

SOLDABILIDAD DEL ACERO DE REFUERZO ESTRUCTURAL PARA APLICACIONES SISMORESISTENTES FABRICADO POR SIMESA

Alejandro Echavarría*
Rodrigo Seguro**
Fabio Pulgarín**
Carlos Mario Velásquez ***
Raúl Molina****

RESUMEN

Se presentan los resultados de los ensayos de soldabilidad de las barras de refuerzo estructural termotratadas de Simesa (ASTM A706 Grado 70), en las especificaciones 10, 8, 6 y 4, según las normas *Structural Welding Code AWS D1.4* y *AWS D1.1*. La soldadura utilizada corresponde a un electrodo E-9018-G de la *Messer Griesheim*. Los ensayos indican que sin ningún control de temperatura se cumplen los requisitos de las normas *AWS*. Es necesario un control de temperatura de interpases a un máximo de 150° C, la utilización de electrodos de 3.25 mm de diámetro y de un amperaje máximo de 120 A por pase para garantizar que la unión soldada cumpla la Norma ICONTEC NTC 2289 para barra de refuerzo estructural.

ABSTRACT

There are included results from soldability tests on SIMESA heat treated rebar steels (ASTM A706 Gr. 70), under the specifications 10, 8, 6 and 4, according to the Structural Welding Code AWS D1.4 and AWS D1.1. A E-9018-G MeSser Griesheim electrode was used. Results showed that AWS Standards are fulfilled without temperature control. It is necessary an interpass temperature control at a maximum of 150° C, to use a 3.25 mm electrode in diameter and a maximum current of 120 A by pass. Only in this way is possible to assure a welding joint in agreement with the ICONTEC NTC 2289 Standard for rebar steel.

-
- * Profesor Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales
 - ** Ingenieros Metalúrgicos, Coinvestigadores del proyecto
 - *** Simesa, Departamento de Control de Calidad
 - **** Soldaduras Industriales, Departamento de Servicio al Cliente

1. ANTECEDENTES

Los códigos de construcción para aplicaciones sismoresistentes exigen altas propiedades mecánicas combinadas con una buena soldabilidad; ejemplo de ello es el Decreto 1400 de Junio de 1984⁴ y el más reciente Decreto 33 de 1998 - Norma Sismoresistente NSR 98¹⁴. Generalmente se acepta que las uniones soldadas presentan mejor comportamiento que las amarradas al ser sometidas a cargas de fatiga, impacto y vibración severa, en condiciones de tipo sísmico.

Como se sabe, las barras de acero para refuerzo estructural soportan carga a tracción en vigas horizontales y de compresión y corte en vigas verticales. Tradicionalmente, la forma de unir dichas barras es por la técnica del amarre con alambre (traslapes de 1.5 m por barra son normales en nuestro medio) y se utiliza para propósitos de posicionarlas para el vaciado del concreto.

A su vez, no era del agrado de los constructores de obras civiles unir dichas barras mediante soldadura. Los problemas encontrados usualmente eran los de fragilidad y agrietamiento en la zona afectada por el calor, unidos a una alta dureza en ésta (mayor a 400 HVN). La razón se encontraba en que los estándares de producción de dichas barras hasta la década del 80, tenía en cuenta sólo los requerimientos de propiedades mecánicas, pero no el de la soldabilidad. Contenidos de 0,38 % C y 1,20% de Mn eran los normales para barras No. 8 (1") y No. 10 (1.25"), que se fabricaban según la norma ASTM A 615 Grado 60.

Si se soldaban sin condiciones especiales de precalentamiento (muchas veces con electrodos celolósicos), inducían la presencia de compuestos frágiles, entre ellos la martensita, que promovían el agrietamiento inducido por el hidrógeno.

Contreras (1984)³, encontró que las barras de refuerzo nacionales en ASTM A 615 Grado 60, exigían precalentamientos hasta de 100 °C y los aceros según norma ASTM A706 no requerían

el precalentamiento, ya que tenían un carbono equivalente inferior a 0,55%.

