	1,32	0,22	0,026	0,022	0,06	0,06	0,01	0,25	0,01

En la Tabla 3.06 se compara los requerimientos de composición química estipulados en las normas ASTM A615 y ASTM A706, para la verificación del producto:

Tabla 3.06: Comparación de Composición Química de la Muestra de la Barra.

Elemento	Muestra	ASTM A615 % máximo	Observación	ASTM A706 %máximo	Observación
Carbono	0,28	-----	CONFORME	0,33	CONFORME
Manganeso	1,32	-----	CONFORME	1,56	CONFORME
Fósforo	0,026	0,075	CONFORME	0,043	CONFORME
Azufre	0,022	-----	CONFORME	0,053	CONFORME
Silicio	0,22	-----	CONFORME	0,55	CONFORME

La barra corrugada de 5/8" cumple con los requerimientos de elementos de aleación especificados por las normas de producto ASTM A615 y el ASTM A706.

3.1.2.2. Peso Lineal

En la Tabla 3.07 se compara el resultado del peso lineal de las barras con las especificaciones de las normas de producto:

Tabla 3.07: Comparación del Peso Lineal de Barra Corrugada

Muestra	Peso Lineal (kg/m)	Peso Lineal Nominal (kg/m)		Peso Lineal Mínimo = 94% (kg/m)
		ASTM A615	ASTM A706	
5/8"	1,492	1,552	1,552	1,458

La muestra cumple con el requerimiento de peso lineal establecidos por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.2.3. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción se muestra en la Tabla 3.08:

Tabla 3.08: Resultado de Ensayo de Tracción a Barra Corrugada

MUESTRA		5/8"	REQUERIMIENTO		OBSERVACIÓN
Área (mm ²)		199,0			
Cargas (kN)	Fluencia	99,7	ASTM A615	ASTM A706	
	Máxima	133,9			
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	501	420 mín.	420 – 540	CONFORME
	Máxima	673	620 mín.	550	CONFORME
Longitud entre marcas (mm)		203,2			
Longitud final entre marcas (mm)		236,5			
Alargamiento (%)		16,4	9 mín.	14	CONFORME

Norma de Ensayo: ASTM A370-09.

La muestra cumple con los requerimientos de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y alargamiento especificados por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.2.4. Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado se realizó obteniendo una superficie libre de fisuración en la cara exterior de doblado, por lo que cumple con los requerimientos de ASTM A615 y ASTM A706.

Los resultados del ensayo de doblado se muestran en las Figuras 3.03 y 3.04.



Figura 3.03: Probeta de doblado de barra de 5/8" ensayada.



Figura 3.04: Superficie de la cara exterior de la probeta de doblado de barra de 5/8".

3.1.3. Barra Corrugada BELGO 60 de 3/4"

3.1.3.1. Análisis Químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de 3/4" se presenta en la Tabla 3.09:

Tabla 3.09: Composición Química de la Barra.

Muestra	% en Volumen									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
3/4"	0,29	1,31	0,17	0,024	0,034	0,05	0,07	0,01	0,21	0,01

En la Tabla 3.10 se compara los requerimientos de composición química estipulados en las normas ASTM A615 y ASTM A706, para la verificación del producto:

Tabla 3.10: Comparación de Composición Química de la Muestra de la Barra.

Elemento	Muestra	ASTM A615 % máximo	Observación	ASTM A706 %máximo	Observación
Carbono	0,29	-----	CONFORME	0,33	CONFORME
Manganeso	1,31	-----	CONFORME	1,56	CONFORME
Fósforo	0,024	0,075	CONFORME	0,043	CONFORME
Azufre	0,034	-----	CONFORME	0,053	CONFORME
Silicio	0,17	-----	CONFORME	0,55	CONFORME

La barra corrugada de 3/4" cumple con los requerimientos de elementos de aleación especificados por las normas de producto ASTM A615 y el ASTM A706.

3.1.3.2. Peso Lineal

En la Tabla 3.11 se compara el resultado del peso lineal de las barras con las especificaciones de las normas de producto:

Tabla 3.11: Comparación del Peso Lineal de Barra Corrugada

Muestra	Peso Lineal (kg/m)	Peso Lineal Nominal (kg/m)		Peso Lineal Mínimo = 94% (kg/m)
		ASTM A615	ASTM A706	
3/4"	2,141	2,235	2,235	2,101

La muestra cumple con el requerimiento de peso lineal establecidos por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.3.3. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción se muestra en la Tabla 3.12:

Tabla 3.12: Resultado de Ensayo de Tracción a Barra Corrugada

MUESTRA		3/4"	REQUERIMIENTO		OBSERVACIÓN
Área (mm ²)		284,0	ASTM A615	ASTM A706	
Cargas (kN)	Fluencia	134,3			
	Máxima	184,1			
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	473	420 mín.	420 – 540	CONFORME
	Máxima	648	620 mín.	550	CONFORME
Longitud entre marcas (mm)		203,2			
Longitud final entre marcas (mm)		236,5			
Alargamiento (%)		16,4	9 mín.	14	CONFORME

Norma de Ensayo: ASTM A370-09.

La muestra cumple con los requerimientos de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y alargamiento especificados por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.3.4. Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado se realizó obteniendo una superficie libre de fisuración en la cara exterior de doblado, por lo que cumple con los requerimientos de ASTM A615 y ASTM A706.

Los resultados del ensayo de doblado se muestran en las Figuras 3.05 y 3.06.



Figura 3.05: Probeta de doblado de barra de 3/4" ensayada.



Figura 3.06: Superficie de la cara exterior de la probeta de doblado de barra de 3/4".

3.1.4. Barra Corrugada BELGO 60 de 1"

3.1.4.1. Análisis Químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de 1" se presenta en la Tabla 3.13:

Tabla 3.13: Composición Química de la Barra.

Muestra	% en Volumen									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
1"	0,28	1,34	0,23	0,019	0,031	0,06	0,06	0,01	0,14	0,01

En la Tabla 3.14 se compara los requerimientos de composición química estipulados en las normas ASTM A615 y ASTM A706, para la verificación del producto:

Tabla 3.14: Comparación de Composición Química de la Muestra de la Barra.

Elemento	Muestra	ASTM A615 % máximo	Observación	ASTM A706 %máximo	Observación
Carbono	0,28	-----	CONFORME	0,33	CONFORME
Manganeso	1,34	-----	CONFORME	1,56	CONFORME
Fósforo	0,019	0,075	CONFORME	0,043	CONFORME
Azufre	0,031	-----	CONFORME	0,053	CONFORME
Silicio	0,23	-----	CONFORME	0,55	CONFORME

La barra corrugada de 1" cumple con los requerimientos de elementos de aleación especificados por las normas de producto ASTM A615 y el ASTM A706.

3.1.4.2. Peso Lineal

En la Tabla 3.15 se compara el resultado del peso lineal de las barras con las especificaciones de las normas de producto:

Tabla 3.15: Comparación del Peso Lineal de Barra Corrugada

Muestra	Peso Lineal (kg/m)	Peso Lineal Nominal (kg/m)		Peso Lineal Mínimo = 94% (kg/m)
		ASTM A615	ASTM A706	
1"	3,839	3,973	3,973	3,735

La muestra cumple con el requerimiento de peso lineal establecidos por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.4.3. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción se muestra en la Tabla 3.16:

Tabla 3.16: Resultado de Ensayo de Tracción a Barra Corrugada

MUESTRA		1"	REQUERIMIENTO		OBSERVACIÓN
Área (mm ²)		510,0	ASTM A615	ASTM A706	
Cargas (kN)	Fluencia	245,9			
	Máxima	333,6			
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	482	420 mín.	420 – 540	CONFORME
	Máxima	654	620 mín.	550	CONFORME
Longitud entre marcas (mm)		203,2			
Longitud final entre marcas (mm)		237,0			
Alargamiento (%)		16,6	9 mín.	14	CONFORME

Norma de Ensayo: ASTM A370-09.

La muestra cumple con los requerimientos de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y alargamiento especificados por las normas ASTM A615 y ASTM A706.

3.1.4.4. Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado se realizó obteniendo una superficie libre de fisuración en la cara exterior de doblado, por lo que cumple con los requerimientos de ASTM A615 y ASTM A706.

Los resultados del ensayo de doblado se muestran en las Figuras 3.07 y 3.08.



Figura 3.07: Probeta de doblado de barra de 1" ensayada.



Figura 3.08: Superficie de la cara exterior de la probeta de doblado de barra de 1".

3.2. Ensayos para la Calificación de los Procedimientos de Soldadura

3.2.1. Ensayos de Calificación del WPS según ANSI/AWS D1.4 – 05

3.2.1.1. Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 3/8"

3.2.1.1.1. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción a la probeta soldada se muestra en la Tabla 3.17:

Tabla 3.17: Resultado de Ensayo de Tracción de Probeta Soldada.

