Víctor Osorio L.
Ing. Civil Metalúrgico
Profesor Jornada Completa
Depto. de Metalurgia

aspectos metalúrgicos generales de la soldadura de aceros al carbono y de baja aleación

La soldadura es un problema que se debe atacar desde dos ángulos distintos, el enfoque mecánico y el metalúrgico. Hay que tener en claro que en la soldadura de aceros al carbono y de aceros de baja aleación para que ella sea satisfactoria deben tomarse ciertas precauciones, poniendo especial atención al espesor de la sección, el material de aporte utilizado y las transformaciones que sufre el acero en la zona afectada por el calor (ZAC).

El aspecto mecánico está orientado a hacer un estudio detallado del tipo de carga que actúa sobre la estructura, para lo cual se puede considerar sólo cargas principales o la suma de cargas principales y adicionales, o bien si tenemos soldadura en piezas de máquinas las cargas pueden ser estáticas o dinámicas, complementando esto con el estudio de la naturaleza del sistema de esfuerzos que actúan sobre la pieza que puede ser torsión, flexión, corte o combinaciones de éstos. Además incluye el cálculo de la secuencia de aplicación de los cordones, si éste es continuo o discontinuo, y el grado de empotramiento o rigidez del sistema.

Todos estos aspectos tienen que ir complementados con un estudio detallado de la parte metalúrgica, porque es sabido que las fallas en la soldadura de aceros ocurren por la aparición de microestructuras duras en la ZAC, lo que depende de:

i) La templabilidad del acero y
ii) Velocidad de enfriamiento

Previo a dar mayores antecedentes sobre la templabilidad del acero y velocidad de enfriamiento, hablaremos sobre las estructuras que se obtienen en las soldaduras por fusión, y al respecto podemos decir que la estructura resultante en este proceso es similar a la estructura que se obtiene en piezas coladas, pero se diferencia de esto porque en los bordes del cordón que están en contacto con el metal base aparecen granos epitaxiales que son aquellos granos mejor orientados del metal base que se han fundido previamente y crecen a expensas del metal de aporte hacia el centro del cordón dando origen a granos columnares.

Las tendencias de nucleación y crecimiento están influenciadas por la acción enfriadora del metal base que produce un tamaño de grano variable dentro de la soldadura. La estructura de la

soldadura además está influenciada por los principios de tratamientos térmicos asociados con las transformaciones alotrópicas que se producen tanto en el metal base como en el metal de aporte. En la figura 1 se compara una sección pulida y atacada de un acero de bajo carbono unido por soldadura de fusión con una sección del diagrama Hierro-Carbono; se pueden observar secciones estructurales representativas de zonas sin afectar, de transición, refinadas, gruesas, de fusión y de metal depositado. Un estudio del diagrama de equilibrio explicará la presencia de cada una de estas zonas. En general, las diversas zonas de una soldadura por fusión no están claramente definidas, sino que están unidas unas a otras sin una línea clara de demarcación. Ellas tienden a ser más estrechas cuando la aplicación del calor está altamente concentrada.

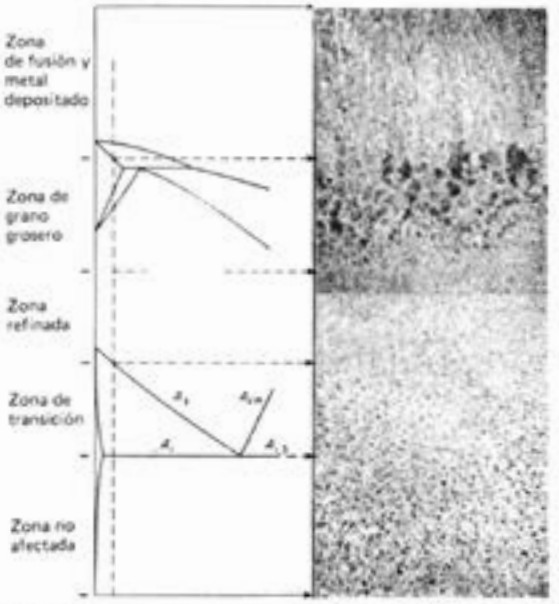

Fig. 1. **Zonas presentes en la soldadura por fusión (50x)**

La zona sin afectar tiene la estructura típica del metal base (acero de bajo carbono) que no ha sido calentado a una temperatura lo suficientemente alta para alcanzar el rango crítico, por lo tanto, su estructura no ha cambiado.

En la zona de transición existe un rango de temperatura entre A_1 y A_3 donde se produce la recristalización parcial.