Aguilar y Arroyo (1985)¹ encontraron que la soldadura de barras de acero nacional (ASTM A615 Grado 60) exigía precalentamientos de 180°C a 250°C para garantizar la soldabilidad. En esta investigación determinaron que se podían conseguir carbonos equivalentes mayores a 0,64% C.

Las barras termotratadas (procesos THERMEX ó TEMPCORE⁵) presentan una capa superficial de martensita revenida en la superficie, garantizando tanto las propiedades mecánicas como la soldabilidad, según lo exigido por la norma ASTM A-706 Grado 70, mediante la reducción del carbono y manganeso hasta 0,27% y 0,70 % respectivamente.

Defourny y Bragard (1986)⁵ demuestran que las barras de refuerzo estructural termotratadas presentan buena soldabilidad, es decir, que pueden soldarse sin precauciones especiales. Los fabricantes europeos de barra de refuerzo estructural termotratada⁷ recomiendan en sus manuales dirigidos a los constructores soldar con el mínimo diámetro posible y mínimo amperaje, es decir con la mínima entrada de calor compatible con la integridad de la unión.

Integral S.A. (1994)⁸ realiza la especificación y el procedimiento para la soldadura de barras No.8 en este acero para las vigas horizontales para METROMED (Medellín). Más recientemente, Cadena (1994)⁹ demuestra la soldabilidad de las barras de refuerzo termotratadas No. 4 de Sidehornasa.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

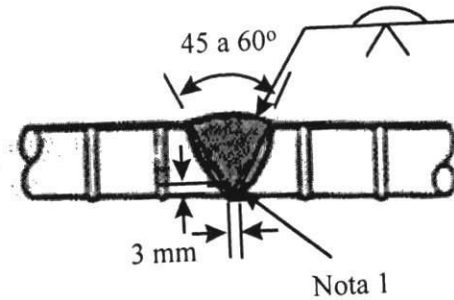
- 2.1 Demostrar la soldabilidad del acero de refuerzo estructural SIMESA ASTM A-706 Grado 70, en las especificaciones Nos. 10, 8, 6 y 4 de acuerdo con los requerimientos

de la norma AWS D1.4. con electrodo AWS E-9018 G, según GRIDUCT 1™ de la MESSER GRIESHEIM

2.2 Las uniones por evaluar son las siguientes : unión plana en V (V), unión plana en doble V (X), unión vertical en bisel simple (BS), unión vertical en bisel doble (BD), unión a traslape directo con barras

en contacto (TDC), unión a tope indirecto con dos barras de empalme (VAD). Las uniones en V, X, BS y BD fueron extraídas del AWS D1.4 y las correspondientes a las TDC y VAD de las normas europeas⁷. Véase la figura No. 1

2.3 Realizar una guía dirigida a constructores y proceder a su divulgación masiva



Nota 1: Esmerilar hasta encontrar metal sano, antes de soldar el otro lado de la unión.