Muestra	Esfuerzo de Tracción (MPa)	Esfuerzo de Tracción Mínimo Requerido (MPa)	Observación
3/8" - A	644	525	CONFORME
3/8" - B	594	525	CONFORME

Ambas muestras cumplen con el requerimiento, el cual estipula que el esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, es decir, no debe ser menor a 525 MPa.

Una copia del informe de los ensayos realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales se encuentra en el Anexo XI.

3.2.1.1.2. Ensayo de Macroataque

El ensayo de macroataque se realizó a la probeta debidamente preparada, así como se muestra en las Figuras 3.09 y 3.10.

El resultado del ensayo de macroataque se presenta en la Tabla 3.18:

Tabla 3.18: Resultados del Ensayo de Macrografía a Probeta Soldada.

Muestra	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
3/8" – A	PA	MA	1,5	Σ máx.=10mm	CONFORME
	PA	MA	0,6		CONFORME
	EA	MA	1,2		CONFORME
3/8" – B	PA	MA	0,4	Σ máx.=10mm	CONFORME
	PA	MA	0,2		CONFORME

Leyenda:

PA: Porosidad Aislada

MA: Metal de Aporte

EA: Inclusión de Escoria

LF: Línea de Fusión



Figura 3.09: Micrografía de la muestra 3/8" – A.

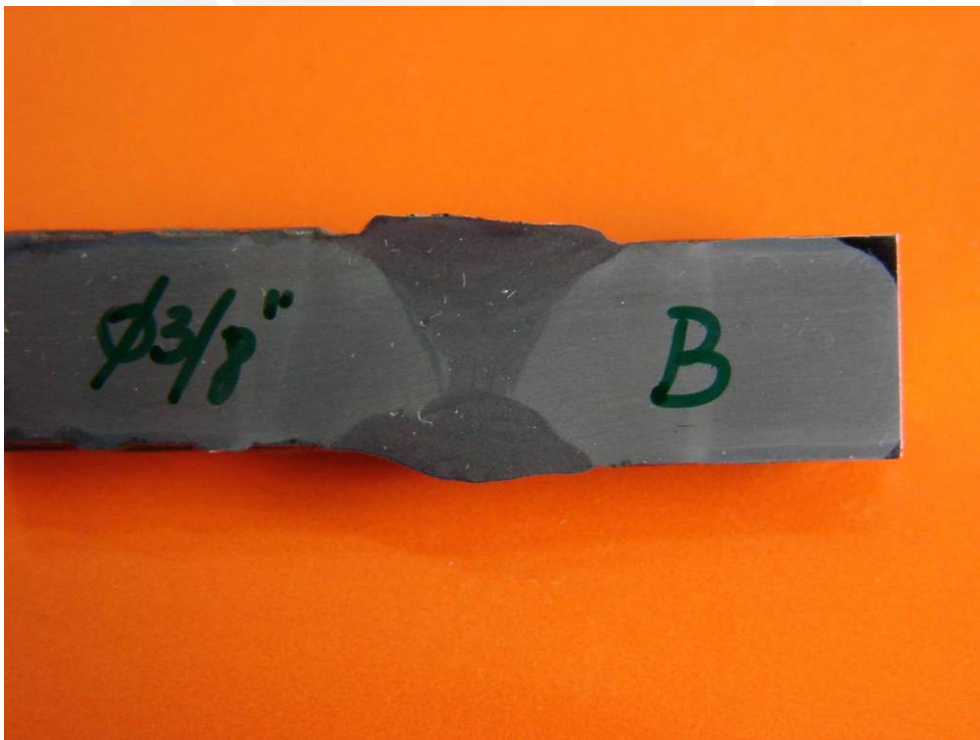


Figura 3.10: Micrografía de la muestra 3/8" – B.

3.2.1.2. Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 5/8"

3.2.1.2.1. *Ensayo de Tracción*

El resultado del ensayo de tracción a la probeta soldada se muestra en la Tabla 3.19:

Tabla 3.19: Resultado de Ensayo de Tracción de Probeta Soldada.

Muestra	Esfuerzo de Tracción (MPa)	Esfuerzo de Tracción Mínimo Requerido (MPa)	Observación
5/8" - A	611	525	CONFORME
5/8" - B	629	525	CONFORME

Ambas muestras cumplen con el requerimiento, el cual estipula que el esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, es decir, no debe ser menor a 525 MPa.

Una copia del informe de los ensayos realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales se encuentra en el Anexo XI.

3.2.1.2.2. *Ensayo de Macroataque*

El ensayo de macroataque se realizó a la probeta debidamente preparada, así como se muestra en las Figuras 3.11 y 3.12.

El resultado del ensayo de macroataque se presenta en la Tabla 3.20:

Tabla 3.20: Resultados del Ensayo de Macrografía a Probeta Soldada.

Muestra	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
5/8" - A	EA	MA	0,6 X 0,2 mm	No contemplado	CONFORME
5/8" - B	No hay	-----	-----	-----	CONFORME

Leyenda:

PA: Porosidad Aislada

MA: Metal de Aporte

EA: Inclusión de Escoria

LF: Línea de Fusión

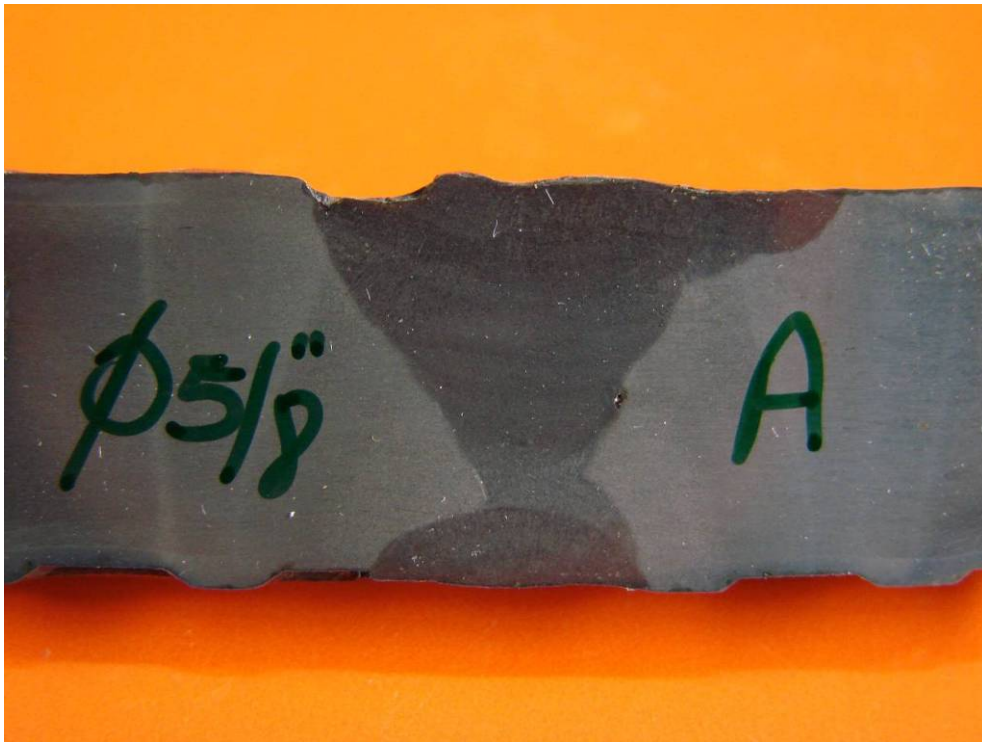


Figura 3.11: Micrografía de la muestra 5/8" – A.



Figura 3.12: Micrografía de la muestra 5/8" – B.

3.2.1.3. Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 3/4"

3.2.1.3.1. Ensayo de Tracción

El resultado del ensayo de tracción a la probeta soldada se muestra en la Tabla 3.21:

Tabla 3.21: Resultado de Ensayo de Tracción de Probeta Soldada.

Muestra	Esfuerzo de Tracción (MPa)	Esfuerzo de Tracción Mínimo Requerido (MPa)	Observación
3/4" - A	552	525	CONFORME
3/4" - B	556	525	CONFORME

Ambas muestras cumplen con el requerimiento, el cual estipula que el esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, es decir, no debe ser menor a 525 MPa.

Una copia del informe de los ensayos realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales se encuentra en el Anexo XI.

3.2.1.3.2. Ensayo de Macroataque

El ensayo de macroataque se realizó a la probeta debidamente preparada, así como se muestra en las Figuras 3.13 y 3.14.

El resultado del ensayo de macroataque se presenta en la Tabla 3.22:

Tabla 3.22: Resultados del Ensayo de Macrografía a Probeta Soldada.

