

Soldabilidad de varillas con resaltes de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado.

Rodrigo Corral Franco¹, Julián Peña Estrella²

¹Ingeniero Mecánico, ²MSc Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
rodrigoxcf@hotmail.com, jpena@espol.edu.ec

Resumen

Actualmente el mercado de la construcción carece de los parámetros que rigen el uso de empalmes soldados en las barras corrugadas de acero al carbono, aun cuando el Código Ecuatoriano de la Construcción delega la responsabilidad de fijar estos parámetros al Código D1.4 de la Sociedad Americana de Soldadura. El presente trabajo desarrolla la calificación de un proceso de soldadura para barras corrugadas de acero al carbono, tratando de seleccionar los procedimientos de soldadura y materiales de aporte mas comúnmente usados en el ámbito de la construcción. A partir de la definición de soldabilidad de los aceros, se determinan las características de las barras de acero al carbono que influyen en esta al momento de determinar la soldabilidad de la misma. Usando como guía el Código D1.4 se desarrolla un procedimiento de soldadura partiendo de la selección del tipo de junta, procedimiento y metal de aporte, para luego elaborar las probetas usando el electrodo recomendado (E9018) el cual no se encuentra en fabricación nacional, adicionalmente se elaboran probetas usando electrodo E7018 con la finalidad de determinar la factibilidad de su utilización en las uniones soldadas de barras de acero al carbono. Se seleccionan los ensayos de aceptación para las probetas, obteniendo resultados positivos en la inspección visual, ensayo mecánico y macrográfico pudiendo así determinar que las barras corrugadas de acero al carbono de un porcentaje de 0,51 de Carbono Equivalente son soldables usando electrodos E9018 y E7018.

Palabras Claves: Soldabilidad, varillas corrugadas, acero al carbono, procedimiento de soldadura.

Abstract

At the moment the building market lacks of the parameters that govern the use of welded joints in bars corrugated of carbon steel, even though the Ecuadorian Building Code it delegates the responsibility to fix these parameters to the Code D1.4 of the American Welding Society. The present work develops the qualification of a welding process for bars corrugated of carbon steel, selecting the welding procedures and filler metal most commonly used in the building market. Beginning with the definition of weldability of steel, the characteristics that influence on the bars of carbon steel are determined at the time determining the weldability. Using as guide the D1.4 Code a welding procedure is developed starting off of the selection of the joint, procedure and filler metal, then elaborate the test samples using the recommended electrode (E9018) which is not locally manufactured, additionally are elaborated test samples using E7018 electrode with the purpose of determining the feasibility of its use in the welded joint of bars of carbon steel. Visual inspection, mechanical and macrographical test are selected to the acceptance trials for the test samples, obtaining positive results thus being able to determine that the bars corrugated of carbon steel of a percentage of 0.51 of Equivalent Carbon are weldable using electrodes E9018 and E7018.

1. Introducción

La construcción de estructuras de hormigón armado usando aceros estructurales con uniones soldadas son viablemente económicas y técnicamente aceptables, ya que las uniones soldadas de los aceros estructurales no tienen influencia en la estructura de hormigón.

Siguiendo los lineamientos del Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC), en su segunda parte (CPE INEN 5 Parte 2:1993), el cual indica en el literal 1.1.8 “Las especificaciones y practicas recomendadas de otras normas que no son del INEN, a las cuales se hace referencia en esta parte del Código, serán validas hasta cuando el INEN elabore sus equivalentes.”

El Capitulo 3 del CEC, sección 3.5 se refiere al acero de refuerzo, donde la sección 3.5.2 explica “las varillas de refuerzo que vayan a soldarse deben estar señaladas en los planos, debiéndose especificar los procedimientos de soldadura que se van a emplear. Las especificaciones ASTM para varillas de refuerzo, excepto la ASTM A706, deben complementarse para requerir un informe de las propiedades del material necesarias para cumplir con los procedimientos de soldadura especificados, en el Código de Soldadura del Acero de Refuerzo (AWS D 1.4) de la Sociedad Americana de Soldadura.