Figura 1a. Unión en V

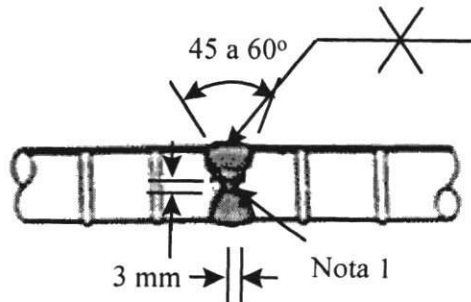
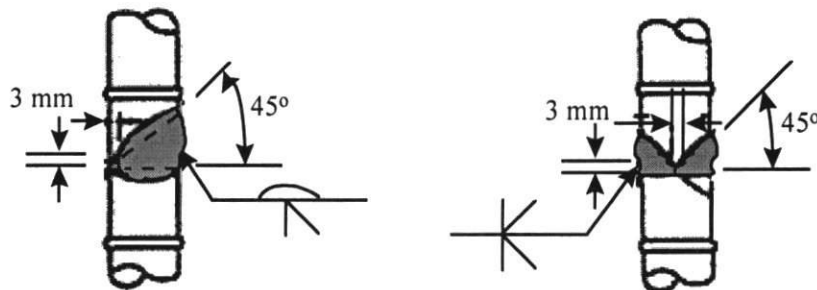
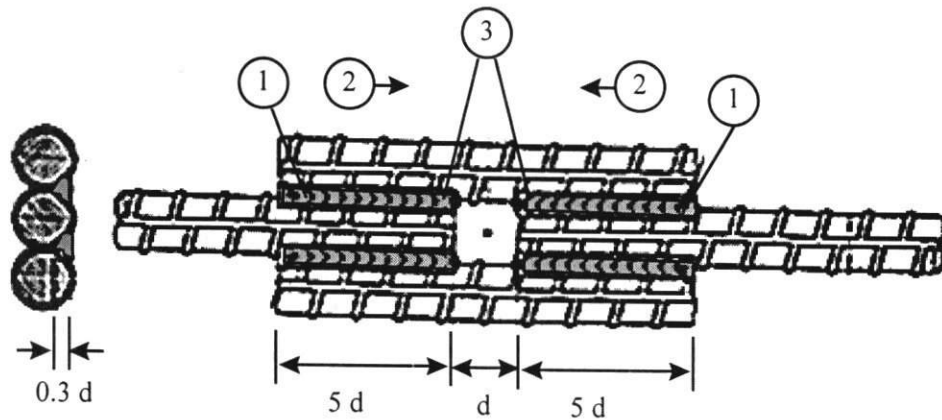


Figura 1b. Unión en X

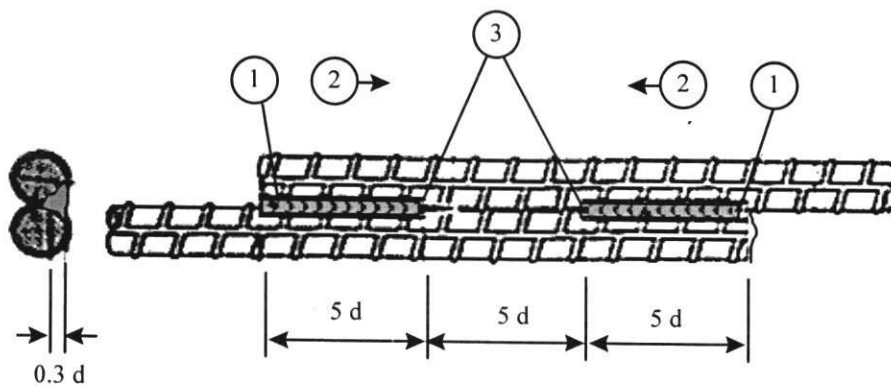


Figuras 1c. Unión vertical tipo BS (izquierda) y BD (derecha)



1. Cebado del electrodo
2. Sentido de la soldadura
3. Retirada del electrodo

Figura 1d. Unión a tope indirecto tipo VAD



1. Cebado del electrodo
2. Sentido de la soldadura
3. Retirada del electrodo

Figura 1e. Unión a traslape directo tipo TDC

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los biseles de las uniones en X, V, BS y BD, se prepararon mediante fresadora. Al respecto, se diseñó un dispositivo que permitía el alineamiento entre las dos barras, con el objeto de realizar la soldadura sin desplazamientos no deseados. Los

parámetros de soldadura de todas las uniones fueron consignados en el formato de procedimiento sugerido por el Structural Welding Code AWS D 1.4.

Los parámetros de soldadura se escogieron según las siguientes condiciones

Electrodo	Diámetro	Amperaje	Voltaje
Griduct1	4.0 mm	100 - 130 A	25 - 28
Griduct1	3.25 mm	90 - 120 A	25 - 28

Los electrodos se mantuvieron en horno de resistencia a una temperatura constante de 150 °C, con el fin de evitar adsorción de humedad.

A las uniones que exigían penetración total (**V**, **X**, **BS** y **BD**) se les esmerilaba con pulidora el primer pase con el objeto de eliminar defectos de fusión, se resoldaban y posteriormente se radiografiaban. Las que mostraban defectos eran repetidas. Las probetas se hacían por duplicado : una para ensayo de tracción, otra para dobladura.