Muestra	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
3/4" - A	PA	MA	0,5	Σ máx.=10mm	CONFORME
	PA	MA	0,4		CONFORME
	PA	MA	0,2		CONFORME
3/4" - B	No hay	-----	-----	-----	CONFORME

Leyenda:

PA: Porosidad Aislada

MA: Metal de Aporte

EA: Inclusión de Escoria

LF: Línea de Fusión

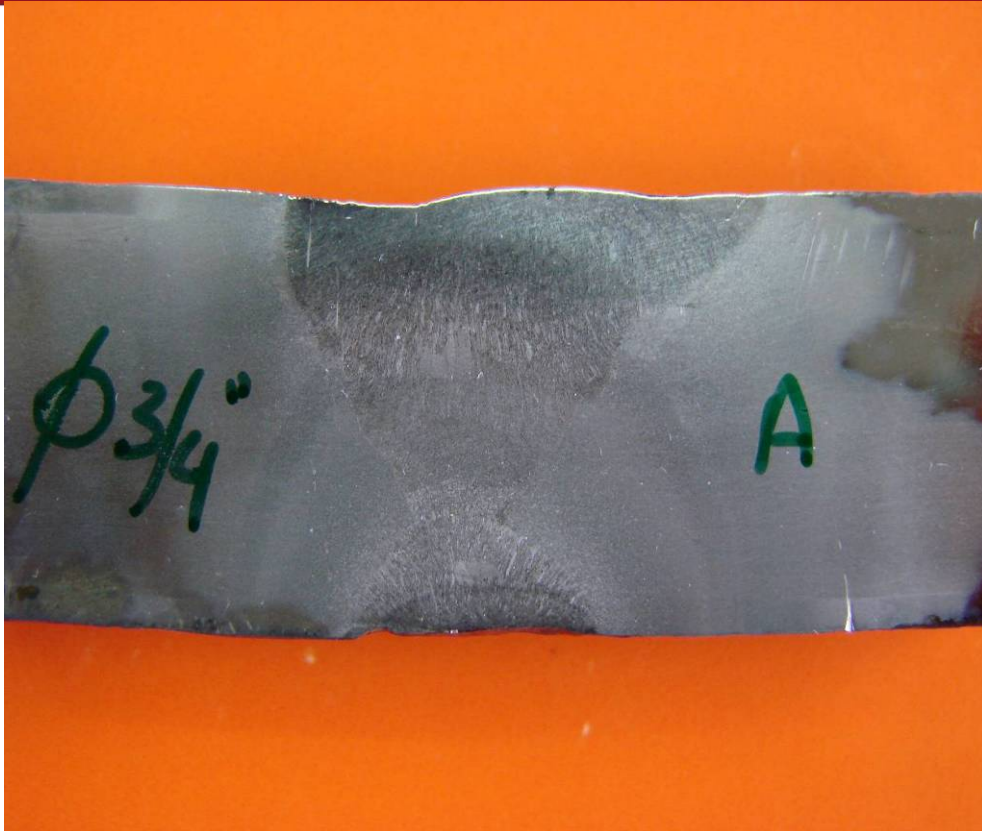


Figura 3.13: Micrografía de la muestra 3/4" – A.

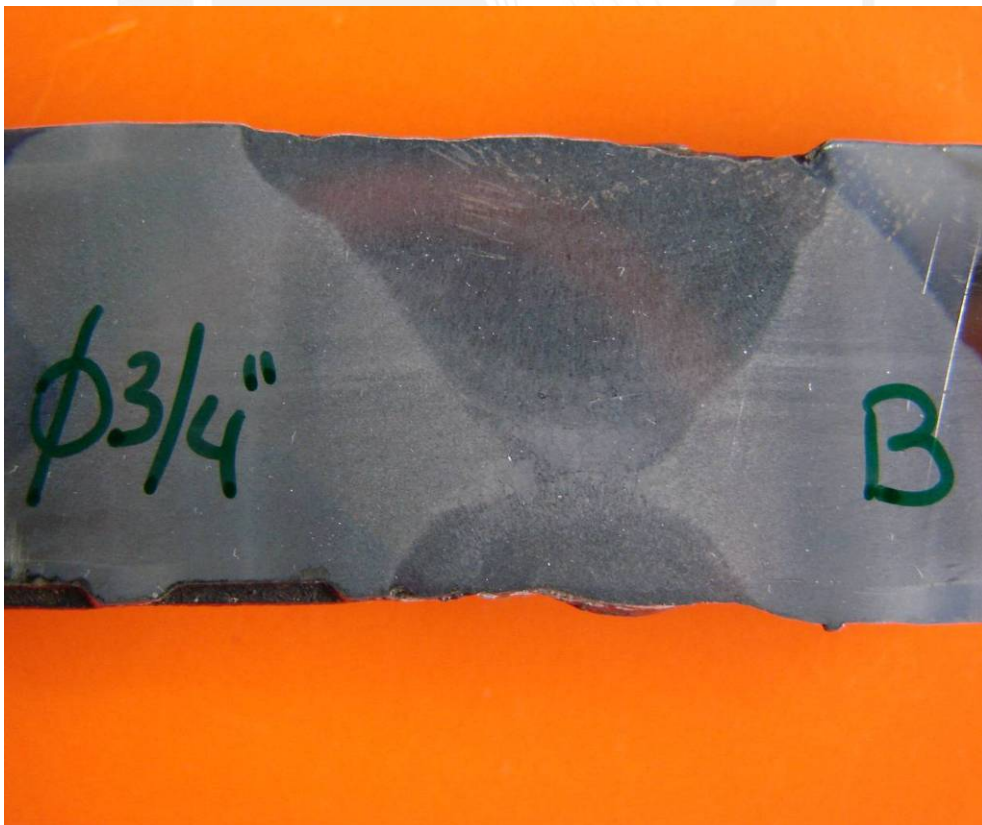


Figura 3.14: Micrografía de la muestra 3/4" – B.

3.2.1.4. Ensayos de Calificación del Procedimiento de Soldadura de Barra de 1"

3.2.1.4.1. *Ensayo de Tracción*

El resultado del ensayo de tracción a la probeta soldada se muestra en la Tabla 3.23:

Tabla 3.23: Resultado de Ensayo de Tracción de Probeta Soldada.

Muestra	Esfuerzo de Tracción (MPa)	Esfuerzo de Tracción Mínimo Requerido (MPa)	Observación
1" - A	568	525	CONFORME
1" - B	591	525	CONFORME

Ambas muestras cumplen con el requerimiento, el cual estipula que el esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, es decir, no debe ser menor a 525 MPa.

Una copia del informe de los ensayos realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales se encuentra en el Anexo XI.

3.2.1.4.2. *Ensayo de Macroataque*

El ensayo de macroataque se realizó a la probeta debidamente preparada, así como se muestra en las Figuras 3.15 y 3.16.

El resultado del ensayo de macroataque se presenta en la Tabla 3.24:

Tabla 3.24: Resultados del Ensayo de Macrografía a Probeta Soldada.

Muestra	Discontinuidad	Posición	Tamaño (mm)	Requerimiento	Calificación
1" - A	No hay	----	----	Σ máx.=10mm	CONFORME
1" - B	PA	MA	0,5	Σ máx.=10mm	CONFORME

Leyenda:

PA: Porosidad Aislada

MA: Metal de Aporte

EA: Inclusión de Escoria

LF: Línea de Fusión

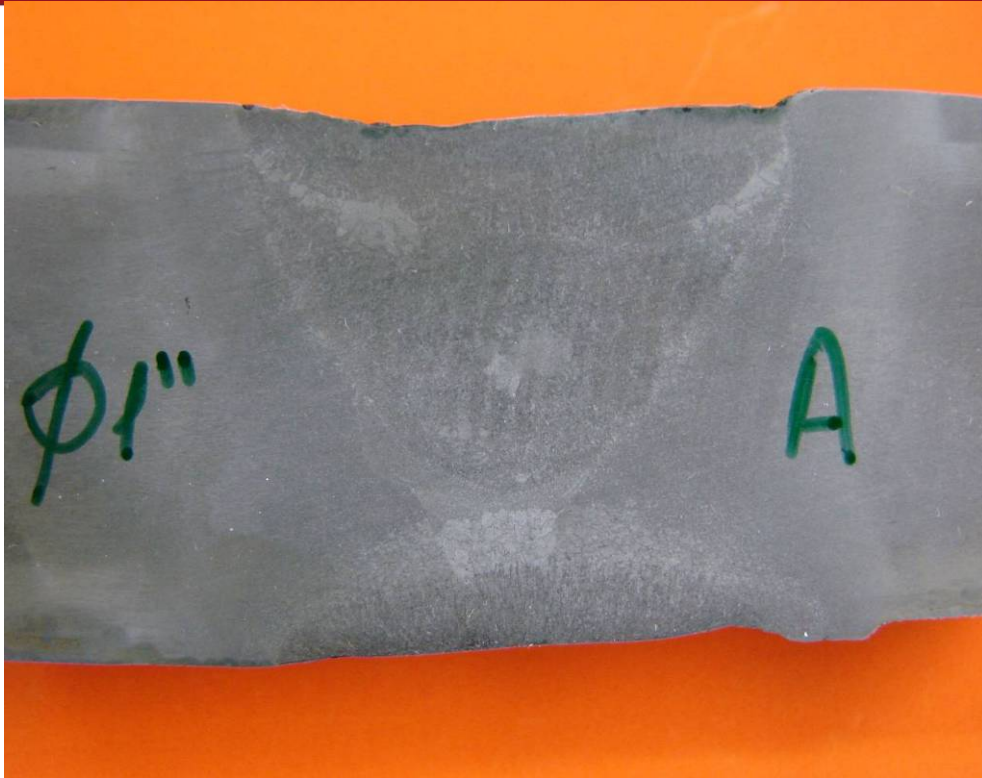


Figura 3.15: Micrografía de la muestra 1'' – A.