Debido al incremento en el costo de los materiales de construcción, los constructores hacen uso de cualquier método para disminuir sus costos de mano de obra, y uno de estos métodos es el de reemplazar los empalmes con alambre de una armadura de varilla, con puntos de soldadura. Esta practica fue analizada en la Tesis de Grado “Estudio Sobre el Efecto de los Puntos de Soldadura en las propiedades Mecánicas de los Hierros Corrugados de Producción Nacional”, dando como una de sus conclusiones (la No. 11) que “De los ensayos realizados, se concluye que estos aceros no son recomendables para ser soldados en las condiciones en que este trabajo actualmente se realiza”.

Sin embargo esto no debe ser motivo para evitar las uniones soldadas en las varillas de construcción, en vista que la tesis de grado en referencia se realizo en el año 1981, es la intención de la presente investigación de tesis de grado el seguir los lineamientos del Código Ecuatoriano de la Construcción y determinar los procedimientos a seguir en concordancia con sus requisitos para demostrar la soldabilidad de los aceros estructurales de medio carbono.

2. Procedimiento experimental

Material base.

Las barras de acero corrugado fabricadas por la empresa NOVACERO S.A. cumplen con los requisitos establecidos por la norma ASTM A615M (Barras lisas y corrugadas para hormigón armado obtenidas de palanquilla de acero), o por su homologa nacional que es la NTN INEN 102 (Varillas con resaltes de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos).

Estas barras son fabricadas en Grado 420 (para la designación según la ASTM A615) o Grado A42 (para la designación de la NTE INEN 102).

Se realizo un ensayo químico al lote suministrado para obtener las muestras a ensayar, obteniéndose los resultados de la TABLA 1.

| TABLA 1 | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| PARAMETROS QUIMICOS ANALIZADOS | | | |
| %C | %Mn | %Si | %S |
| 0.4184 | 0.55824 | 0.08843 | 0.03310 |
| %P | %Cu | %Ni | |
| 0.02113 | 0.02496 | 0.0269 | |

Las barras usadas tanto en la calificación del soldador, como el proceso de soldadura, es de un diámetro de 28 mm.

Proceso de soldadura.

En vista de que el proceso más usado en el mercado de la construcción es el de electrodo revestido (SMAW Shield Metal Arc Welding), este se convierte en nuestra selección para calificar.

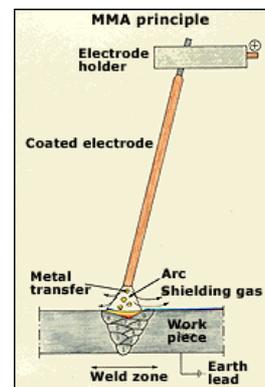


Figura. 2.1 Proceso de Soldadura de Electrodo Cubierto

Un Arco Eléctrico es mantenido entre la punta de un electrodo cubierto (Coated Electrode) y la pieza a trabajar. Las gotas de metal derretido son transferidas a través del arco y son convertidas en un cordón de soldadura, un escudo protector de gases es producido de la descomposición del material fundente que cubre el electrodo además, el fundente también puede proveer algunos complementos a la aleación, la escoria derretida se escurre sobre el cordón de soldadura

donde protege el metal soldado aislándolo de la atmósfera durante la solidificación, esta escoria también ayuda a darle forma al cordón de soldadura especialmente en soldadura vertical y sobre cabeza. La escoria debe ser removida después de cada procedimiento.

Tipo de junta.

Las barras de refuerzo pueden ser soldadas mediante varios tipos de juntas, entre estas se encuentran las uniones: directas a tope, indirectas a tope, a traslape y en T.

| TABLA 2 | | | | |
|---|----------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| Dimensiones más comúnmente usadas en barras de acero de refuerzo. | | | | |
| Numero | Diámetro (mm.) | Area (mm ² .) | Perímetro (mm.) | Peso (Kg/m) |
| 3 | 9,52 | 71 | 29,9 | 0,560 |
| 4 | 12,70 | 129 | 39,9 | 0,994 |
| 5 | 15,88 | 199 | 49,9 | 1,552 |
| 6 | 19,05 | 284 | 59,8 | 2,235 |
| 7 | 22,22 | 387 | 69,8 | 3,042 |
| 8 | 25,40 | 510 | 79,8 | 3,973 |
| 9 | 28,65 | 645 | 90,0 | 5,060 |
| 10 | 32,26 | 819 | 101,3 | 6,404 |
| 11 | 35,81 | 1006 | 112,5 | 7,907 |
| 14 | 43,00 | 1452 | 135,1 | 11,38 |
| 18 | 57,33 | 2580 | 180,1 | 20,24 |