Las uniones **VAD** y **TDC** se soldaron a velocidades entre 6 y 8 cm/min y el cordón fue depositado por un solo lado. No fue posible realizar el ensayo de dobladura por la dificultad del montaje. El ensayo de tracción se hizo por duplicado.

Las barras No. 10 se soldaron según los siguientes criterios:

1. Sin control de la temperatura y de entrada de calor. En este caso, se soldaba con electrodo de 3.25 mm para el primer pase y de 4.00 mm para los otros pases. En estas condiciones se podían conseguir temperaturas de interpase cercanas a los 250 °C, evidenciado por coloración azul típica en áreas cercanas a la soldadura.
2. Con control de temperaturas de interpase a 100 y 150 °C, mediante utilización de tizas térmicas entre 100 y 150 °C, con electrodo de 3.25 mm, y un máximo de 120 A

El ensayo de dobladura se realizó cumpliendo la norma ICONTEC NTC 2289 y evaluado según la norma ICONTEC NTC

2057 con mandril de 6 diámetros y exclusivamente para las uniones con sección transversal uniforme (**X**, **V**, **BS** y **BD**). Los ensayos de tracción de las uniones fueron ensayadas en máquina universal de resistencia. El cálculo del alargamiento, se hizo con base en una longitud de 6 “.

Luego del ensayo de tracción se tomaron muestras para observación metalográfica y de macroataque. Los ensayos de microdureza Knoop se realizaron con microdurómetro Leco, con carga de 10 gramos.

Las barras No. 8, 6 y 4 se soldaron controlando tanto la temperatura de interpases como el amperaje a los anteriores valores, pero sólo con el electrodo de 3.25 mm. Los procedimientos fueron similares a los seguidos para la barra No. 10.

Para todas las uniones se formatearon un total de 126 uniones.

4. RESULTADOS

4.1 Composición Química

El carbono equivalente se calculó por la fórmula propuesta por la AWS D1.1¹¹ cuyos valores aparecen en la tabla 1.

$$CE (AWS) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{50} + \frac{V}{10}$$

Tabla 1. Carbono equivalente AWS de las coladas para las barras anotadas.

Barra	No. 10	No. 8	No. 6	No. 4
Colada	1938	2164	2677	2804
CE(AWS)	0,42	0,40	0,44	0,45

4.2 METALOGRAFIAS

Se identifican claramente la transición de las zonas desde el metal base (capa superior martensítica, zona intermedia bainítica y zona central ferrito perlítica), a las de la zona afectada por el calor (de grano grueso, de grano fino, zona intercrítica y subcrítica) y zona de la soldadura.

Metal base no afectado.

- 1. Zona martensítica :** Dependiendo de la barra varía de 1,5 mm (en la No. 4) a 4.0 mm (en la No. 10). En ella se observan listones de martensita revenida de bajo carbono.
- 2. Zona bainítica :** Contiene martensita, bainita y ferrita. Hacia el centro más ferrita y hacia la superficie más martensita.
- 3. Zona perlítica :** Contiene cantidades de variables de bainita, perlita y ferrita, no formándose bainita en el centro.

Zona afectada por el calor.

- 1. ZAC-Zona de grano grueso :** Por lo general mientras mayor sea la temperatura alcanzada mayor es el diámetro del grano austenítico final. La microestructura puede variar de bainita y pequeñas cantidades de ferrita a una estructura de ferrita Widdmanstätten más bainita.
- 2. ZAC-Zona de grano fino :** Corresponde a la zona cuya temperatura de austenización está cerca a $A_{c_3} \approx 810^{\circ}\text{C}$. Tiene estructu-

ra muy fina y está asociada a una buena tenacidad. La estructura obtenida es de bainita y trazas de ferrita.

- 3. ZAC-Zona intercrítica :** Corresponde a la zona de temperaturas de austenización en el intervalo entre 730°C y 810°C . La estructura final consiste de ferrita y productos de transformación de la austenita residual : bainita ó en ocasiones perlita.
- 4. ZAC- Zona subcrítica :** Corresponde a la zona de temperaturas, entre 600°C y 730°C y presenta la globulización de los carburos. Casi no se observa esta zona en las microestructuras obtenidas a partir de las capas martensíticas y bainíticas.