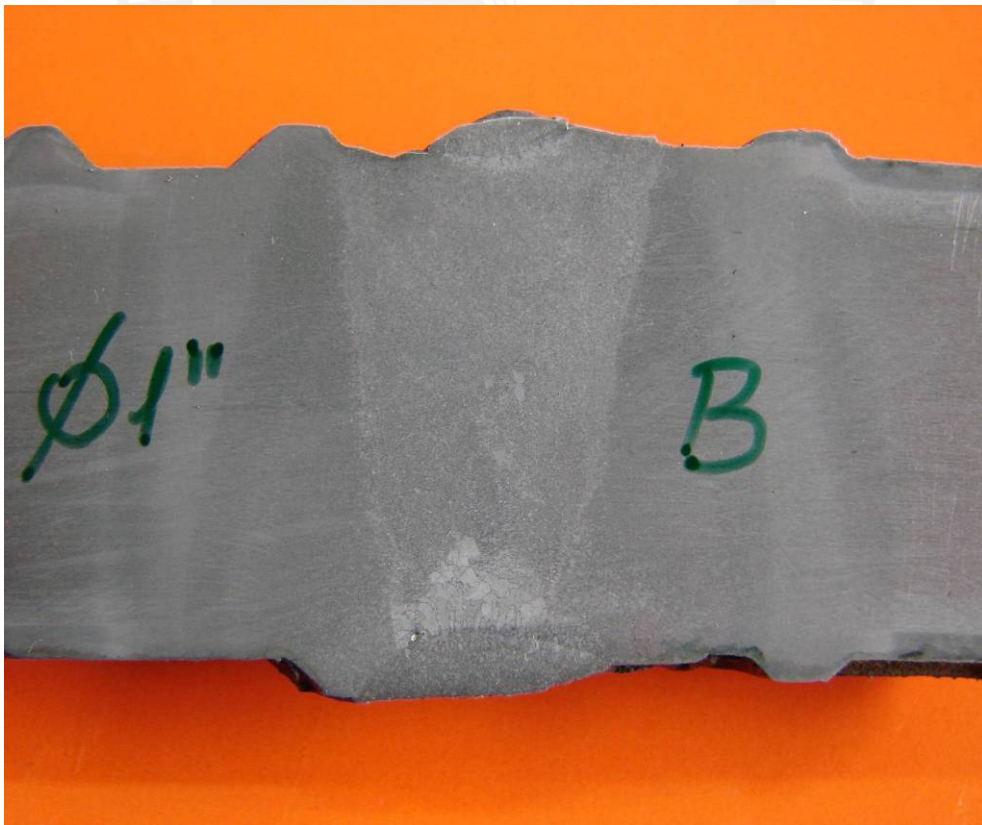


Figura 3.16: Micrografía de la muestra 1'' – B.

3.2.2. Ensayos Complementarios

3.2.2.1. Ensayos a Junta de Barra de 3/8"

3.2.2.1.1. Barrido de Durezas (HV)

El barrido de durezas se realizó en las probetas debidamente preparadas, en una línea a 1,6mm de la superficie de la cara de la soldadura, tomado las durezas del material base, el metal de aporte y las zonas afectadas por el calor. Se utilizó la norma de ensayo ASTM E92-97e2, con una carga de 10 kg.

Un esquema de la ubicación de las indentaciones realizadas se muestra en la Figura 3.17:

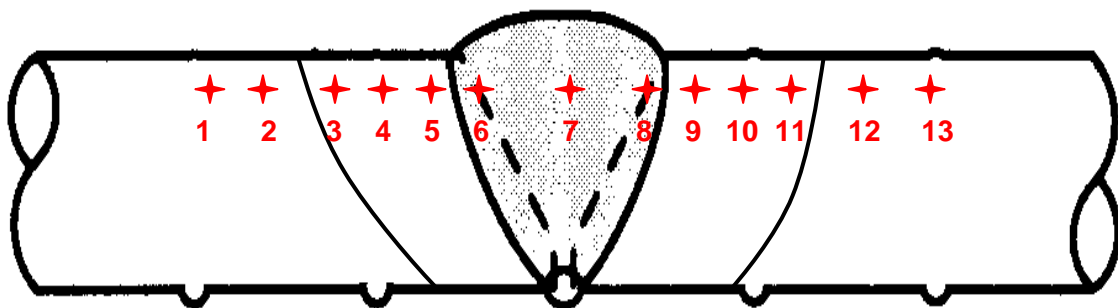


Figura 3.17: Esquema de Barrido de Durezas en Barra Soldada.

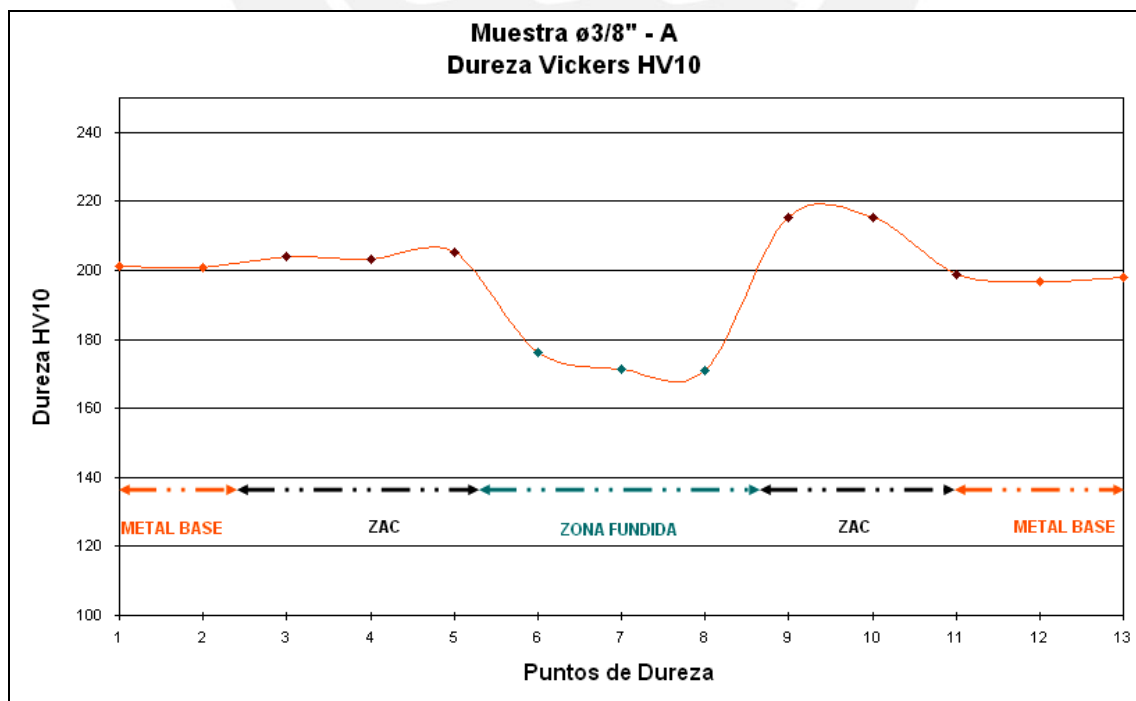


Figura 3.18: Barrido de Durezas de la Probeta 3/8" – A.

