

SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA

Por Hernando Rodríguez V.
Ingeniero Mecánico - Profesor
de la sección de Materiales Metálicos
del Depto. de Ing. Mecánica (U.N.)

INTRODUCCION

La soldadura de los aceros estructurales de alta resistencia se presenta con mucha frecuencia en la construcción tanto mecánica como civil; sin embargo, es común el desconocimiento que se tiene de estos fenómenos y el ingeniero se encuentra muchas veces sin criterios para tomar decisiones que algunas veces implican grandes riesgos.

Es muy difícil dar normas exactas para soldarlos, ya que su soldabilidad está asociada básicamente con las dimensiones y la composición química y ésta varía dentro de rangos relativamente amplios.

En las obras civiles, algunas veces, para armar la estructura de las columnas se sueldan sin tomar precauciones anillos de alambrón, alrededor de varillas de refuerzo grado 60; en los talleres se sueldan chasis y estructuras ornamentales, utilizando el mismo electrodo, el mismo operario y las mismas precauciones, a pesar de que los chasis hayan sido deformados en frío. En fin, se suelda todo de la misma manera. El objetivo de este artículo es fijar algunos criterios que permitan realizar mejor estas soldaduras.

El hecho de que aparezcan más informaciones sobre soldabilidad de aceros para refuerzo de concreto que de otros aceros estructurales, se debe a que es el área en la cual el autor tiene más experiencia directa.

A pesar de que la información que se presenta en este artículo es muy somera, esperamos que sea de utilidad, pues proporciona prácticos elementos de análisis a aquellas personas que se encuentran alejadas de la disciplina metalúrgica.

1. CONCEPTOS BASICOS DE SOLDABILIDAD

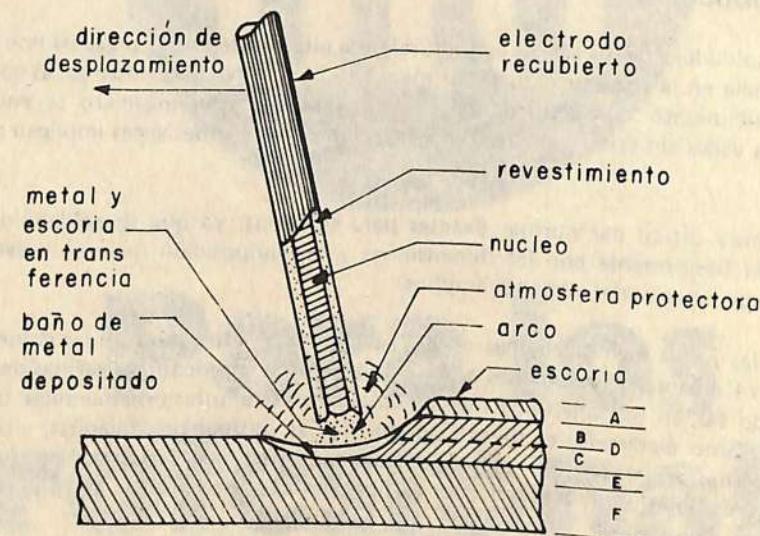
1.1. El ciclo térmico de la soldadura en un acero

1.1.1. Descripción

Si tomamos como base de estudio una junta bien realizada mediante el sistema de arco eléctrico y electrodo recubierto, podemos asumir los siguientes hechos:

- La temperatura del arco es de 5000°C, como mínimo.

- La temperatura de la soldadura en estado líquido, inmediatamente después de ser depositada, es de aproximadamente 1350°C.
- La transferencia de calor que se produce tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, es generalmente por conducción.



- A : lecho de escoria
- B : refuerzo de soldadura
- C : penetración
- D : depósito de soldadura
- E : zona afectada térmicamente en el metal base
- F : metal base no afectado térmicamente.

Fig. 1 - EL ARCO ELECTRICO
(Tomado de Welding Metallurgy - Linnert)

1.2 Zonas de una soldadura

Cuando analizamos al microscopio una soldadura, el área de mayor interés no es la de fusión del metal; generalmente es en la zona adyacente (o zona ajustada térmicamente) donde se presentan los efectos más desfavorables.