En vista de que la mayor utilización que tienen las barras corrugadas de gran longitud (mayor a la provista por el mercado de 12 metros) es usada en la construcción de edificios, donde los diámetros de barra superan los 16 mm, se debe tomar en cuenta que el código en la sección 3.2.2 indica que el uso de uniones en traslape debe estar limitada a las barras No. 6 o mas pequeñas. Esto se debe a la excentricidad creada por los traslapes, y si bien se decide realizar este empalme, el diseñador de la armadura deberá haber tomado consideración de este detalle constructivo, de manera que no se afecte la integridad estructural del diseño.

Para el efecto de la presente tesis, se considero la unión a tope directa, la cual debe ser soldada con soldadura de penetración completa según la Fig. 2.2

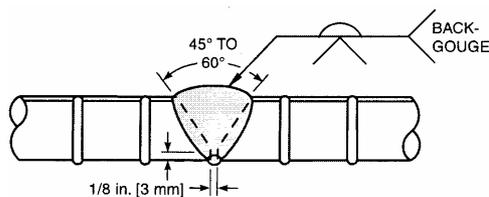


Fig. 2.2 Unión directa a tope, biselada en ambos extremos.

Metal de aporte.

| TABLA 3 | | | | | | |
|--|--------------------------|-----|-----|--|---------|---------|
| REQUERIMIENTOS DEL METAL DE APORTE Y EL METAL BASE | | | | | | |
| GRUPO | ESPECIFICACION DEL ACERO | Sy | Sut | ELECTRODO DE ESPECIFICACION | Sy | Sut |
| | | MPa | MPa | | MPa | MPa |
| I | ASTM A615M GRADO 300 | 300 | 500 | SMAW AWS A5.1 y 5.5 E7015, E7016, E7018, E7028 E7015-X, E7016-X, E7018-X | 365-496 | 482 |
| | | | | GMAW AWS A5.18 ER70S-X, E70C-3, E70C-3 | 400 | 480 |
| | | | | FCAW AWS A5.20 y A5.29 E7XT-X E7XTX-X Except. de -2,-3,-10,-13,-14,-GS | 400 | 480-620 |
| II | ASTM A706M GRADO 420 | 420 | 550 | SMAW AWS 5.5 E8015-X, E8016-X, E8018-X | 460 | 550 |
| | | | | GMAW AWS A5.28 ER80S-X, E80C-X, E90C-X | 470 | 550 |
| | | | | FCAW AWS A5.29 E8XTX-X | 470 | 550-690 |
| III | ASTM A615M GRADO 420 | 420 | 600 | SMAW AWS 5.5 E9015-X, E9016-X, E9018-X | 530 | 620 |
| | | | | GMAW AWS A5.28 ER90S-X | 540 | 620 |
| | | | | FCAW | 540 | 620 |

| | | | | | | |
|----|-------------------------------|-----|-----|---|-----|-------------|
| | | | | AWS A5.29 E9XTX- X | | |
| IV | ASTM A615M GRADO 520 | 520 | 700 | SMAW AWS 5.5 E10015- X, E10016- X, E10018- X E10018- M | 600 | 690 |
| | | | | GMAW AWS A5.28 ER100S, ER100C- X | 610 | 690 |
| | | | | FCAW AWS A5.29 E10XTX- X | 610 | 690- 830 |

La selección del metal de aporte debe realizarse de acuerdo a la Tabla 3, entonces teniendo en cuenta que las barras de acero a ser soldadas, pertenecen a la clasificación ASTM A615M Grado 420, y habiendo seleccionado un proceso SMAW (Soldadura por arco de electrodo revestido), el tipo de acero recae en el GRUPO III, donde se pueden seleccionar tres tipos de electrodos: E9015-X, E9016-X, E9018-X.

En vista de que no se fabrica a nivel nacional estos tipos de electrodos, se procedió con la importación por medio del departamento de adquisiciones de AGA.