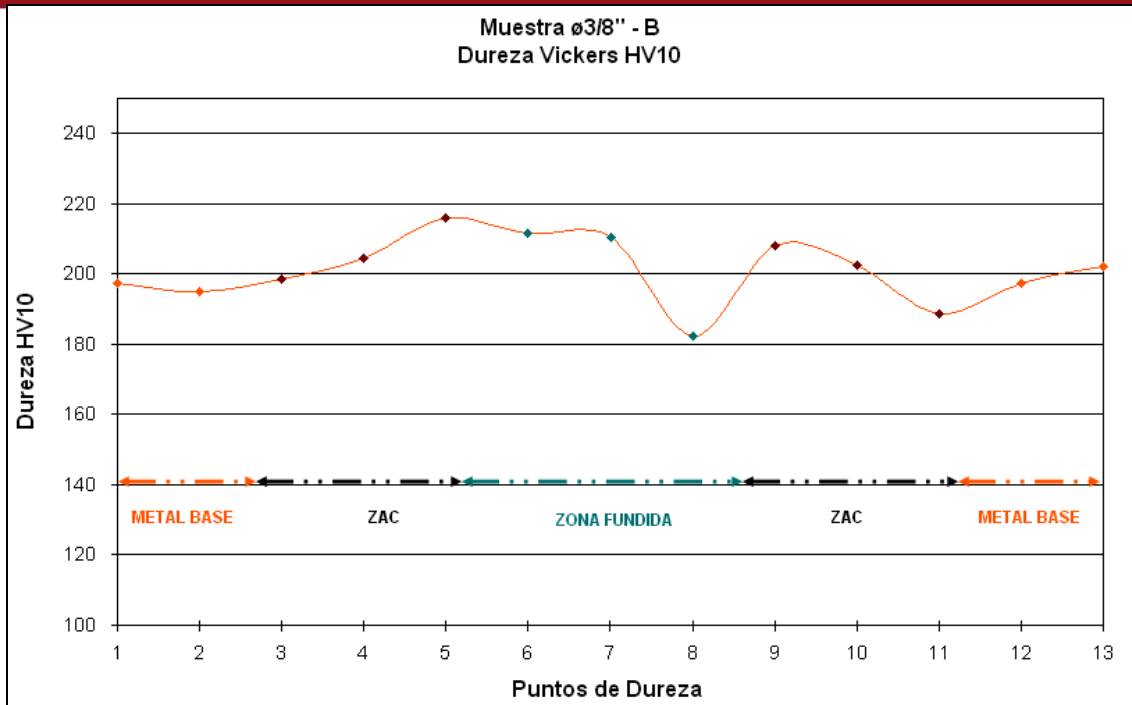


Figura 3.19: Barrido de Durezas de la Probeta $3/8''$ – B.

No se encontraron zonas de elevada dureza, para ambas probetas macrográficas los valores de dureza siempre se mantuvieron por debajo de los 220 HV. Estos valores son muy favorables para las condiciones de servicio.

Para tener un criterio de evaluación, se toma el Anexo I del código AWS D1.1, el cual en el punto I 3.3 refiere que según pruebas de laboratorio, la fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si esta zona presenta durezas por debajo de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para electrodos de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser toleradas sin fisuración.

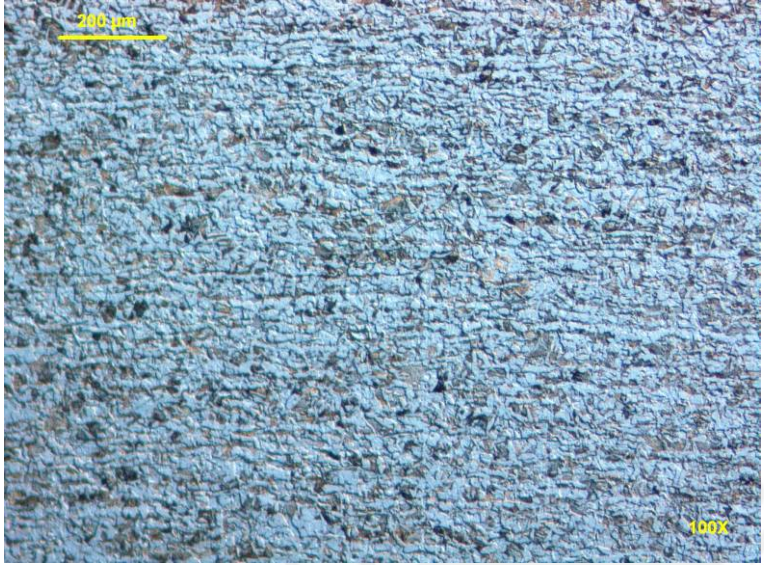
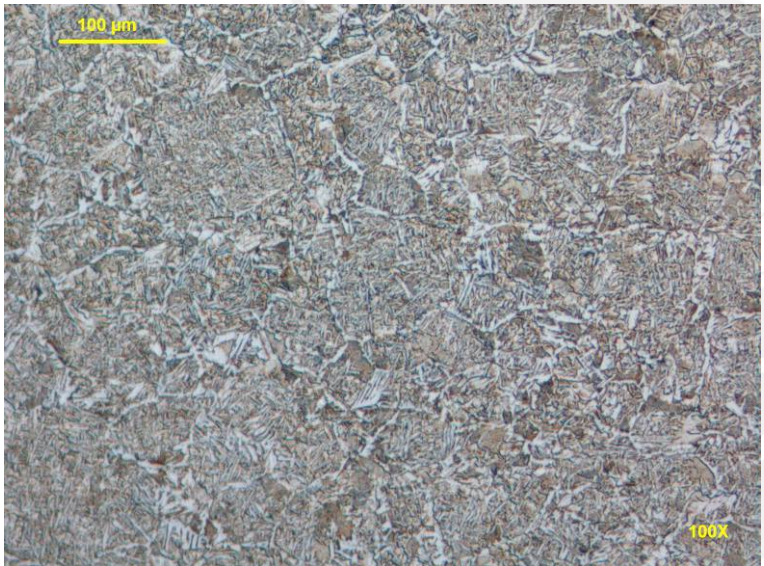

Para nuestro caso, ninguna de las dos probetas supero los 350 HV, por lo que se presume que no existirán problemas de fisuración o la presencia de zonas frágiles, tales como la martensita.

3.2.2.1.2. Análisis Micrográfico

El análisis micrográfico se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo XI, en las probetas $3/8''$ – A y $3/8''$ – B.

Las microestructuras halladas son las que se esperaban encontrar debidas al efecto del ciclo térmico propio de la soldadura y no son perjudiciales para la junta en servicio.

Las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 3/8" – A.

	<p>Figura 3.20 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 201 HV</p>
	<p>Figura 3.21 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 215 HV</p>
	<p>Figura 3.22 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 171 HV</p>

Las Figuras 3.23, 3.24 y 3.25, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 3/8" – B.

	<p>Figura 3.23 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 202 HV</p>
	<p>Figura 3.24 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 216 HV</p>
	<p>Figura 3.25 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 182 HV</p>

3.2.2.2. Ensayos a Junta de Barra de 5/8"

3.2.2.2.1. Barrido de Durezas (HV)

El Barrido de Durezas se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito en 3.2.2.1.1.

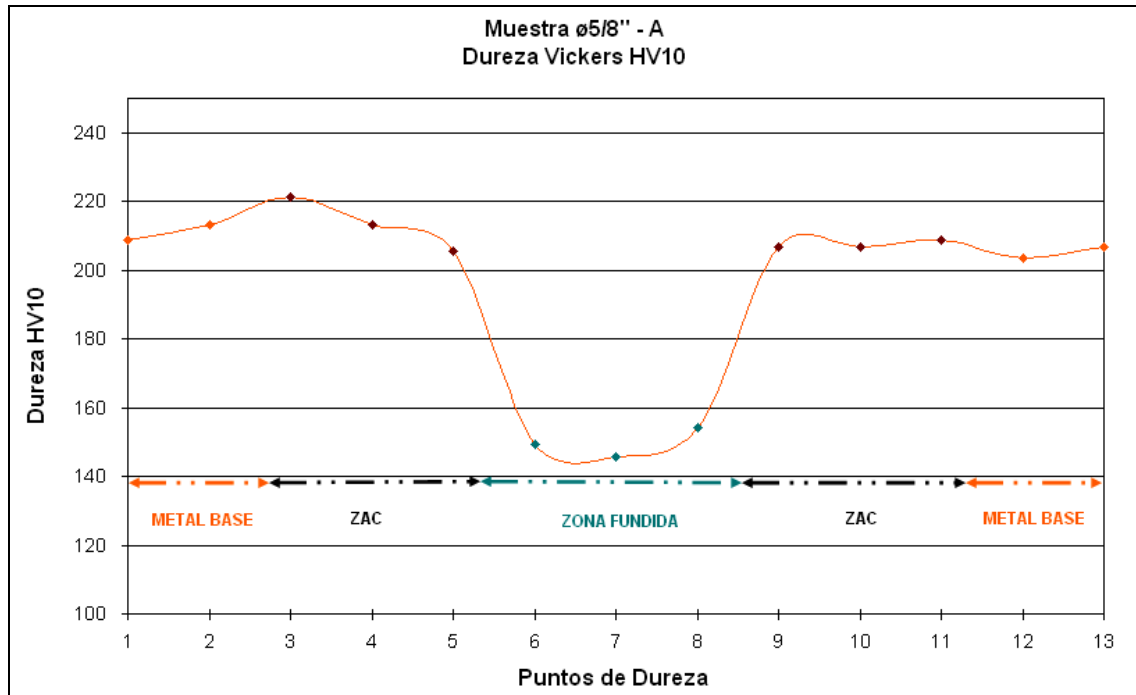


Figura 3.26: Barrido de Durezas de la Probeta 5/8" – A.