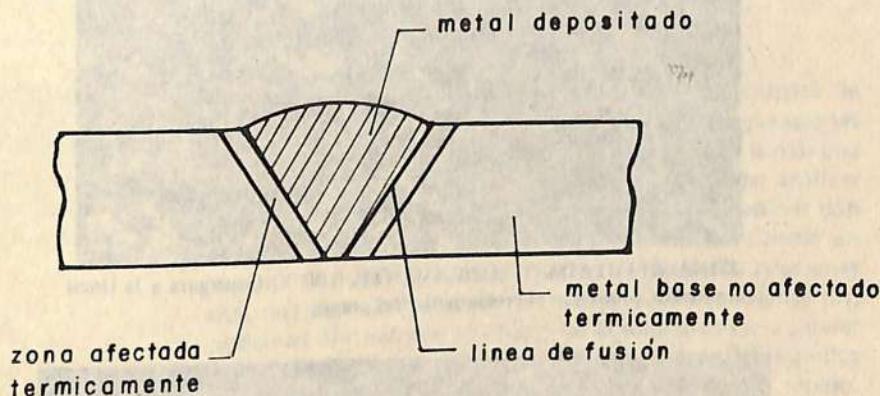
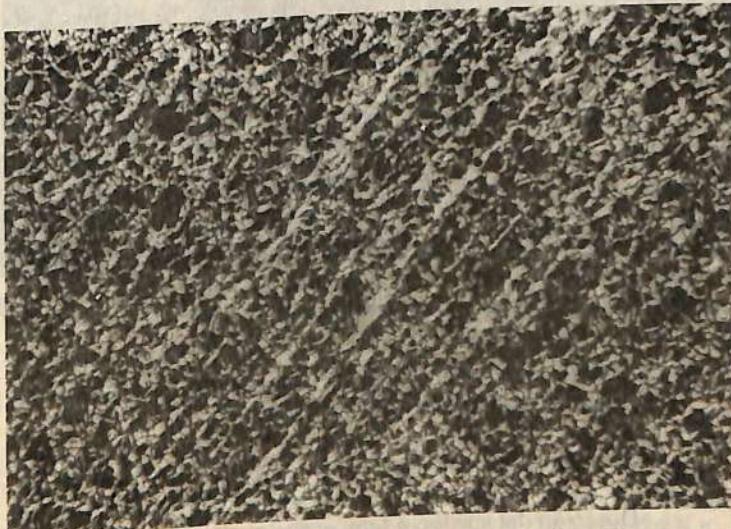
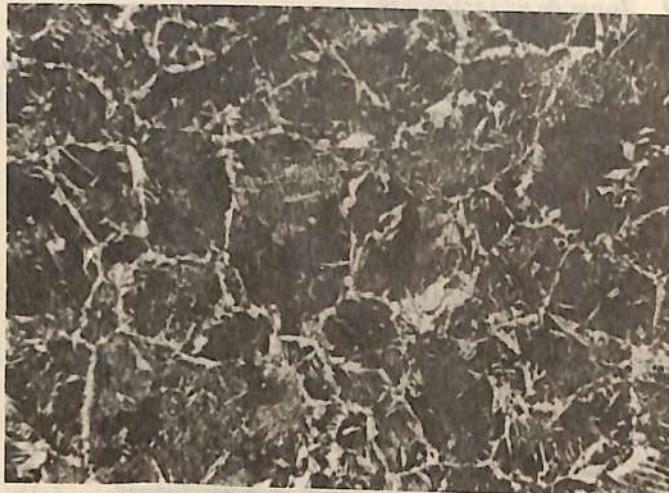


Fig. 2 - ZONAS DE UNA SOLDADURA



METAL BASE NO AFECTADO TERMICAMENTE. 50 X. El grano es relativamente fino. La estructura es ferrítico perlítica.



ZONA AFECTADA TERMICAMENTE. 100 X. Configura a la línea de fusión, obsérvese el crecimiento del grano.



LINEA DE FUSIÓN. 100 X. A la derecha se ve el material de aparte, a la izquierda, la zona afectada térmicamente (Grano grande).

