

TEMA 24

METALURGIA DE LA SOLDADURA. SOLDABILIDAD

Por soldabilidad se entiende la aptitud de los metales para ser unidos por soldadura, de forma que esta unión cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de que forman parte, como son la continuidad del material y la homogeneidad en las propiedades de la unión.

Para que un metal pueda considerarse soldable debe cumplir con las condiciones impuestas por los siguientes aspectos:

- *Soldabilidad operativa*: Estudia las condiciones en que deben realizarse las uniones para que no aparezcan defectos (porosidad, pegadura, fisuras, etc.)

- *Soldabilidad metalúrgica o local*: Relativa a las modificaciones físico-químicas resultante de la operación de soldeo

- Aceros al C. Temple austenítico.

- Aceros inoxidables. Baja resistencia a la corrosión por precipitación del carburo de cromo.

- *Soldabilidad constructiva o global*: Estudia las propiedades del conjunto de la construcción soldada para poner de manifiesto la tendencia al agrietamiento del montaje.

Los ensayos propuestos para hacer patente estos tres aspectos son numerosos y variados. Pueden realizarse sobre las uniones, sobre probetas que reproduzcan las condiciones de soldeo o independientes de la operación de soldeo. Los ensayos propuestos para cumplir estos tres aspectos son:

Ensayos de soldabilidad operativa:

- Ensayos sobre empalmes: se reducen al examen visual o con lupa.

- Ensayos sobre probetas que reproducen las condiciones de soldeo: se sacan probetas de una junta soldada realizada en condiciones previstas construcción.

- Ensayos independientes de la operación de soldeo

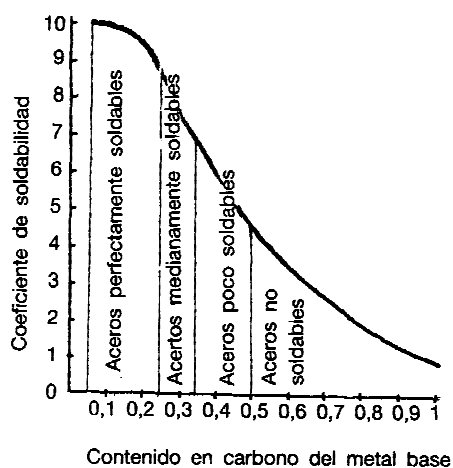
Ensayos de soldabilidad metalúrgica :

24.2

- Ensayos sobre empalmes: mecánicos, dinámicos (T, P, R, HV etc).
- Ensayos sobre probetas que reproducen las condiciones de soldeo sobre probetas que reproducen las condiciones de soldeo si pasa de (HV-350) tomar precauciones para bajarla.
- Ensayos independientes de las operaciones de soldeo Yominy

Ensayos de soldabilidad global:

- Ensayos de agrietabilidad: aparición grietas o micro grietas después de soldar
- Ensayos de sensibilidad a la entalla: R, P



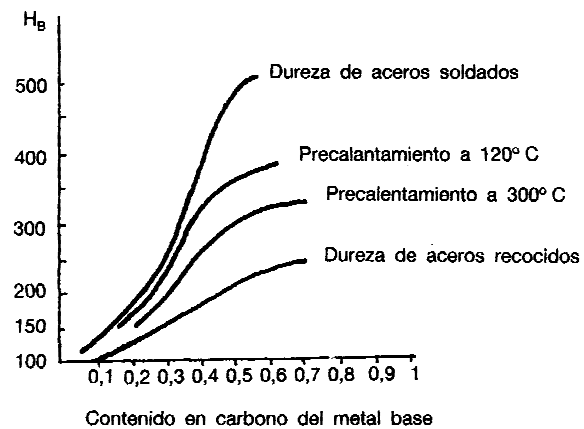
Soldabilidad de los aceros al Carbono.