La zona refinada indica una región calentada justo por encima de A_3 donde se completa el refinamiento de grano y existe una estructura granular continua. A temperaturas mayores por encima de A_3 se produce un engrosamiento de grano. A temperaturas por encima del solidus se produce la fusión del metal base que está ilustrada por la zona de fusión. Siempre que un metal de aporte es agregado a una soldadura por fusión existirá una región con una estructura típica de colada de granos gruesos columnares conocidos como zona de metal depositado, estas zonas son mostradas en las siguientes figuras.

La figura 2 muestra la estructura de una zona sin afectar que consiste en estructura característica de ferrita y perlita. La zona de transición se muestra en la figura 3 en la cual los granos de ferrita no han sido alterados, pero las regiones perlíticas se han hecho mucho más finas. Este cambio fue producido por calentamiento dentro del rango crítico lo que transforma la perlita en austenita, y con el posterior enfriamiento reforma la perlita.

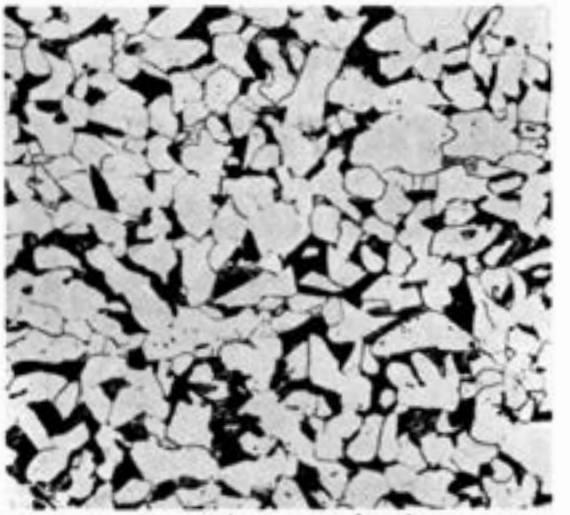

Fig. 2 **Estructura de la zona no afectada en un acero soldado (250x)**

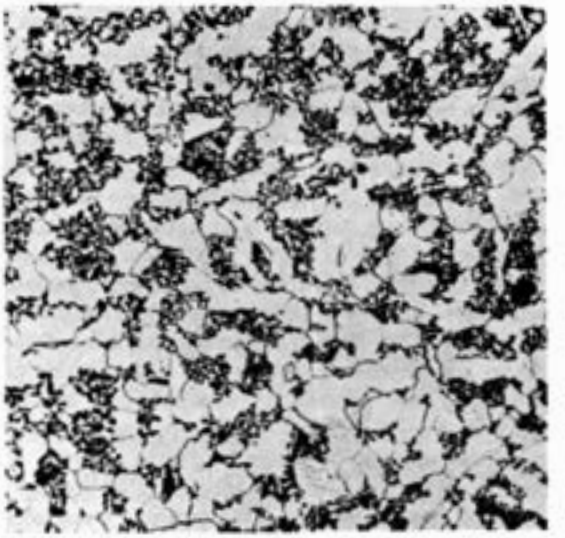

Fig. 3 **Estructura de la zona de transición en un acero soldado (250x)**

La recristalización completa es mostrada en la figura 4 en la cual las áreas de ferrita y perlita son mucho más finas al formarse a partir de la austenita que existía a una temperatura justamente por encima de la temperatura crítica superior. La estructura ilustrada en la figura 5 muestra grandes regiones de perlita y pequeños granos de ferrita. El examen de la perlita a mayores aumentos mostraría una estructura más fina que la que existía en las áreas de perlita original debido a la velocidad de enfriamiento que prevaleció.