1.1.3. Variables que determinan las propiedades mecánicas de las zonas fundidas y térmicamente afectadas

- La máxima temperatura
- Duración del cordón a temperaturas elevadas
- Velocidad de enfriamiento

1.1.3.1 La Máxima Temperatura

Dependerá del balance entre las velocidades de entrada y salida de calor; la máxima temperatura se alcanzará cuando la velocidad de salida de calor iguale a la de entrada de calor. La temperatura será mayor en la medida en que la intensidad de la fuente de calor sea grande y el metal por soldar sea mal conductor del calor.

1.1.3.2. Duración a altas temperaturas

También dependerá del balance entre las velocidades de entrada y salida de calor. En la mayoría de las operaciones de soldadura, tan pronto como el metal alcanza la máxima temperatura, ésta empieza a descender; para poder analizar mejor el efecto temperatura–tiempo, podemos asumir con mucha aproximación que la junta soldada permanece un segundo a 1350°C (ver gráfico 3); si utilizamos relaciones que nos permitan calcular un tratamiento equivalente (3), podemos afirmar que el efecto de la soldadura sería similar al de tratamientos térmicos de 1200°C durante 30 segundos o 1000°C durante 3 horas, con un enfriamiento rápido.

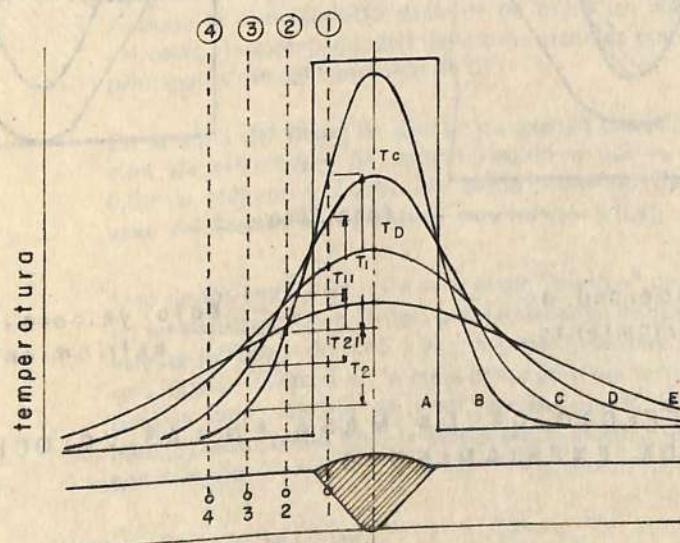


Fig. 3 — DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS AL REDEDOR DE UNA SOLDADURA

(Tomado de Welding Metallurgy — Linnert)

Lo anterior explica con gran claridad por qué se presenta tanto crecimiento de grano al aplicar un simple punto de soldadura.

1.1.3.3. Velocidad de enfriamiento:

Asumiendo que la fuente de calor es constante (Intensidad), la velocidad de enfriamiento dependerá, además de la conductividad térmica, de:

- La masa total de la pieza donde se realiza la soldadura (Ver gráfico 4), debido a que el enfriamiento se produce más rápidamente por conducción y la pieza tendrá zonas frías durante mayor tiempo que la pequeña; o sea que el gradiente de temperatura disminuye rápidamente, mientras que en la pequeña el gradiente lo hace más lentamente.

(Gráfico No. 4)

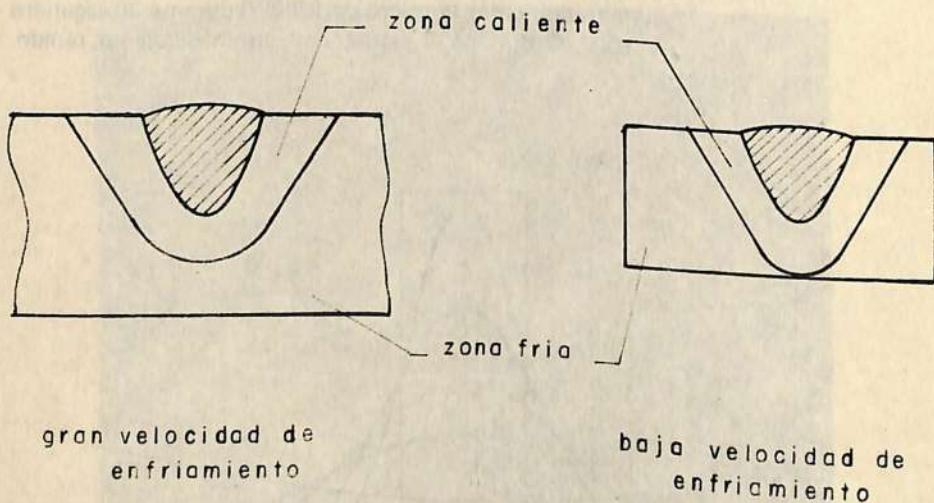


Fig. 4 — EFECTO DE LA MASA EN LAS VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

- Precalentamiento. La temperatura del metal base al ser elevada, disminuirá el gradiente de temperatura, lo cual significa una menor velocidad de enfriamiento.