La soldabilidad de los aceros depende, además de las condiciones operativas, metalúrgicas y constructivas impuestas, del contenido en carbono y de las impurezas que puede llevar en estado disuelto o de inclusiones. Para contenidos de azufre y fósforo poco elevado ($S < 0,04\%$, $P < 0,04\%$, $S+P < 0,07\%$) se puede admitir que la soldabilidad varía en sentido inverso a la proporción de carbono. Se puede afectar a cada tipo de acero un coeficiente de soldabilidad que varía de 0 a 10, que permite clasificarle en función del contenido de carbono en: perfectamente soldable, medianamente soldable, poco soldable y no soldable.

En cuanto al resto de los elementos se tiene:

- Mn:** favorece el temple, pero su influencia es 6 veces menor que el carbono por lo que su efecto es mucho menor.
- Si:** En proporción elevada tiene influencia sobre la fragilidad (limitar su contenido).
- S y P:** Son considerados como impurezas, el P se transforma durante la solidificación en fosfuro de Fe que vuelve frágil al metal y aumenta el tamaño de grano. El S puede producir grietas si su contenido sobrepasa cierto límite. Las grietas se originan a alta temperaturas, el sulfuro de Fe se distribuye en los límites de grano y vuelve al metal frágil en caliente. Se puede disminuir su efecto, con la adición de ciertos elementos al revestimiento de los electrodos.

En resumen, el carbono es el elemento que tiene más influencia en la soldadura de los aceros. La influencia del carbono sobre la soldabilidad se pone de manifiesto comparando las curvas que dan los valores de dureza en función del contenido de carbono para aceros recocidos y para el mismo acero soldado por arco. La diferencia de dureza aumenta cuando aumenta el contenido de C, como consecuencia de las transformaciones físico-químicas. El diagrama muestra igualmente que el precalentamiento disminuye notablemente la diferencia de dureza, de ahí su importancia para conseguir una mejora de la soldabilidad.



Existen otros factores a tener en cuenta: espesor de la pieza, tensiones producidas por la temperatura, por efecto de las operaciones de soldeo y el estado térmico o mecánico inicial de la pieza a soldar, asimismo los tratamientos térmicos y mecánicos (deformación previa) desarrollan tensiones residuales.

Clasificación de aceros para construcciones soldadas.

El Instituto Internacional de Soldadura publica unas recomendaciones para clasificar los aceros para soldaduras. Para aceros con resistencia a tracción menor que 52 Kg/mm² y porcentaje de C <0,22%, no es preciso ninguna precaución especial, si el contenido está entre 0,22 y 0,27% para las calidades A y B, y de 0,22 a 0,24% para las C y D son necesarias precauciones en los electrodos. Los contenidos de S y P no deben pasar los siguientes límites:

	Azufre	Fósforo
Calidad A	0,06	0,08
Calidad B y C	0,05	0,06
Calidad D	0,05	0,05

Para aceros de resistencia mayor de 52 Kg/mm², la proporción de carbono debe ser menor de 0,22%, en caso contrario hay que contemplar precauciones especiales.

Calidad A.- Calidad ordinaria, utilizada en las construcciones poco importantes sometidas a esfuerzos muy ligeros.

Calidad B.- Calidad normal, utilizable en las construcciones sometidas a esfuerzos normales. Se justifica la utilización de esta calidad de acero en todas las construcciones en que no bastarían los aceros de la calidad A, pero en que los esfuerzos no pueden ser muy importantes. Está justificado el empleo de esta calidad en las construcciones en que no existen razones para temer la aparición de roturas frágiles debidas a las tensiones y a las formas de construcción.

24.4

Calidad C.- Calidad mejorada, aceros resistentes a la entalla, utilizables en construcciones en las que es importante el peligro de rotura frágil, por presentar una rigidez muy elevada.

Calidad D.- Alta calidad o acero resistente a la entalla, utilizable en las construcciones en las que es de temer particularmente el peligro de roturas frágiles.

Un precalentamiento o un tratamiento de atenuación de tensiones puede permitir la elección de un acero de calidad inferior. El poner límite al contenido de carbono se debe al riesgo de temple durante las operaciones de soldadura y a la introducción de tensiones internas que pueda provocar fisuraciones y grietas origen de rotura frágil en obra.