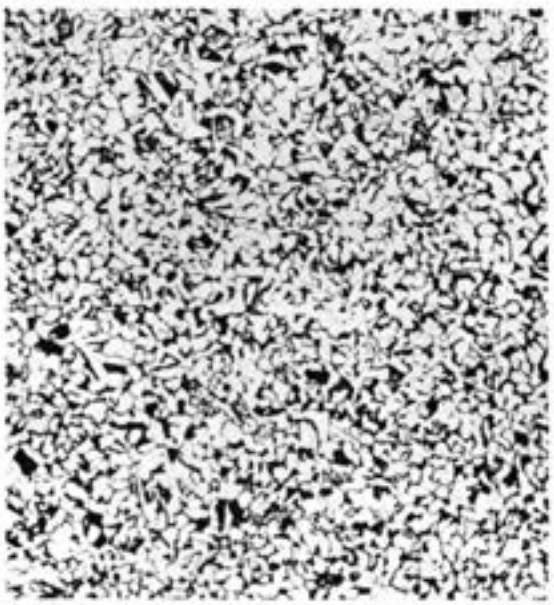

Fig. 4 **Estructura de la zona refinada en un acero soldado (250x)**

Fig. 5 **Estructura de la zona de grano grosero en un acero soldado (250x)**

La estructura muy grosera cercana a la zona de fusión se muestra en la figura 6, la estructura es de tipo Widmanstätten con líneas de ferrita interrumpiendo las áreas de perlita. Esta estructura es común en los aceros bajos en carbono en los cuales la transformación ocurre a partir de granos de ferrita a velocidades de enfriamiento relativamente rápidas. El metal depositado que consiste en estructura columnar de ferrita y perlita es mostrado en la figura 7

Fig. 6 **Estructura de la zona de grano grosero y de fusión en un acero soldado (250x)**

Fig. 7 **Estructura de la zona de metal depositado en un acero soldado (250x)**

Estas estructuras son características en los aceros bajos en carbono y pueden ser modificados por la velocidad de enfriamiento desde las temperaturas alcanzadas en la región austenítica.

Analizaremos ahora los factores de los cuales depende la aparición de microestructuras duras en la ZAC:

i) La templabilidad del acero depende de:
   a) contenido de carbono
   b) tamaño de grano
   c) contenido de elementos aleantes

   Aumentando estos factores aumenta la templabilidad del material, vale decir, se aleja la nariz de la curva TTT del origen, lo que implica que aparezcan microconstituyentes no deseables como es el caso de la martensita; nos interesa disminuir estos factores para tener mejor soldabilidad.

ii) Velocidad de enfriamiento que depende de la temperatura máxima alcanzada por el material en los distintos puntos, la cual a su vez depende de la razón de entrada de calor gobernada por la expresión: $E = 0{,}06 \frac{VI}{v} \left[\frac{\text{joule}}{\text{pulg.}}\right]$

donde:

V: voltaje (Volt)
I: intensidad (Amp)
V e I dependen del electrodo a usar.
v: velocidad de avance del electrodo $\left[\frac{\text{pulg.}}{\text{min.}}\right]$

La velocidad de enfriamiento se puede modificar de las siguientes maneras:

a) Precalentamiento que se le puede dar a la pieza a soldar, lo que implica agregar una cantidad de calor extra para disipar.

b) Aislando el sistema de tal manera que la disminución de la temperatura sea en forma lenta, este aislamiento se hace con algún material refractario como asbesto por ejemplo.

c) Variando el espesor de la placa y manteniendo largo y ancho constante. Si se disminuye el espesor, la velocidad de enfriamiento disminuye al igual que en a y b.

d) Utilizando la técnica de cordones múltiples donde las uniones soldadas se forman con una serie de cordones pequeños, de modo que cada cordón le sirva de precalentamiento al posterior y de recocido al anterior.

Muchas veces es imposible solucionar el problema de aparición de microestructuras duras en la soldadura mediante la modificación de la velocidad de enfriamiento. Esto se puede solucionar dando un tratamiento térmico de recocido o revenido a la pieza soldada.

Los elementos que nos dan mejor información de la microestructura y la dureza de la zona afectada por el calor son los diagramas de enfriamiento continuo TTT_{EC} como el de la Fig. 8. Es conveniente recordar que la velocidad de enfriamiento en la zona calentada más lejos del intervalo crítico en el curso de la soldadura pueden ser suficientemente rápidos para mantener la austenita en equilibrio inestable bajo 600ºC y forme la martensita. Expresado en términos metalúrgicos significa que la velocidad de enfriamiento en la ZAC puede ser superior a la velocidad crítica de temple martensítico Z del acero, lo que sucede es que se forma ahora la martensita.