1.2. Implicaciones de la estructura del metal depositado y de la zona afectada térmicamente

1.2.1. Crecimiento del grano

Es inherente al proceso de soldadura y será mayor en la medida que se aumenten la máxima temperatura y el tiempo de permanencia de la misma.

En la zona afectada térmicamente, junto a la línea de fusión, se produce una estructura de temple (martensítica) o una estructura de grano grueso y acicular llamada Widmanstatten. En el metal depositado aparecerá una estructura de solidificaciones caracterizada por dendritas orientadas en el sentido en el cual el calor se escapa.

El tamaño de grano grueso, además de disminuir considerablemente la resistencia, vuelve frágil el material.

1.2.2. Estructuras martensíticas

Para saber cuál será la tendencia a formar estructuras de este tipo, se utiliza la fórmula del carbono equivalente

$$C_E = \frac{\% C}{6} + \frac{\% Mn}{5} + \frac{\% (Cr + Mo + V)}{15}$$

Para evitar agrietamiento, el C_E debe ser menor que 0.45%. Aunque la templabilidad depende de todos los elementos aleantes del acero, la susceptibilidad de la zona afectada por el calor depende principalmente del contenido de C.

En la zona del metal de aporte, no existen posibilidades de formación de estructuras de temple debido a que la composición es 0.09% máximo y 1.2% Mn como promedio; indudablemente el valor del Carbono equivalente es muy inferior a 0.45.

Uno de los casos más críticos es el del "punteo" de varillas grado 60 en las construcciones civiles; generalmente en éstas el Carbono Equivalente es mayor de 0.45 y el enfriamiento es muy rápido: la estructura que se formará en la zona afectada térmicamente es martensítica, la cual, además de crear grandes tensiones y/o grietas, en muchos casos como éste, la varilla puede fallar al tratar de doblarla con la mano.

1.2.3 Absorción de Hidrógeno

La solubilidad del Hidrógeno en el hierro aumenta a partir de 900°C y es muy grande cuando el metal se encuentra en estado líquido. En el caso de la soldadura es posible introducir hidrógeno en el hierro a través del revestimiento por su composición o por la humedad del mismo.

El hidrógeno atómico ($H +$) absorbido dentro del metal fundido difunde hacia la austenita de la zona afectada al metal y más tarde durante el enfriamiento se hará presente en la transformación martensítica o perlítica en forma de hidrógeno molecular H_2 , tratando de ocupar un volumen mayor, con posibilidades de ubicarse en las entallas; en estas condiciones, bajo los esfuerzos propios a la finalización del enfriamiento, el hidrógeno provoca una fragilización suficiente para producir fisuración.

2. CARACTERIZACION DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA

En general, son aceros con porcentajes de carbón entre 0.15 y 0.30%, algunos con pequeñas cantidades de elementos de aleación, (sus estructuras son ferrito-perlíticas y sus costos deben ser bajos); sus puntos de fluencia son superiores a 40.000 PSI y las propiedades mecánicas deben ser obtenidas al final del proceso de laminado.

Los aceros a los cuales nos referimos, pueden describirse mejor en las normas de la ASTM A 36, A 242, A 572, A 588, A 615 y A 616.

El problema de soldabilidad se presenta más que todo en los aceros grado 60 (A 572, A 615, A 616) ya que el porcentaje de C es mayor de 0.25%. Para efecto de soldabilidad podemos dividir los aceros estructurales en dos grupos: los de porcentaje de C mayor de 0.25 (medio) y los de menos de 0.25 (bajo).