Ensayos de calificación del metal base.

Calidad A, no se exige ningún ensayo.

Calidad B, ausencia de poros y de segregaciones, un ensayo de tracción, un ensayo de plegado y tres probetas de resiliencia a + 20°C. La inspección se efectuara por lotes o por coladas, según convenio de pedido, por cada 40 Tn por coladas o 20 Tn por lotes.

Calidad C, ausencia de poros y de segregaciones, un ensayo de tracción, un ensayo de plegado y tres probetas de resiliencia a 0°C. La inspección se efectuara por colada, por cada 40 Tn. Y un ensayo de dureza, y el acero puede aceptarse si en ningún punto de la zona de transformación se sobrepasan 350HV.

Calidad D, ausencia de poros y de segregaciones, un ensayo de tracción, un ensayo de plegado y tres probetas de resiliencia a -20°C. La inspección se efectuara por colada, por cada 40 Tn

Concepto de carbono equivalente.

Dado que el carbono no es el único elemento que interviene, sino que también influyen los otros que componen el acero. Se ha llegado al concepto de carbono equivalente. El valor del carbono equivalente se calcula aplicando la fórmula:

$$[C] = C \% + \frac{Mn \%}{6} + \frac{Cr \% + Mo \% + V \%}{5} + \frac{Ni \% + Cu \%}{15} \quad (\%)$$

El número que resulta de sumar al contenido de carbono las proporciones de los otros elementos afectados del coeficiente que se indican, es el carbono equivalente y siempre que sobrepase el 0,25% es necesario el precalentamiento de la zona a soldar, es practica normal fijar un valor máximo de 0,43% de C.

Factores prácticos que influyen en la soldabilidad.

a) *Elección del electrodo*: El empleo de electrodos que desprenden hidrógeno (celulósicos, ácidos y de rutilo), puede ser el origen de agrietamiento, por tanto en aceros al carbono o ligeramente aleados debe preverse el uso de electrodos básicos. Por otro lado, el empleo de electrodos de gran diámetro bajo una gran intensidad favorece la soldadura debido al empleo de más energía.

b) *Método de soldeo*. La primera pasada en el fondo de la junta son las más tendentes al agrietamiento, debido al pequeño volumen que se aporta al metal frío. Se aconseja cordón de soldadura grueso y continuo para evitar una acentuada dispersión del calor.

c) *Empaste o untado de juntas*. Con los aceros poco soldables se puede aplicar el artificio del empaste, que consiste en dar una primera pasada de soldadura en las superficies laterales de la junta con un acero más suave, con un espesor correspondiente al ancho de la zona de transformación. La ejecución de esta operación sobre chapas libres no debe acarrear, en principio, agrietamiento alguno; luego se realizará el empalme sobre el acero suave de la primera pasada, mediante electrodos de alta resistencia. Es evidente que este método crea una carga de recargue de acero más suave para evitar el agrietamiento, pero introduce una zona débil en la unión.

d) *Temperatura de precalentamiento*. Se llama así a la temperatura que debe alcanzar el metal de base inmediatamente antes de que comience el proceso de soldeo y que normalmente debe mantenerse entre las diversas pasadas en caso de soldadura de pasadas múltiples. Se aplica localmente por resistencia eléctrica o llama de gas.

Es aconsejable extenderlo sobre una zona superior a cuatro veces el espesor de la pieza y a ambos lados del cordón. Si el precalentamiento se lleva a cabo con llama, ésta debe repartirse adecuadamente de modo que no permanezca fija en ningún punto de la superficie calentada. La temperatura se debe medir, siempre que sea posible, en la cara opuesta a la que se está aplicando la fuente de calor, por medio de termopares o lápices termoindicadores.

La temperatura de precalentamiento a aplicar en la soldadura de cada acero será especificada al estudiar la soldabilidad de las diferentes familias que vamos a considerar.