El electrodo importado pertenece a la familia del E9018, adicionalmente se utilizó un tipo de electrodo que si se fabrica y provee a nivel nacional, el E7018. Esto con el fin de evaluar la factibilidad de usar un electrodo de fabricación nacional, aunque esto no sea el recomendado por el Código D1.4

Determinación de la temperatura de precalentamiento.

Uno de los objetivos de precalentar el material base, es el de uniformizar la temperatura de este, para evitar que en el momento de la soldadura y aporte del material, existan esfuerzos relacionados con el cambio brusco de temperatura. El objetivo es evitar que el material se temple, o propicie la creación de zonas con formación de estructuras martensíticas, por cuanto endurecerían el material y reducirían su comportamiento elástico, eliminando así la propiedad sismorresistente de la unión soldada.

Como se vio con anterioridad el CE (Carbono Equivalente) es determinante en la templabilidad de un acero, por cuanto se realiza el cálculo del Carbono

Equivalente para el material base usando la siguiente formula.

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6}$$

donde se toma los datos del reporte de análisis químico (EC-PRO-0039 B), realizado en AGA. Entonces:

$$C.E. = 0,4184\% + \frac{0,55824\%}{6} = 0,51144$$

| Rango de C.E. % | Tamaño de la barra mm | Temperatura mínima °C |
|-------------------------|---|-----------------------------|
| $C.E. \leq 0,40$ | $D \leq 36$ 43 y 57 | - 10 |
| $0,40 < C.E. \leq 0,45$ | $D \leq 36$ 43 y 57 | - 10 |
| $0,45 < C.E. \leq 0,55$ | $D \leq 19$ $22 \leq D \leq 36$ $43 \leq D \leq 57$ | - 10 90 |
| $0,55 < C.E. \leq 0,65$ | $D \leq 19$ $22 \leq D \leq 36$ $43 \leq D \leq 57$ | 40 90 150 |
| $0,65 < C.E. < 0,75$ | $D \leq 19$ $22 \leq D \leq 57$ | 150 200 |
| $C.E. > 0,75$ | $D \leq 19$ $22 \leq D \leq 57$ | 150 260 |

Usando la tabla 4, este valor recae dentro del intervalo "Sobre 0,45 hasta 0,55 inclusive", se obtiene que para barras desde 22 a 36 mm se necesita que la barra se encuentre a 10 °C, por lo que haciendo uso de un medidor láser de temperatura, se verifica que la temperatura de la barra no se encuentra a menos de 2 °C de la temperatura ambiente, que se mantiene en 32 °C.

3. Elaboración de las probetas

Preparación del metal base.

Las superficies a ser soldadas deben estar libres de limallas, grietas u otros defectos que pudiesen afectar negativamente la calidad o resistencia de la soldadura. Las superficies a ser soldadas, y las superficies adyacentes a la soldadura, deberán también estar libres de humedad, oxido, grasa, recubrimientos epóxicos u otro material que pudiese afectar la unión soldada o pudiese en el proceso expeler vapores o gases nocivos.

Los extremos de las barras de acero, para una unión directa a tope, deben ser formadas por medio de oxicorte, sierras u otros procedimientos mecánicos (Fig. 3.1).



Figura. 3.1 Corte del extremo de la barra de acero con disco de sierra.

Ensamble de las probetas.



Figura. 3.2 Alineación de la unión a tope en V.

La unión de los elementos debe ser alineada, de manera que se minimicen las excentricidades, las barras de la numeración No. 10 (32 mm) o menores, deben tener una separación menor o igual a 3mm entre los ejes de las dos barras (Fig. 3.2).

Calificación del soldador y del procedimiento de soldadura.

Debido a que no se encontró un soldador calificado para realizar juntas, de acuerdo a los requerimientos del Código D1.4, NOVACERO S.A. procedió a enviar a un operador del área de Proyectos, con previa experiencia en soldadura bajo otros procesos, para que realice la calificación como soldador acreditado por AGA, según el Código D 1.4 de la AWS.

Las mismas probetas usadas para calificar al soldador, y los resultados de estas, fueron utilizadas para calificar el proceso de soldadura.