2.1. El acero para refuerzo de concreto

La producción de este acero se realiza de acuerdo con la norma ASTM A 615-74 y establece, por ejemplo para el acero grado 60, entre otros requisitos:

Punto de fluencia mínimo	60.000 PSI
Resistencia a la tracción	90.000 PSI
Elongación en 8 pulgadas	7% a 9%
Doblez (opcional)	90°
Contenido máximo de fósforo	0.05%

La norma no limita composición, ni se refiere a soldabilidad o resistencia al impacto. Esto permite que existan aceros con diferentes soldabilidades y resistencias al impacto.

2.2. Aceros Estructurales de Alta resistencia y Medio Carbón

El Carbón y el Manganeso elevan la resistencia, sin embargo, el carbón hace más frágil el acero, razón por la cual se busca bajar el carbón y aumentar el manganeso (Ver gráfico No. 5).

Los aceros grado 60 de Simesa, Futec, Paz de Río y Sidelpa son de este tipo

y la soldabilidad es similar en los cuatro.

Una composición típica de estos aceros es C: 0.27%, Mn: 1.2%, Si: 0.25%.

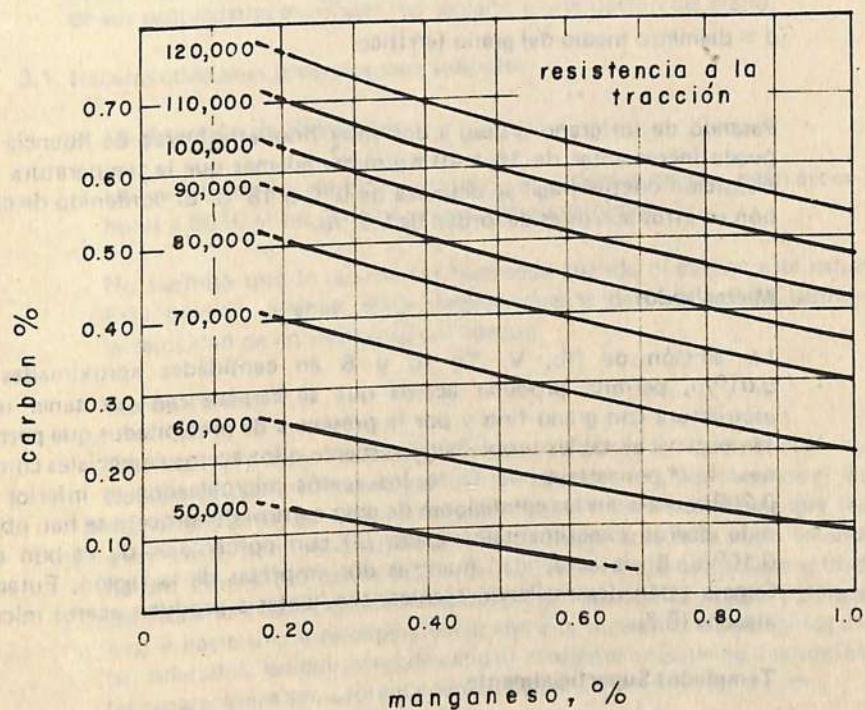


Fig. 5 - EFECTO DEL MANGANESO EN LA RESISTENCIA A LA TRACCION DE UN ACERO

(Tomado de Alloying Elements in Steel — Bain Paxton)

2.3. Aceros Estructurales de Alta Resistencia y Bajo Carbono

— Deformados en frío

Si combinamos la resistencia de base, propia al acero en virtud de su composición química, con el efecto de deformación en frío es posible aumentar la resistencia, mediante un "torcido" o deformado de las barras (A 616) (4). La estructura también es ferrítico-perlítica, salvo que el porcentaje de carbono es menor y los granos, además de ser más pequeños, están orientados en la dirección en que hayan sido deformados.

Estudios teórico-experimentales han permitido evaluar el efecto del tamaño del grano ferrítico en las propiedades: (5)

$$\sigma_{\text{fluencia}} = \sigma_i + K_y d^{-1/2}$$

σ_i y K_y (constantes)

d = diámetro medio del grano ferrítico

Pasando de un grano grueso a uno muy fino, el esfuerzo de fluencia se puede incrementar de 15 a 40 Kg/mm², además que la temperatura de transición dúctil-frágil se desplaza de 0°C a 15°C. El contenido de carbono en estos aceros es del orden de 0.2%.