Zona de la soldadura

Se distingue de la zona afectada por el calor por su aspecto columnar, y tiene como característica fundamental que sus granos están orientados hacia la línea central de la soldadura y se delinean por regiones centrales de ferrita proeutectoide. Su microestructura está consistuida por ferrita proeutectoide (delineando los granos austeníticos previos) y ferrita acicular (hacia el centro de los granos).

4.3 CRITERIO DE SOLDABILIDAD DE LA AWS SEGUN D1.4

La AWS D1.4 exige que todas las barras de refuerzo soldadas tengan una resistencia a la tracción de por lo menos el 125% del mínimo punto de fluencia entre los elementos unidos. El acero ASTM A706 de SIMESA posee un esfuerzo de

fluencia mínimo de 42 kg/mm², lo cual implica que la unión soldada debe de presentar una resistencia a la tracción superior a 53 kg/mm²

tracción de las barras soldadas en las especificaciones 10, 8, 6 y 4, con control de temperatura y de amperaje.

Las figuras siguientes muestran los valores encontrados para la resistencia a la cedencia y a la

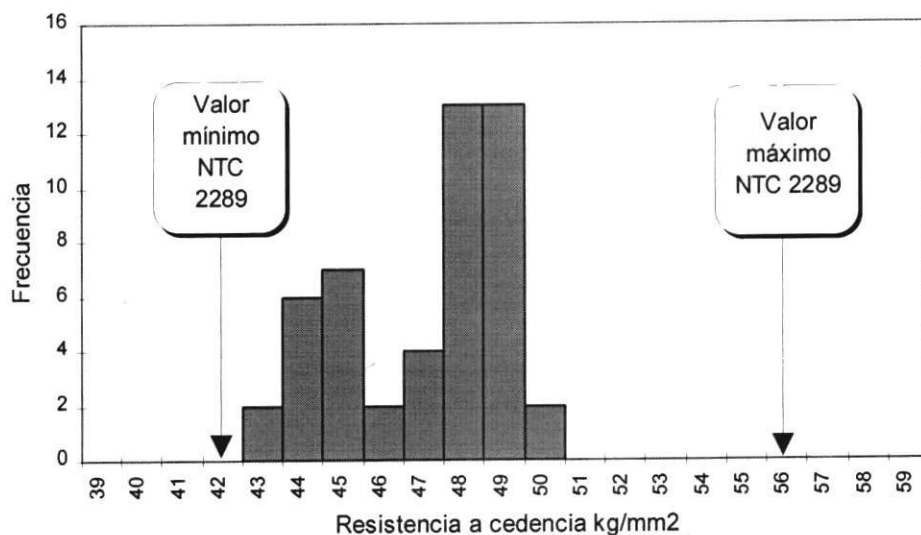


Figura 2. Resistencia a la cedencia de muestras de barras soldadas en las especificaciones Nos. 10, 8, 6 y 4, en el acero termotratado de SIMESA, con controles de temperatura y amperaje, con electrodo de 3.25 mm.