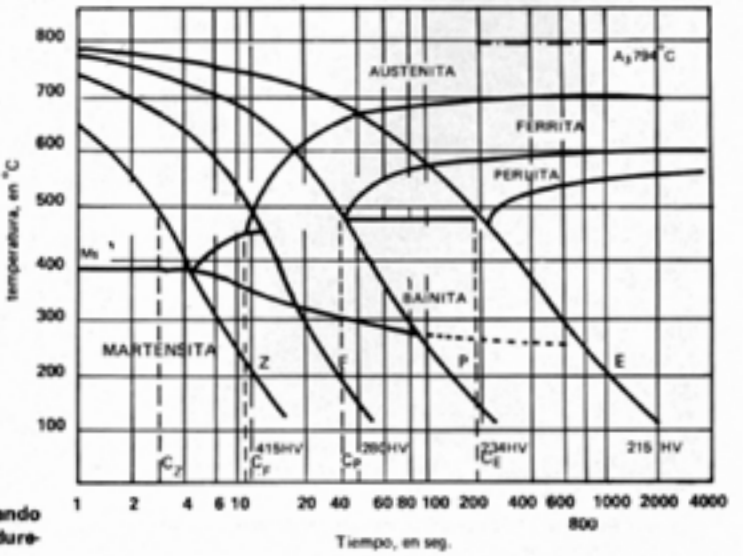

Fig. 8

Diagrama de enfriamiento continuo mostrando los puntos de transformación, las curvas y durezas de los enfriamientos críticos.

Si el aporte de calor en el curso de la soldadura es débil y el enfriamiento tiene lugar con una velocidad más rápida que la velocidad de enfriamiento Z la ZAC será totalmente martensítica y su dureza sobrepasará los 450 HV Si el enfriamiento se produce a una velocidad intermedia entre la curva de enfriamiento Z y la curva de enfriamiento F, tendrá lugar una cierta transformación de la austenita en una estructura intermedia BAINITICA en los dominios Z_w y la zona final afectada por el calor será constituida de una mezcla de martensita y bainita. La dureza de esta zona será inferior a 415 HV. En el otro extremo, una disminución de la velocidad de enfriamiento o de la curva de enfriamiento E permite en general a la zona afectada por el calor se transforme enteramente en ferrita y perlita. Se ha constatado que, generalmente, las ZAC que se enfrían a una velocidad suficientemente lenta para producir por lo menos una parte de la transformación de la austenita en ferrita pro-eutectoide, no se fisura espontáneamente y presentan un grado razonable de ductilidad y tenacidad. Se ha concluido que la velocidad de enfriamiento que marca la aparición de la ferrita pro-eutectoide (C_f velocidad definida por el tiempo se puede entender 500ºC, según la curva de enfriamiento f) constituye un índice de soldabilidad límite. Conforme a esto, un acero dado debería siempre ser soldado con la ayuda de un procedimiento (aporte de calor o eventualmente precalentamiento) que da una velocidad de enfriamiento de la zona afectada por el calor más débil que C_F. Otro método que permite predecir las estructuras metalúrgicas con menos exactitud son las curvas TTTI y las curvas de templabilidad Jominy.

Cuando se consideran las microestructuras no se deben perder de vista los siguientes puntos:

- Los diagramas de equilibrio isotérmicos no son valederos porque el acero es enfriado de manera extremadamente lenta. Si se aumenta la velocidad de enfriamiento, como es el caso de la soldadura, las curvas de transformación se desplazan hacia la temperatura inferior y la composición del eutectoide puede corresponder a toda una gama de contenido de carbono.
- Factores térmicos, hemos visto la gran importancia de éstos en la soldadura, por este motivo los analizaremos en detalle a continuación en un cordón con unión biselada.

Factores Térmicos

En la Fig. 9 se muestra un cordón de soldadura con unión biselada del cual nos interesa analizar el plano transversal a la soldadura en la cual se han marcado los puntos A, B, C y D, que es similar a cualquier otro plano transversal si mantenemos constante los parámetros de soldadura, de tal manera que analizando estos cuatro puntos tendremos una situación térmica a lo largo del cordón.

Las marcas t_o, t_1 y t_2 nos indican la posición del electrodo en el momento que éste pasa por nuestro plano y otras dos posiciones sucesivas, digamos 5 y 10 seg. después.

Para simplificar el análisis, aceptemos la siguiente hipótesis "EL CALOR SE TRANSMITE DESDE EL CORDON HACIA LA ZONA AFECTADA POR CONDUCCION EN EL MATERIAL SIN SALIR HACIA LA ATMOSFERA CIRCUNDANTE", lo que equivale a decir que no hay variación de temperatura en la vertical de los puntos A, B, C y D marcados. En la práctica esto se cumple en las proximidades del cordón, para los rangos de tiempo que estamos considerando.

La Fig. 10 nos muestra la distribución de temperatura en nuestro plano de control para los tiempos t_o, t_1 y t_2

El punto A llega al máximo de temperatura en el instante en que el electrodo pasa por encima, produciéndose la fusión del material ubicado directamente bajo él, dando lugar a una distribución de calor con fuerte gradiente de temperatura decreciente, lo cual nos da por consiguiente una curva de distribución de temperatura distinta para cada punto, cuando el electrodo pasa por t_2 la distribución de temperatura es considerablemente más baja y ancha.