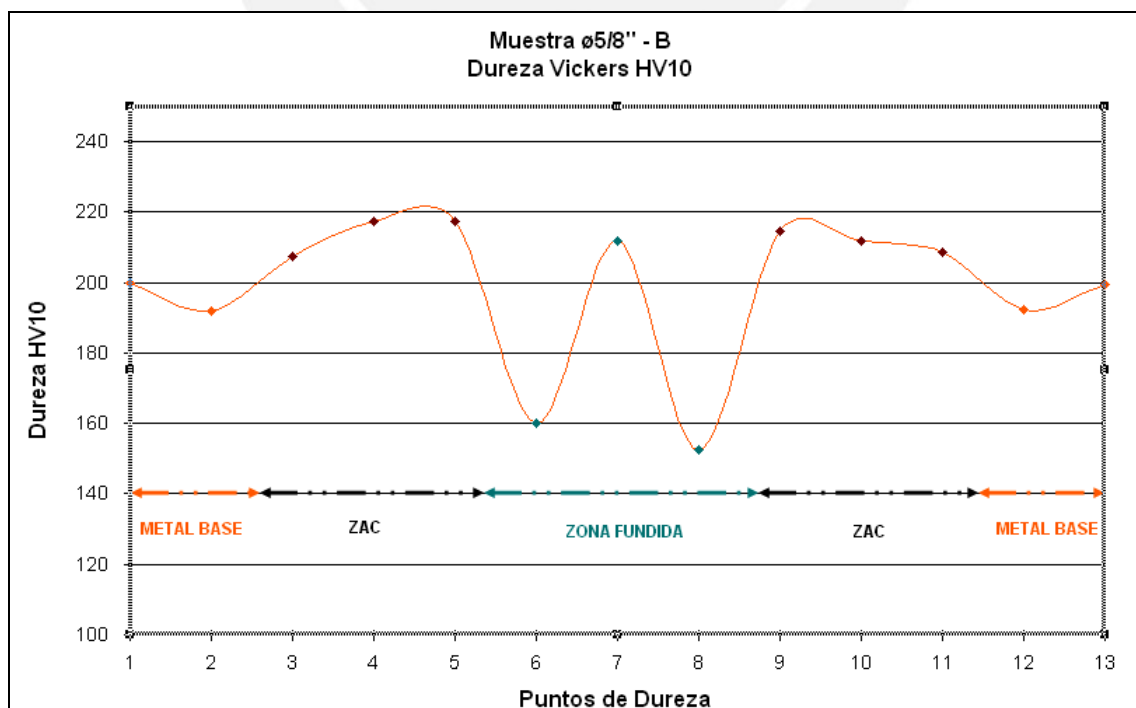


Figura 3.27: Barrido de Durezas de la Probeta 5/8" – B.

No se encontraron zonas de elevada dureza, para ambas probetas macrográficas los valores de dureza siempre se mantuvieron por debajo de los 221 HV. Estos valores son muy favorables para las condiciones de servicio.

Para tener un criterio de evaluación, se toma el Anexo I del código AWS D1.1, el cual en el punto I 3.3 refiere que según pruebas de laboratorio, la fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si esta zona presenta durezas por debajo de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para electrodos de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser toleradas sin fisuración.

Para nuestro caso, ninguna de las dos probetas supero los 350 HV, por lo que se presume que no existirán problemas de fisuración o la presencia de zonas frágiles, tales como la martensita.

3.2.2.2.2. *Análisis Micrográfico*

El análisis micrográfico se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo X, en las probetas 5/8" – A y 5/8" – B.

Las microestructuras halladas son las que se esperaban encontrar debidas al efecto del ciclo térmico propio de la soldadura y no son perjudiciales para la junta en servicio.

Las Figuras 3.28, 3.29 y 3.30, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 5/8" – A.

	<p>Figura 3.28 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 213 HV</p>
	<p>Figura 3.29 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo óxido Dureza: 221 HV</p>
	<p>Figura 3.30 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 146 HV</p>

Las Figuras 3.31, 3.32 y 3.33, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 5/8" – B.

	<p>Figura 3.31 (200X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 200 HV</p>
	<p>Figura 3.32 (200X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 217 HV</p>
	<p>Figura 3.33 (200X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 153 HV</p>

3.2.2.3. Ensayos a Junta de Barra de 3/4"

3.2.2.3.1. Barrido de Durezas (HV)

El Barrido de Durezas se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito en 3.2.2.1.1.

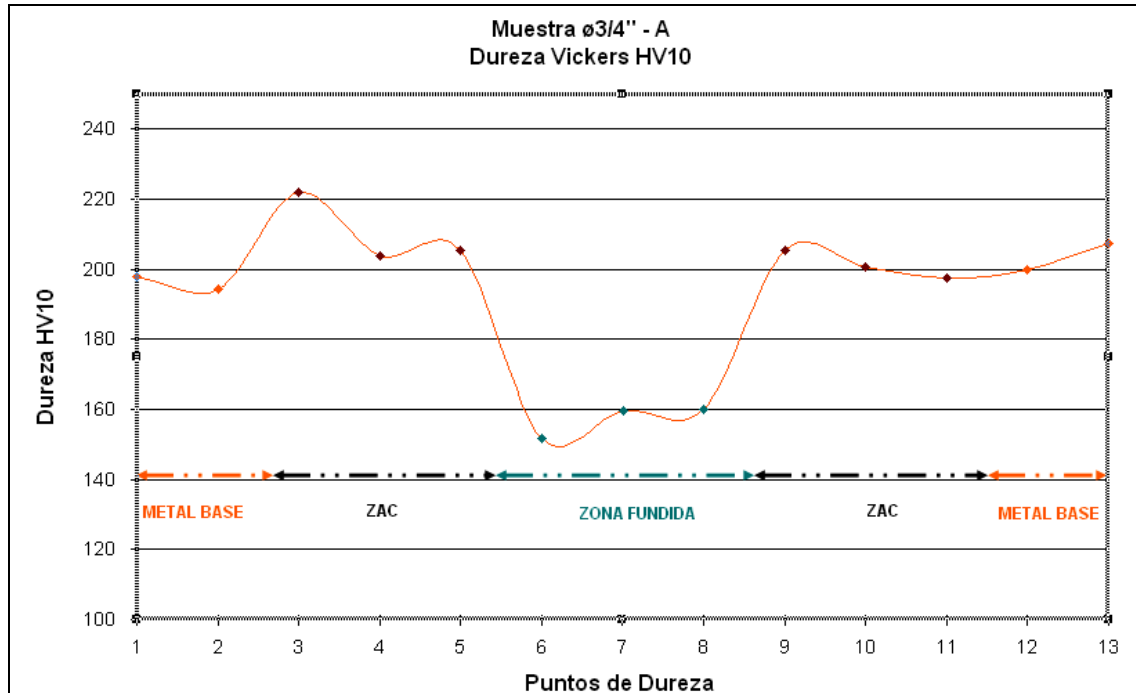


Figura 3.34: Barrido de Durezas de la Probeta 3/4" – A.

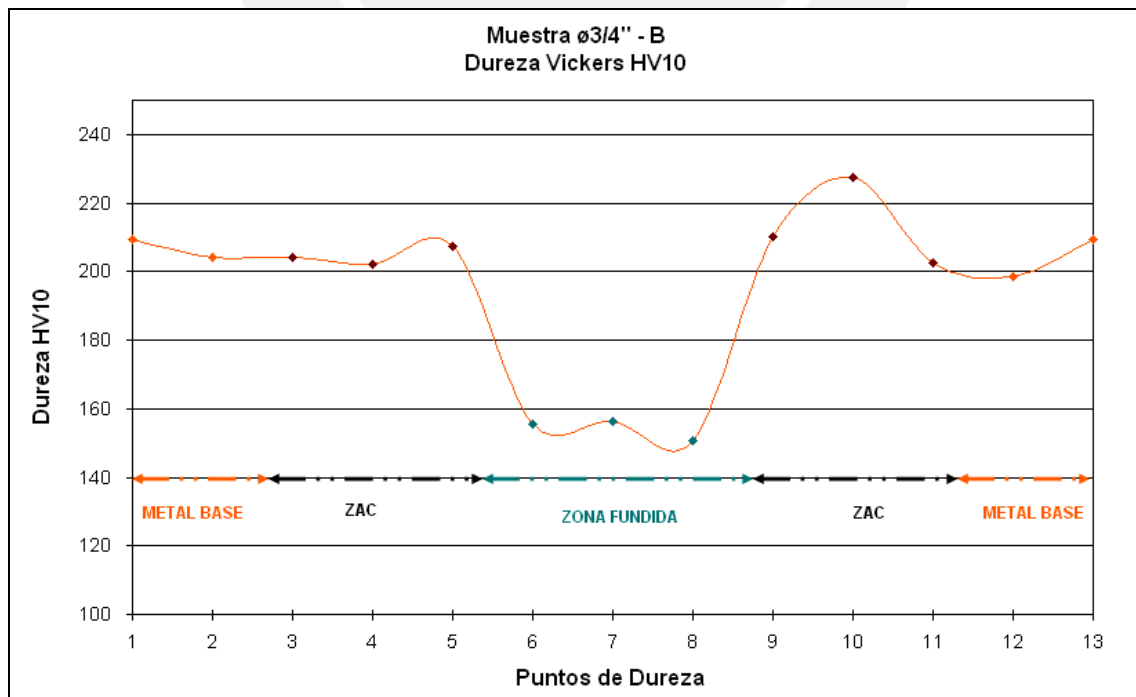


Figura 3.35: Barrido de Durezas de la Probeta 3/4" – B.