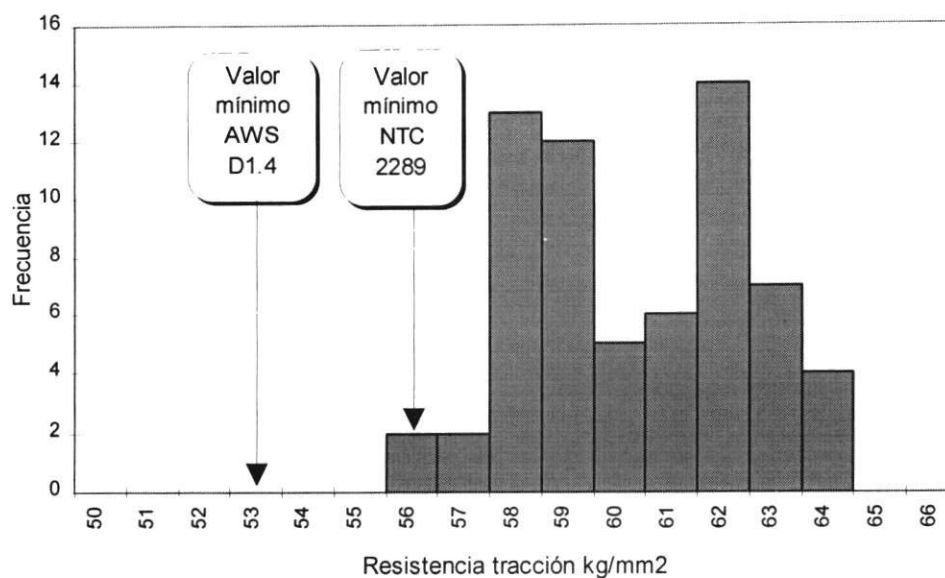


Figura 3. Resistencia a la tracción de la soldadura de las barras Nos. 10, 8, 6 y 4, en el acero termotratado de SIMESA, con control de temperatura (150° C máx) y amperaje (120 A máx).

Como se puede deducir, el valor mínimo de resistencia a la tracción que puede obtenerse en las uniones soldadas (56 kg/mm²) es superior al mínimo establecido según el AWS D1.4 (53 kg/mm²). Según este resultado, las barras de refuerzo producidas por SIMESA S.A. cumplen el criterio de soldabilidad exigido por el AWS D1.4

4.4 CRITERIO DE SOLDABILIDAD DE LA AWS SEGUN D1.1

De acuerdo al código AWS D1.1 se plantea como límite de dureza, al utilizar electrodos de bajo hidrógeno, un valor de 400 VHN y considera que valores inferiores a éste, no presentarán estructu-

ras frágiles ni ocurrirá agrietamiento en la zona afectada por el calor.

La siguiente figura ilustra las correlaciones obtenidas para las durezas máximas y mínimas en función del carbono equivalente. Véase la Tabla No. 1.

De los resultados obtenidos se deduce que el acero de refuerzo estructural fabricado por SIMESA cumple el criterio de soldabilidad en los aceros utilizados para las barras Nos. 10, 8, 6 y 4, puesto que no se consigue el límite superior de 400 HVN en la zona afectada para el calor.

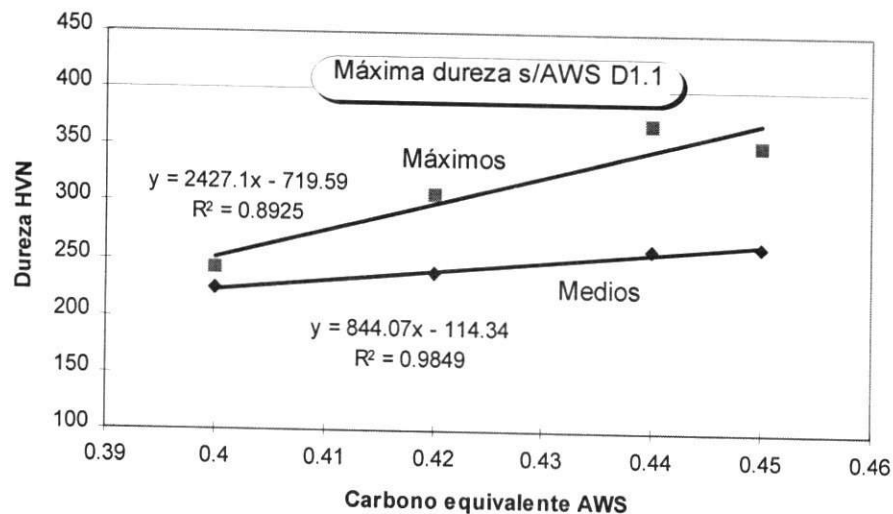


Figura 4. Valores medios y máximos de dureza (HVN) según los carbonos equivalentes de las barras utilizadas. Véase la Tabla 1 para su correlación con las barras.