— Microaleados

La adición de Nb, V, Ti, Al y B en cantidades aproximadas a 0.01%, permite producir aceros que se caracterizan por tener una estructura con grano fino y por la presencia de precipitados que permiten obtener notables propiedades respecto a los aceros comerciales comunes. Los porcentajes de C en los aceros microaleados es inferior al 0.20%, y en ciertas condiciones de gran control del proceso se han obtenido aceros experimentales grado 60 con porcentajes de carbono del 0.10%. En la actualidad nuestras dos empresas de la región, Futec y Simesa están desarrollando técnicas tendientes a producir aceros microaleados (6,7).

— Templados Superficialmente

Se trata de un método muy utilizado en Luxemburgo por la Arbed SA's rolling-mill y fue desarrollado por el Centro de Investigaciones Metálicas de Liege.

El % de carbono puede reducirse considerablemente ya que al finalizar la laminación, se produce superficialmente un enfriamiento rápido, seguido por un auto-revenido; al tratamiento se lo ha llamado "Tempcore" que significa: revenido de una superficie previamente templada, bajo el efecto del calor suministrado por el núcleo de la pieza.

El resultado del proceso es un elevado límite elástico, gran ductibilidad y bajo porcentaje de C. (8).

3. COMO SOLDAR ACEROS ESTRUCTURALES

Los cuatro tipos de acero mencionados (de aleación, deformados, microaleados y templados superficialmente) para efecto de soldabilidad los hemos agrupado así:

- A. **Medio Carbón:** La precaución más importante es evitar la formación de estructuras martensíticas y la absorción de hidrógeno.
- B. **Bajo Carbón:** Dentro de este grupo ubicamos los deformados, microaleados y templados superficialmente. En los deformados es particularmente importante evitar el crecimiento del grano hasta donde sea posible, ya que muchas de sus propiedades dependen del tamaño y orientación del grano.

3.1. Recomendaciones generales para soldarlos

— La absorción de Hidrógeno:

Utilice electrodos de bajo hidrógeno y asegúrese de que estén secos (24 horas a 50°C antes de consumirlos, como mínimo).

No permita que la escoria sea levantada cuando el carbón esté caliente. Esta medida, además evita el atrapamiento de Nitrógeno y disminuye la velocidad de enfriamiento del cordón.

— Los operarios:

Para cada proceso, electrodo, posición y tipo de junta en la cual vaya a trabajar el operario deben calificarse (10); este es prácticamente el factor más importante ya que un defecto dentro de una soldadura que tienda a ser frágil, tiene mucha posibilidad de iniciar una falla al ser solicitada; de ahí que la evolución actual en lo referente a control de soldadura sea hacia la evaluación de los defectos en función de su tipo y dimensiones, y hacia una interdependencia entre la tenacidad exigida y los defectos tolerados; los controles de calidad mediante ensayos no destructivos y las reparaciones son supremamente costosas.

— Los enfriamientos:

Es necesario evitar los enfriamientos demasiado rápidos, lo cual implica evitar los punteos rápidos de soldadura y precauciones al encender el arco, pues es posible producir efectos de temple superficial.

— Juntas de cuidado:

Nunca utilice soldaduras en las partes curvadas de una estructura.

Tenga especiales precauciones en los "amarres soldados" y en las juntas en cruz.

— Los procesos:

La limpieza de las piezas, los cráteres, socavados, remoción de escorias, etc., al ser controlados en el proceso, evitan muchos problemas; dele una mayor importancia a la inspección visual.

Observe las instrucciones de soldadura dadas en los catálogos.

— **Preparación de la Junta:**

Tanto la separación como los ángulos de bisel: chaflán, son vitales para la eficiencia de la junta, cosa que los soldadores son amigos de olvidar.

— **El crecimiento de Grano:**

Como ya se dijo, para lograrlo es necesario disminuir la máxima temperatura y la permanencia durante largo tiempo en la misma.

Utilice bajos amperajes.

Siempre que sea posible, utilice corriente continua con el electrodo conectado al polo positivo, ya que se disminuye la entrada de calor a la pieza.

Evite los "arcos largos".

En la preparación de las juntas a tope, trate hasta donde sea posible, de cortar mecánicamente y no con soplete oxiacetilénico.