No se encontraron zonas de elevada dureza, para ambas probetas macrográficas los valores de dureza siempre se mantuvieron por debajo de los 222 HV. Estos valores son muy favorables para las condiciones de servicio.

Para tener un criterio de evaluación, se toma el Anexo I del código AWS D1.1, el cual en el punto I 3.3 refiere que según pruebas de laboratorio, la fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si esta zona presenta durezas por debajo de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para electrodos de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser toleradas sin fisuración.

Para nuestro caso, ninguna de las dos probetas supero los 350 HV, por lo que se presume que no existirán problemas de fisuración o la presencia de zonas frágiles, tales como la martensita.

3.2.2.3.2. *Análisis Micrográfico*

El análisis micrográfico se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo X, en las probetas 3/4" – A y 3/4" – B.

Las microestructuras halladas son las que se esperaban encontrar debidas al efecto del ciclo térmico propio de la soldadura y no son perjudiciales para la junta en servicio.

Las Figuras 3.36, 3.37 y 3.38, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 3/4" – A.

	<p>Figura 3.36 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 207 HV</p>
	<p>Figura 3.37 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 222 HV</p>
	<p>Figura 3.38 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 152 HV</p>

Las Figuras 3.39, 3.40 y 3.41, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 3/4" – B.

	<p>Figura 3.39 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 210 HV</p>
	<p>Figura 3.40 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 228 HV</p>
	<p>Figura 3.41 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 151 HV</p>

3.2.2.4. Ensayos a Junta de Barra de 1"

3.2.2.4.1. Barrido de Durezas (HV)

El Barrido de Durezas se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito en 3.2.2.1.1.

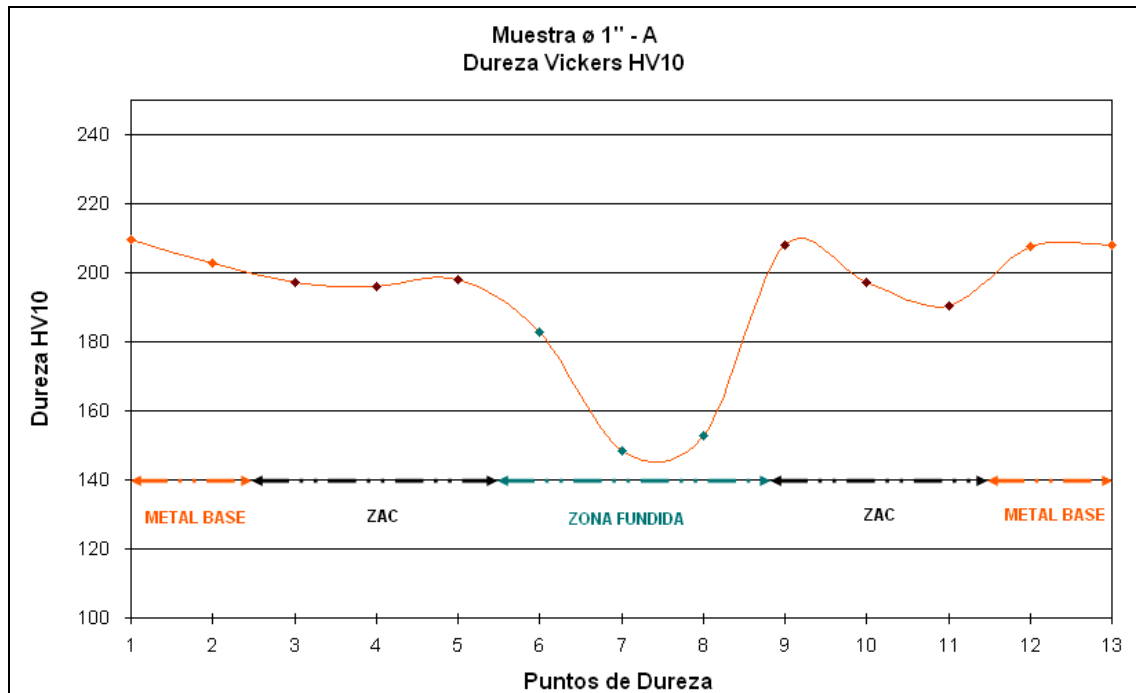


Figura 3.42: Barrido de Durezas de la Probeta 1" – A.

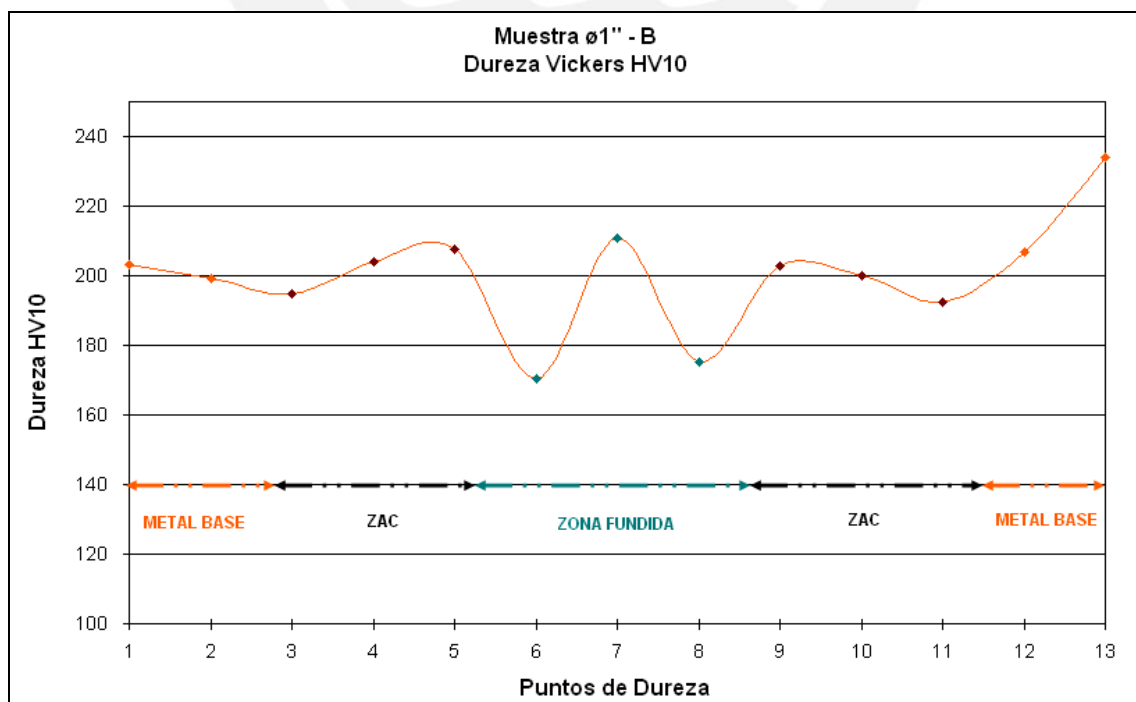


Figura 3.43: Barrido de Durezas de la Probeta 1" – B.

No se encontraron zonas de elevada dureza, para ambas probetas macrográficas los valores de dureza siempre se mantuvieron por debajo de los 211 HV. Estos valores son muy favorables para las condiciones de servicio.

Para tener un criterio de evaluación, se toma el Anexo I del código AWS D1.1, el cual en el punto I 3.3 refiere que según pruebas de laboratorio, la fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si esta zona presenta durezas por debajo de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para electrodos de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser toleradas sin fisuración.

Para nuestro caso, ninguna de las dos probetas supero los 350 HV, por lo que se presume que no existirán problemas de fisuración o la presencia de zonas frágiles, tales como la martensita.

3.2.2.4.2. *Análisis Micrográfico*

El análisis micrográfico se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo X, en las probetas 1" – A y 1" – B.

Las microestructuras halladas son las que se esperaban encontrar debidas al efecto del ciclo térmico propio de la soldadura y no son perjudiciales para la junta en servicio.

Las Figuras 3.44, 3.45 y 3.46, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 1" – A.

	<p>Figura 3.44 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 210 HV</p>
	<p>Figura 3.45 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 208 HV</p>
	<p>Figura 3.46 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 148 HV</p>

Las Figuras 3.47, 3.48 y 3.49, muestran las microestructuras halladas en la Probeta 1" – B.