El tratamiento de los datos de los anchos de las zonas afectadas por el calor indica que el control de la temperatura entre pases y de la entrada de calor hacen disminuir de 6.7 mm en promedio el ancho de la ZAC en la barra No. 10 sin control de temperatura y cerca de 2.2 mm cuando se ejerce el control. De aquí se deduce que las uniones realizadas sin control de temperaturas de interpases y de entrada de calor presentan mucho más recalentamiento de la estructura con respecto de las realizadas con control de temperatura.

De acuerdo a las metalografías estudiadas se observa que en la ZAC de la superficie la zona intercrítica está constituida por una mezcla de ferrita y posiblemente bainita. Esta estructura tiene una gran cantidad de ferrita extremadamente fina, como resultado de la austenización incompleta de la martensita, proporcionándole una buena tenacidad y por ende una buena resistencia mecánica. La fractura de estas uniones se realizó en el metal base, muy lejos de la zona afectada por el calor.

Puede deducirse que, si las soldaduras de las barras termotratadas se realizan con alta entrada de calor, proporcionando anchos de ZAC mayores a 6 mm, la estructura intercrítica no sólo va a tener un ancho mucho mayor sino que el grano ferrítico va a ser apreciablemente mayor y puede proporcionar una línea de falla en el ensayo de tracción.

4.5 APLICACIÓN DE LA NORMA NTC 2289

El valor de alargamiento es afectado por la geometría de la unión. La siguiente tabla resume los valores promedios de alargamiento obtenidos de los diferentes ensayos para cada una de las barras.

Tabla 3. Valores de alargamiento promedios de las uniones de las barras No. 10, 8, 6 y 4, realizadas controlando a un máximo de 150 °C la temperatura de interpases así como la entrada de calor.

	No. 10	No. 8	No. 6	No. 4
X	17	16	15	16
V	13	14	16	16
VAD	13	14.5	15	14.5
TDC	13	14.5	15	14
BS	11	8	NE	15
BD	16	13	NE	10

NE: Estas uniones no fueron evaluadas.

Como se observa, los más altos valores de alargamiento se observan en las uniones en X y en V; les siguen luego los que corresponden a los tipos VAD y TDC. Estas uniones cumplen, en promedio, los requisitos de alargamiento de la norma NTC 2289. Los más bajos valores de alargamiento, y que cuestionan seriamente su aplicación, se obtienen en las uniones BS y BD. Una posible razón, siendo necesario demostrarla, puede tener relación con la simetría de la unión en las uniones en X y en V, la cual es mucho mayor que las del tipo BS y BD (Figura 1), por lo tanto la distribución de tensiones es más uniforme en las primeras que en las segundas. Todas las

unionen en X y en V cumplieron el ensayo de dobladura. Las uniones BS y BD no presentaron (sistemáticamente) superar el ensayo de dobladura exigida por esta norma.

6. CONCLUSIONES

- 6.1 Todas las uniones poseen una resistencia a la tracción superior a la mínima exigida por el código AWS D1.4.
- 6.2 Aunque no es mandatorio por el código AWS, todas las uniones en que se controló la temperatura de interpases a un máximo de 150° C y 120 A máximo con

electrodo de 3.25 mm de diámetro, poseen una resistencia a la cedencia superior a 42 kg/mm², consistente con los lineamientos de NTC 2289. Esta recomendación está de acuerdo con la obtenida de fabricantes europeos de barra de acero de refuerzo estructural termotratado.

- 6.3 Las uniones BS y BD no presentan consistentemente altos valores de alargamiento. En el caso de las uniones verticales se recomienda reemplazarlas por las uniones VAD y TDC.
- 6.4 Todas las uniones poseen una dureza en la zona afectada por el calor, inferior a 400 HVN.
- 6.5 El electrodo E-9018G de la Messer Griesheim supera ampliamente las propiedades mecánicas del metal base y la zona afectada por el calor, puesto que ninguna de las uniones se fracturó por la soldadura.
- 6.6 Los carbonos equivalentes de los aceros estudiados varían en el rango de 0,40 a 0,45%. Por lo tanto, no se necesita precalentar a temperaturas superiores a la temperatura ambiente.
- 6.7 La utilización de altas temperaturas de interpases y altos amperajes unidos a diámetros de electrodos mayores de 3.25 mm ó con bajas velocidades de soldadura (excesivo ondulado) conduce (muy posiblemente) a la transformación intercrítica de la zona de martensita revenida en la superficie de la barra de refuerzo termotratada, a estructuras de muy baja dureza tipo ferrita más bainita. En estos casos, la propiedad más seriamente afectada es el alargamiento y en menor grado la resistencia a la cedencia.