Calificación del Soldador.

El soldador (Jhon Jairo Bautista) fue calificado en un proceso de soldadura SMAW, o soldadura por electrodo revestido; para un ensamble de junta de penetración completa a tope, tal como se vio en la

figura 2.1. La posición de soldadura es la 3G (Fig. 3.3 y Fig. 3.4), con un ángulo de 60° para el bisel, sin usar respaldo.

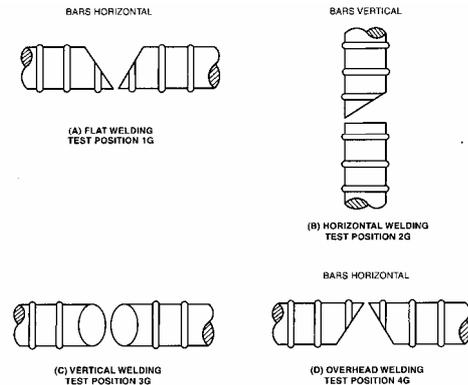


Figura. 3.3 Posiciones de las probetas para una junta a tope.



Figura. 3.4 Fotografía del operador soldando en posición 3G.

Parámetros de soldadura.

Probeta 1

Se utiliza corriente directa con un amperaje en un rango entre 110 y 130 amperios, y un voltaje en un rango de 20 a 28 voltios.

Con barras de acero al carbono tipo ASTM A615M de 28 mm de diámetro, y con un CE de 0,51, se usó un electrodo E9018-G H4R.

Probeta 2

Se utiliza corriente directa con un amperaje en un rango entre 130 y 150 amperios, y un voltaje en un rango de 22 a 30 voltios.

Con barras de acero al carbono tipo ASTM A615M de 28 mm de diámetro, y con un CE de 0,51, se usó un electrodo E7018.

Calificación del Procedimiento de Soldadura.

El Proceso de soldadura se califica al mismo tiempo que los ensayos realizados sobre las probetas cumplan

satisfactoriamente los requisitos del código D1.4 para la calificación del soldador.



Figura. 3.5 Secuencia de soldadura.

La unión soldada se realizó tal como se muestra en la secuencia de fotos (Fig. 3.5)

Ensayos y análisis de las probetas.

Para una unión directa a tope (Fig. 3.6) son requeridas dos probetas, las cuales deberán ser inspeccionadas por radiografía.

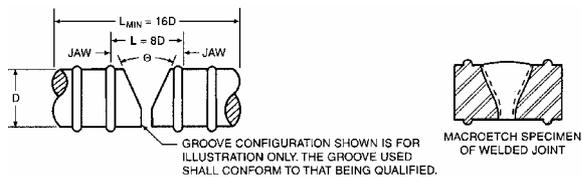


Figura. 3.6 Sección a realizar ensayo de tracción y microscopia para calificación de soldador y proceso de soldadura.

Si no se desea realizar el ensayo radiográfico, se puede realizar un ensayo de tensión que cumpla con por lo menos el 125% de la resistencia a la fluencia del tipo de barra a ser ensayada, mas una macroscopia, siendo esta la selección de ensayos a realizarse, con fines didácticos, sin embargo para futuras certificaciones de soldadores o procesos de soldadura, así como también para certificaciones de uniones soldadas en obra, es suficiente realizar los ensayos radiográficos, tal como lo explica el código D1.4 en la sección 7.9.



Figura. 3.7 Probetas para ensayos.

Para esto se realizaron 4 probetas, dos usando electrodo E7018 y dos usando electrodo E9018 (Fig. 3.7)

Macroscopia.

Para las probetas a las que se realizara un ensayo macroscópico, la unión soldada deberá ser cortada mecánicamente transversalmente a la dirección de la soldadura, el corte debe mostrar la sección transversal de la soldadura, la raíz y cualquier refuerzo que se haya usado (Fig. 3.6 y Fig. 3.8)

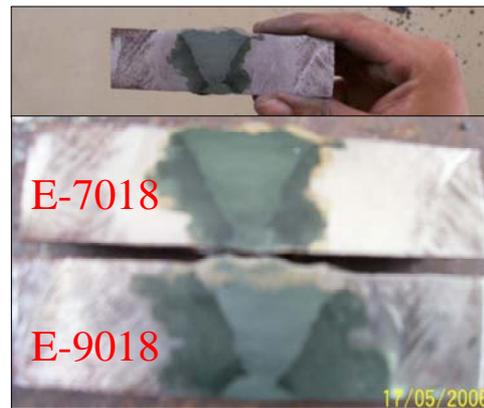


Figura. 3.8 Probetas para macroscopia.