	<p>Figura 3.47 (100X) Ubicación: Metal base Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 234 HV</p>
	<p>Figura 3.48 (100X) Ubicación: ZAC Matriz: Ferrita y Perlita Otros: Carburo Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 207 HV</p>
	<p>Figura 3.49 (100X) Ubicación: Metal de Aporte Matriz: Ferrita acicular masiva Otros: Carburo globular fino Inclusiones: Tipo Sulfuro Dureza: 170 HV</p>

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las barras corrugadas de acero BELGO 60 de diámetros 3/8", 5/8", 3/4" y 1" cumplen con los requerimientos de las normas ASTM A615 Y ASTM A706.
2. Los procedimientos propuestos para la unión de estas barras, empleando una junta directa a tope, cumplen con los requerimientos de calificación estipulados por el código ANSI/AWS D1.4-05.
3. Los valores de dureza encontrados en las diferentes zonas que componen las uniones soldadas están muy por debajo de los 350 HV, que recomienda la norma ANSI/AWS D1.1-10 para evitar la fisuración en la zona afectada por el calor.
4. Los análisis micrográficos confirman la ausencia de estructuras frágiles en las uniones soldadas, lo cual minimizará la probabilidad de fisuración. Encontrándose mayoritariamente estructuras ferrítico-perlíticas en el metal base y en la zona afectada por el calor, mientras que el cordón de soldadura estaba constituido principalmente por ferrita acicular y carburos muy finos.
5. Se puede afirmar que las barras corrugadas de acero estudiadas presentan muy buena soldabilidad, puesto que se obtuvieron uniones soldadas sanas y con las propiedades mecánicas requeridas.
6. En las uniones de las barras corrugadas de acero de menor diámetro se debe tener especial cuidado en la técnica y la habilidad del soldador, pues por su pequeño tamaño es más susceptible a presentar discontinuidades de soldadura.
7. El cambio de la técnica de soldeo de recta a oscilante permitió el aumento del aporte de calor sin variar las características eléctricas de la soldadura.
8. El aumento del aporte de calor redujo la velocidad de enfriamiento de la unión soldada, lo cual evito la formación de microestructuras duras y frágiles como la martensita.
9. Finalmente, el cambio de la técnica de soldeo a oscilante provoco la disminución de los valores de dureza de la unión soldada.

Las siguientes son recomendaciones generales que se aplicaron a todos los casos estudiados:

- a. Realizar una preparación de junta que nos permita compensar las deformaciones originadas por la soldadura, mediante un montaje desfasado de la horizontal en sentido contrario al de la deformación esperada.
- b. Prestar mucho cuidado a la limpieza de la junta, antes de iniciar la soldadura, para prevenir posibles discontinuidades como gases atrapados.
- c. Emplear una técnica de soldeo oscilante, que nos permita realizar la unión en el menor número de pasadas, para garantizar un gran aporte de calor.
- d. Observar una limpieza rigurosa entre pasadas, para evitar la presencia de discontinuidades como las inclusiones de escoria.
- e. Inmediatamente después de terminar la soldadura de la unión cubrir la junta, con un material aislante, para reducir la velocidad de enfriamiento y prevenir la formación de estructuras duras como la martensita.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Welding Society, ANSI/AWS A3.0, STANDARD WELDING TERMS AND DEFINITIONS. 2001.
2. American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M, STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL. 2010.
3. American Welding Society, AWS D1.4/D1.4M, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCED STEEL. 2005.
4. American Welding Society, WELDING HANDBOOK, VOL. 4, MATERIALS AND APPLICATIONS – PART 2, 8TH EDITION. 1998.
5. American Society for Testing and Materials, ASTM A615/A615M-09b Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. 2009.
6. American Society for Testing and Materials, ASTM A706/A706M-09b Standard Specification for Low Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement. 2009.
7. American Society for Testing and Materials, ASTM E94-04 Standard Guide for Radiographic Examination. 2004.
8. American Society for Testing and Materials, ASTM E747-04 Standard Practice for Design, Manufacture and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology. 2004.
9. American Society for Testing and Materials, ASTM A370aε1-09 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2009.
10. American Society for Testing and Materials, ASTM E7-03 Standard Terminology Relating to Metallography. 2003.
11. Deutsches Institut für Normung, DIN 4099-1, Welding of Reinforcing Steel – Part 1: Execution of Welding Operations. 2003.
12. American Society for Testing and Materials, ASTM E45-97(2002) Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2002.
13. American Society for Testing and Materials, ASTM A709-01 Standard Guide for Magnetic Particle Examination. 2001.
14. American Society for Testing and Materials, ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of metallographic Specimens. 2001.
15. American Society for Testing and Materials, ASTM E1032-01 Standard Test Method for Radiographic Examination of Weldments. 2001.
16. American Society for Testing and Materials, ASTM E340-00e1 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. 2000.

17. American Society for Testing and Materials, ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 1999.
18. American Society for Testing and Materials, ASTM E92-97e2 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. 1997.
19. American Society for Testing and Materials, ASTM E1025-98 Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology. 1998.
20. American Society for Testing and Materials, ASTM E112-96e3 Standard Test Method for determining Average Grain Size. 1996.
21. Omer W. Blodget, DESIGN OF WELDED STRUCTURES. 1996.
22. The Lincoln Electric Company, THE PROCEDURE HANDBOOK OF ARC WELDING, 13TH EDITION. 1994.
23. American Welding Society, WELDING HANDBOOK, VOL. 1, WELDING TECHNOLOGY, 8TH EDITION. 1987.
24. American Society for Metals, METALS HANDBOOK, VOL. 7, ATLAS OF MICROSTRUCTURES OF INDUSTRIAL ALLOYS, 8TH EDITION. 1972.
25. Crespo F. Germán, MECHANICAL BEHAVIOR OF ELECTRICAL BUTT WELDING OF HIGH TENSION BILLETS. Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Apdo. 89000 Caracas 1086-A, Venezuela.
26. Sotero C. Álvaro, SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO PARA CONSTRUCCIÓN ASTM A 706 DE 3/4". Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Av. Universitaria 1801 Lima 32, Perú. 2004.
27. Oerlikon, BOLETÍN TÉCNICO DE SOLDADURA N° 68, Publicaciones de Servicios Técnicos EXSA S.A. – SETEXSA, Lima, Perú.
28. SOLDEXA S.A. – Oerlikon, Manual de Soldadura y Catálogos de Productos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ American Society for Testing and Materials, ASTM A 615 – 09b. Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, 2009, p. 2.
- ² Ibid., p.3.
- ³ American Society for Testing and Materials, ASTM A 370 – 09aε1. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2009, p.25 – 44.
- ⁴ American Society for Testing and Materials, ASTM A 615 – 09b. op.cit. p.2.
- ⁵ Ibid., p.4.
- ⁶ Ibid., p.3.
- ⁷ American Society for Testing and Materials, ASTM A 370 – 09aε1. op. cit. p.10 – 44.
- ⁸ Sotero C. Álvaro, SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO PARA CONSTRUCCIÓN ASTM A 706 DE 3/4”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Av. Universitaria 1801 Lima 32, Perú. 2004., p. 1 – 6.
- ⁹ American Society for Testing and Materials, ASTM A 706 – 09b. op.cit. p. 2.
- ¹⁰ Ibid., loc. cit.
- ¹¹ Ibid., loc. cit.
- ¹² Ibid., p. 4.
- ¹³ Ibid., p. 3.
- ¹⁴ American Welding Society, ANSI/AWS D1.4 – 2005, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCED STEEL, 2005, p. 2.
- ¹⁵ American Welding Society, ANSI/AWS D1.4 – 2005, op. cit. p. 21 y 26.
- ¹⁶ Ibid., p. 21 y 22.
- ¹⁷ Ibid., p. 27.
- ¹⁸ Crespo F. Germán, MECHANICAL BEHAVIOR OF ELECTRICAL BUTT WELDING OF HIGH TENSION BILLETS. Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Apdo. 89000 Caracas 1086-A, Venezuela.
- ¹⁹ American Welding Society (AWS), WELDING HANDBOOK, VOL. 2, WELDING PROCESS, 8TH EDITION, 1991, p. 598-602.
- ²⁰ Ibid., p. 582 – 597.
- ²¹ Ibid., p. 897 – 900.
- ²² Deutsches Institut für Normung, DIN 4099-1, Welding of Reinforcing Steel – Part 1: Execution of Welding Operations. 2003
- ²³ American Welding Society, ANSI/AWS D1.4 – 2005, op. cit. p. 17 y 20.
- ²⁴ Ibid., p.21.

²⁵ Ibid., p.26

²⁶ Ibid., loc. cit.

²⁷ Ibid., p.30.

²⁸ Ibid., p.30.

²⁹ Ibid., p. 43.

³⁰ Ibid., p. 5 – 7.

³¹ Ibid., p. 11.

³² American Welding Society, WELDING HANDBOOK, VOL.1, WELDING TECHNOLOGY, 8TH EDITION, 1987, p. 469 – 473.

³³ American Welding Society, ANSI/AWS D1.4 – 2005, op. cit. p. 17 y 18.

³⁴ Ibid., p. 30 y 40.

³⁵ Ibid., p. 32.

³⁶ Ibid., p. 30.

³⁷ Ibid., loc. cit.

³⁸ Ibid., loc. cit.