3.2. Recomendaciones particulares para soldar los aceros de Medio Carbón

Además de las precauciones mencionadas anteriormente, es necesario tomar las precauciones tendientes a evitar la formación de estructuras de temple o la formación de grietas; en estos aceros es más peligroso el Hidrógeno debido a que tanto las estructuras de temple (martensíticas) como el H_2 crean grandes tensiones internas.

Evite las estructuras de temple así:

Impida que el enfriamiento del cordón sea muy rápido, usando técnicas que de una u otra manera se basan en el efecto del precalentamiento cuyos objetivos son:

- a) Reducción de la distorsión producida en la soldadura.
- b) La reducción de grietas en frío, pues ningún tratamiento post—soldadura soluciona las grietas creadas durante el temple.
- c) Reducción de los esfuerzos residuales.
- d) Reducción de la dureza en la zona afectada térmicamente.

Las temperaturas de precalentamiento ideales, de acuerdo con las experiencias realizadas en el Laboratorio de Metalografía y Ensayo de Mate-

riales Metálicos de la Facultad de Minas y las informaciones obtenidas (Welding Handbook Vol. 4, Pág. 63. 10) están entre 100 y 130°C, tomando como criterio 100°C para espesores o diámetros de 3/8" y 130° para una pulgada.

- Evite que las corrientes fuertes de aire entren en contacto con la zona doblada.

— **Sobre las juntas:**

- Sea especialmente cuidadoso en el control de precalentamiento de las juntas a tope o en cruz.
- Las soldaduras en cruz deben evitarse, pues son peligrosas si van a ser solicitadas con rigor.
- Los miembros para unir deben ser alineados con el mínimo de excentricidad y en el mismo plano.
- En las soldaduras a traslape, éste debe ser mínimo de 8 veces el diámetro de los elementos por unir.

3.3. Recomendaciones particulares para soldar los aceros de Bajo Carbón

Siguiendo las recomendaciones generales enunciadas en 3.1., la soldadura de los aceros microaleados y templados superficialmente, no presentan problemas; sin embargo, los aceros deformados merecen especial cuidado.

- Buscar que los enfriamientos sean moderadamente rápidos pues el crecimiento o distorsión del grano son críticos, incluso enfriando con aire en suspensión.
- No se recomienda el precalentamiento.
- Se debe evitar la preparación de la junta con oxiacetileno.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SANTO TOMAS DE AQUINO

BIBLIOGRAFIA

1. Linnert George, Welding Metallurgy, Vol. 1, 3a. Edición, 1965 —American Welding Society— New York.
2. Linnert George, Welding Metallurgy, Vol 2, 3a. Edición, 1965.

3. Maynier, Martin. *Memories Scientifiques Rev. Metallurgy*, 3a. Edición, LXIII, No. 12, 1966.
4. Helmut Wehowsky. "Le Soudage d'aciers d'armature écrouis" *Soudage et Techniques Connexes* — Febrero de 1974, Págs. 9 a 14.
5. F.B. Pickering. "Aplicaciones de la Metalurgia Física al desarrollo de los aceros". Publicación Programa Multinacional de Metalurgia No. A 151, Buenos Aires, 1974.
6. Microaloying 75 — Washington.
7. Orestes Alarcón. "Desenvolvimento de Tecnología de Fabricacao dos aços de Baixa Liga e alta resistencia con Niobio". *Siderurgia Latinoamericana* No. 226 1979.
8. IAMI: Junio de 1976.
9. H. Granjon. "Problèmes Métallurgiques associés au soudage des aciers" *Soudage et techniques connexes*. Enero-Febrero de 1975.
10. Código de Soldadura para aceros de armadura, AWS, D 12. 1.75.
11. Welding Handbook, AWS, Vol. 4 y 5, 6a. Edición, 1972, Miami, U.S.A.

GEO
Minas LTDA.

INGENIEROS GEOLOGOS DE MINAS Y PETROLEOS

- * Asesorías en explotaciones mineras
- * Estudios geológicos — Mineros
- * Estudios de ingeniería de petróleos
- * Concesiones y permisos de explotación
- * Interventorías — Proyectos Mineros
- * Perforaciones

Carrera 80 No. 49A-122

Teléfonos: 34 50 58 - 34 23 92

Apartado Aéreo 50152

Medellín