Como este es un caso de régimen transiente, la solución matemática del problema se basa en la resolución de la ecuación de Fourier.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}\right)_t$$

Que tiene por solución particular

$$T(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi K t}} \exp\left(-\frac{X^2}{Kt}\right)$$

Donde:

K: conductividad térmica del material
x: distancia
t: tiempo
Q: razón de entrada de energía

las condiciones de borde son:

1. Para $t = 0$, $T = 0$, excepto para $X \to 0$
2. Para $x = 0$, $\frac{\partial T}{\partial X} = 0$ para todo valor de t

La Fig. 11 corresponde a la variación de la temperatura con respecto al tiempo para X = constante, curvas que pueden dibujarse fácilmente sacando datos de las curvas ya dibujadas o simplemente calculando valores mediante la ecuación T(x,t). La temperatura en cualquier punto de nuestra superficie de control, digamos B, subirá hasta un valor máximo y luego disminuirá con una cierta razón que tiende a atenuarse con el tiempo.

Finalmente, nos formulamos una pregunta que es necesario analizar en detalle:

¿Cuáles son las condiciones óptimas tanto en el aspecto metalúrgico, mecánico y económico para un caso en particular?

Fig. 9 **Corte transversal de un cordón de soldadura**

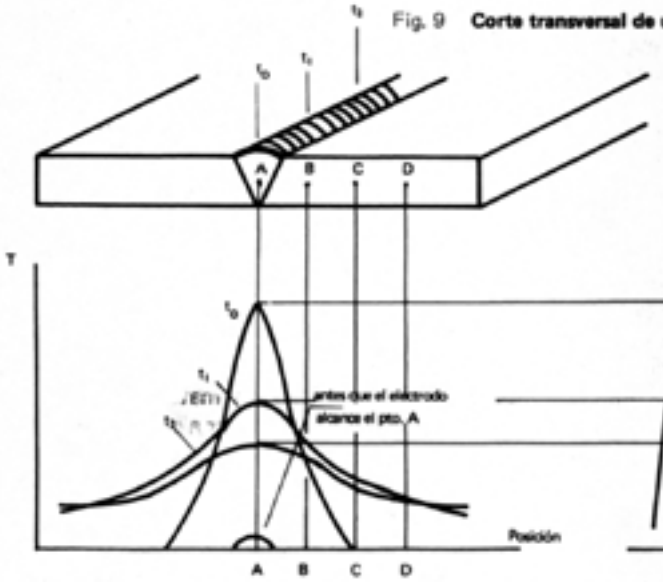

Fig. 10 **Distribución de temperatura en un corte transversal del cordón de soldadura.**

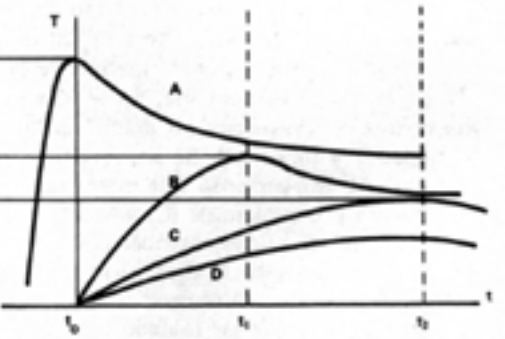

Fig. 11 **Variación de la temperatura con respecto al tiempo, a una posición constante.**

BIBLIOGRAFIA

DONALD S. CLARK, Ph. D.; WILBUR R. VARNEY, M.S.; Metallurgy for Engineers (libro); Págs. 494-520 D. van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey, 1962.

E.J. RIDAL, Fonderie 371 Págs. 315-328, Octubre 1977.

RENE SEGURA M.S. Curso de Soldadura dictado en la Universidad de Concepción, año 1976.

DRILLCO

CONTRATISTAS
Túneles – Sondajes – Perforaciones – Obras Civiles e Ingeniería.

VENTAS
STENUICK (Equipos Down the Hole) FURUKAWA (Equipos de Perforación) JKS (Sondajes) TRI-M (Acero de Perforación) MYNO (Bombas).

FABRICACION
Acoplamientos – Equipos Perforación – Carros Decauville.

LAS DALIAS 2950 (MACUL) FONOS: 212079 – 214642 CASILLA 173 SANTIAGO – CHILE