Una fórmula sencilla para calcular la temperatura de precalentamiento es la siguiente:

$$T_p = 350\sqrt{C + 0,25}$$

C : equivalente total en Carbono, C_q : equivalente químico en carbono, C_e : equivalente en carbono del espesor

Carbono equivalente total en Carbono = C_q equivalente químico en carbono + C_e equivalente en carbono del espesor.

$$[C] = [C_q] + [C_e]$$

$$360 \times C_q = 360 C + 40 (\text{Mn} + \text{Cr} + 20 \text{Ni} + 28 \text{Mo}) ; C_e = (1 + 0,005 \times e)$$

$(1 + 0,005e)$ depende por un lado del espesor del material y del poder de temple.

Zonas en la soldadura.

En la unión soldada podemos apreciar dos partes diferenciadas:

- Zona fundida constituida por el cordón de soldadura y la región adyacente.
- Metal base.

Zona fundida:

1) *Modificaciones químicas.* Pueden tener efectos tanto favorables como desfavorables:

- Pérdida de elementos por oxidación. En los aceros perdidos por la reducción del óxido de Fe por los elementos componentes del acero.
- Fijación de elementos de influencia desfavorable:

Sólidos: C, P, S.

Gaseosos: O, N, H.

2) *Absorción de gases.* Ejercen influencia desfavorable sobre propiedades mecánicas y originan modificaciones químicas.

a) *Absorción de oxígeno.* El hierro puro absorbe poco oxígeno (incluso a altas temperaturas), pero en estado líquido la cantidad absorbible es mucho mayor. Con soldadura oxiacetilénica se fija poca cantidad (proviene del Mn ó Si). El FeO queda reducido por la llama (reductora). En soldadura por arco la cantidad de Oxígeno aumenta, se presenta bajo forma de FeO. Con revestimiento adecuado (reductores), elimina óxidos en escoria. El O₂ libre forma CO y si no sale se forman porosidades. Con electrodos desnudos las propiedades mecánicas bajan y la resiliencia cae 0.

b) *Absorción de nitrógeno.* Crece rápidamente su solubilidad con la temperatura formando F₄N que se fija en el metal fundido. El N actúa sobre las propiedades mecánicas: aumenta la dureza, el límite elástico, la carga de rotura y disminuye la resiliencia y la capacidad de deformación. Con soldadura oxiacetilénica se fija poco N pero con arco puede alcanzar de 0,15 a 0,20%. Disminuye con el revestimiento (el espesor de este forma escoria protectora -desnitruración-)

c) *Absorción de hidrógeno.* El metal fundido puede absorber hidrógeno al igual que oxígeno y nitrógeno. En la soldadura oxiacetilénica se introduce muy poco hidrógeno. En la fusión por arco el revestimiento es el responsable de su absorción, produce microgrietas y puede dar lugar a sopladuras. En la probetas con revestimiento celulósico se observa una especie de poros brillantes (*ojos de pez*) que produce una disminución del alargamiento. Puede provocar fisuras bajo cordón.

3) *Precipitación de compuestos* de la solución sólida. Por ejemplo en aceros inoxidable se produce Carburo de Cr implicando mala soldabilidad y baja resistencia a la corrosión.

4) *Transformaciones eutécticas.* Por ejemplo, el Cu que encierra oxígeno provoca la

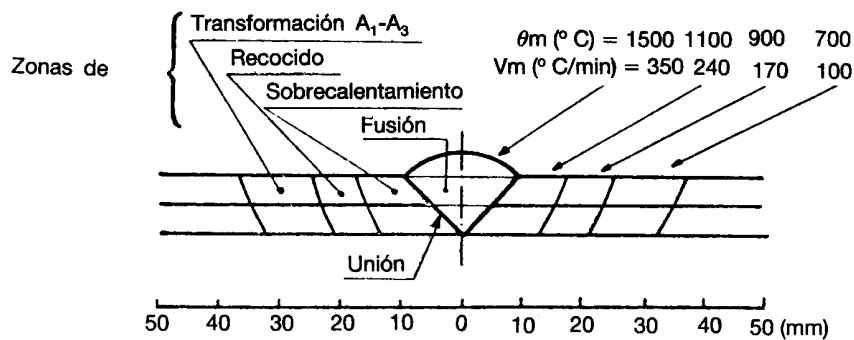
formación del eutéctico Cu-Cu₂O en las proximidades de la zona fundida lo que contribuye a la fragilidad de la unión.