Se examinó la probeta reportando que no se encontró discontinuidades, tales como grietas en el material aportado por el electrodo o la zona afectada por el calor (ZAC). Se inspecciono ambas probetas certificando que existe fusión entre el metal base y el metal de aporte y entre los pasos sucesivos usados en la unión soldada.

Ensayo de tracción.

Las probetas fueron ensayadas en el laboratorio del INEN en la ciudad de Quito, al ser la única que posee una maquina de ensayos de tracción capaz de romper varillas de hasta 44 mm de diámetro.



Figura. 3.9 Probeta 1, con electrodo E9018.



Figura. 3.10 Probeta 2, con electrodo E7018.

El código especifica que se debe alcanzar por lo menos el 125% del valor de la resistencia para la varilla tipo A42 (o grado 420), donde el 125% de 420 MPa, es 525 MPa.

La Probeta No. 1 (Fig. 3.9) presento un $S_{ut} = 562$ MPa, fracturándose en la barra y no en la unión soldada.

La Probeta No. 2 (Fig. 3.10) presento un $S_{ut} = 563$ MPa, fracturándose en la barra y no en la unión soldada.

De las probetas con la junta a traslape, no se pudieron obtener resultados satisfactorios, ya que luego de varios intentos no pudieron ser fijadas en la maquina de ensayos, ya que al momento del ensayo existía deslizamiento entre las muelas y la barra aplicando la carga sobre la probeta en un ángulo entre 5 y 10 grados de inclinación, lo que cargaba directamente sobre la soldadura, por lo que no se incluyen resultados sobre este tipo de junta.

4. Conclusiones

Cualquier cambio en las variables esenciales requerirá una recalificación del procedimiento para estos nuevos parámetros:

Cambio en el diámetro o resistencia del electrodo, o del recubrimiento; cambio en el rango de amperaje o voltaje; cambio en la preparación de la junta que signifique un exceso de 5° en el ángulo del bisel, cambio en la raíz por ± 1.6 mm.

Siguiendo las indicaciones el electrodo ideal para este empalme es el E9018, sin embargo al no encontrarse disponible en el mercado se realizo un procedimiento de soldadura para el electrodo comercial E7018, cumpliendo este con los requisitos del Código AWS D1.4

Las barras corrugadas de acero al carbono de un porcentaje de 0,51 de Carbono Equivalente son soldables usando los WPS aquí desarrollados.

11. Agradecimientos

Agradecemos a la escuela de soldadura de AGA por el suministrar las instalaciones y el soporte técnico en el desarrollo de la investigación, así como al laboratorio del INEN que realizo los ensayos destructivos. A los directivos de la empresa NOVACERO, por depositar su confianza en mi y facilitar los recursos en el desarrollo de esta investigación.

12. Referencias

- AVNER, SYDNEY. "Introducción a la metalurgia física". 2da edición. México D.F. McGRAW HILL 1996.
- ASKELAND, DONALD. "La Ciencia e Ingeniería de los materiales". Grupo Editorial IBEROAMERICA, 1985
- INEN. "Código Ecuatoriano de la Construcción".
- NTE INEN 102:2003. "Varillas con resaltes de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado".
- ASTM A615:A615M-01. "Standard Especification for Deformed and Plain Billet-Steel Bar for Concrete Reinforcement".
- AWS D1.4/D1.4M:2005. "Structural Welding Code – Reinforcing Steel".
- TESIS DE GRADO DE JULIO MEDINA MAZON. "Estudio sobre el efecto de los puntos de Soldadura en las Propiedades Mecánicas de los Hierros Corrugados de Producción Nacional".
- ESPOL. "Seminario de Soldadura al Arco". 1980
- ACI 318-05 "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". ACI Committee 318, 2005