7. EXPERIENCIAS RECIENTES EN LA SOLDADURA DE BARRAS SIMESA

- 7.1 Puente del Mico (Terminal del Norte-Medellín). La ampliación de dicho puente (1996) fue realizada bajo la interventoría de la empresa Soldaduras Industriales. Las uniones se realizaron preferiblemente en las del tipo TDC y VAD.
- 7.2 Puente de Tumaco (Cauca): La soldadura de las barras para refuerzo del concreto fue escogida a la técnica del amarre por su economía en acero necesario para su construcción. El traslape para el amarre de las barras se calculaba en 2.6 m y para un total de 120 pilotes implicaba un sobre costo de 50 toneladas más de acero. Se recomendó la unión TDC (era necesario aplicar la soldadura de un sólo lado) y no excederse en el amperaje de los 120 A. Con esto se logró una economía de \$ 25.000.000
- 7.3 Banco de Occidente (Medellín): No era posible el amarre de las barras y por ello se utilizó la unión TDC y se recomendó soldar a 110 A. Los resultados mostraron que el 100% de las barras fracturaron por el metal base.
- 7.4 Edificio en El Poblado (Medellín): Se presentó reclamo por baja resistencia a la tracción, de 49 a 52 kg/mm². Al realizarse la inspección se observó que se estaban soldando a 220 A y se recomendó rebajar a 120 A. El cliente posteriormente reporta satisfacción por los resultados de los nuevos ensayos.
- 7.5 Ampliación del Centro Comercial Oviedo (Medellín): Se utilizó la unión en V, ya que por las exigencias del terreno no permitía el traslape.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, Yesid y ARROYO, R. Soldadura de aceros nacionales para refuerzo de concreto. Jornadas de Metalurgia y Tecnología de la Soldadura. Cali,, Julio (1985)
- American Standard of Testing Materials. ASTM A - 706.
- American Welding Society. ANSI/AWS D1.4-92 Structural Welding Code. Reinforcing Steel. 4th Ed.
- CADENA, A. Soldabilidad de barras corrugadas de acero de baja aleación y termotratadas para concreto reforzado en construcciones de diseño sismoresistente, producida por siderúrgica Hornos Nacionales S.A., bajo Norma NTC 2289. Tesis de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. 1994.
- Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes. Decreto 1400 de Junio de 1884.
- CONTRERAS, J. Soldadura de las varillas estructurales nacionales de alta resistencia. Universidad Nacional. Ingeniería e Investigación. (1984)
- DEFOURNY, J. and BRAGARD, A. TEMPCORE-Process, the Solution to Rebar Welding Problems. C.R.M. No. 50 Apr (1977).
- DEFOURNY, J. and BRAGARD, A. Guide for the Welding and Weldability of Reinforcing Steels for concrete structures. Welding in the World. Vol. 24. No. 11-12 UK (1986)
- EASTERLING, K. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Butterworth Heinemann 2nd Ed., 1992 p: 263
- ECHAVARRIA, A., Y SEGURO, R. Soldabilidad del acero de refuerzo estructural para aplicaciones sismoresistentes fabricado por SIMESA. Universidad de Antioquia. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales. Febrero de 1997
- ICONTEC. C. Código para calificar el procedimiento de soldar y la habilidad del soldador. Norma ICONTEC 2057. (1986)
- ICONTEC. Norma NTC 2289. Norma para barra de acero de refuerzo estructural.
- Integral S.A. Especificaciones de soldadura de barra de refuerzo estructural No. 6 en acero ASTM A706 Grado 60, fabricado por SIMESA. Medellín. (1994)
- LEY 400 DE 1997 - DECRETO 33 DE 1998. NORMA SISMORESISTEMTE NSR 98.
- Topar 500 S. Instructions de soudage.