5) *Modificaciones estructurales.* Afectan a los granos, poder de temple de la soldadura (cambios finos-gruesos de sus constituyentes).

Metal base:

El ciclo térmico de soldadura establece en cada punto del metal base un estado térmico definido por la máxima temperatura y la mínima velocidad de enfriamiento, que origina:

- Modificaciones estructurales (tamaños de grano variables).
- Modificaciones físico-químicas.



Pudiéndose diferenciar las siguientes zonas:

- *Zona Afectada Térmicamente (ZAT)*, que incluye:

Zona A. Sobrecalentamiento (100% de grano grueso), como el gradiente de temperatura es elevado, también lo es la velocidad de enfriamiento, dando lugar en esta zona a una estructura de temple.

Zona B. Por encima de la temperatura de austenización, cambio de fase (ferrita y austenita), recocido austenítico (aumenta la ductilidad).

Zona C. Recocido contra acritud y eliminación de tensiones residuales.

- Zona no afectada térmicamente:

Zona D. Sin transformación.

FACTORES PRÁCTICOS QUE INFLUYEN EN LA SOLDABILIDAD.

Elección del electrodo, los revestimientos Celulósicos, Ácidos y Rutilo, tienen Hidrogeno y producen grietas. Pero si se utilizan revestimientos Básicos, que no contienen hidrogeno, se evita el agrietamiento, se suelda con diámetro grande y gran intensidad favorece la soldadura

Método de soldeo. Evitar pasadas pequeñas, aconsejable cordón grueso y continuo, debido al pequeño volumen que se aporta al metal frío

Empaste o untado de juntas. En aceros poco soldables, pasada con acero más débil en las superficies laterales, evita agrietamiento, pero introduce una zona débil en la unión.

AGRITAMIENTO DE LAS SOLDADURAS

De los fenómenos que limitan la soldabilidad, el mas importante es la tendencia al agrietamiento del MB próxima al MA. Consideraremos dos grupos de agrietamiento:

Grietas localizadas en el metal fundido: Las micro grietas se transforman en grietas bajo efecto de tensiones, dilataciones y contracciones, se forman a alta T^a durante periodo de solidificación. Pueden atribuirse a:

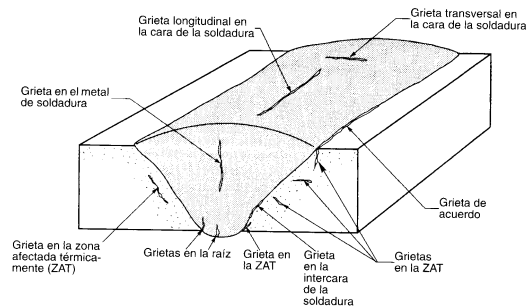
- Elección defectuosa del MA o del electrodo.
- Malas condiciones ejecución soldadura.
- Presencia de nitrógeno (fragiliza soldadura).
- Presencia de defectos (poros, inclusiones), favorecen propagación micro grietas.

Grietas localizadas en el metal de base: Se encuentran unidas a una grieta transversal del cordón de soldadura, son como resultado de una calidad mediocre del MB o existencia de tensiones demasiado elevadas (espesores grandes). Pueden atribuirse a:

- Corrosión generalizada (con o sin tensiones)
- Corrosión intercrystalina (inoxidables)
- Presencia de tensiones de laminación o forja
- Composición química del MB
- Presencia de H

REMEDIOS CONTRA EL AGRIETAMIENTO

- Empleo de electrodos con pequeño contenido en H, ciertos electrodos básicos
- Empleo de electrodos con alma austenitica(18Cr 8Ni)
- Pre calentamiento de las piezas.



Tipos de grietas:

- 1) Grieta en el cráter.
- 2) Grieta transversal en el metal de soldadura
- 3) Grieta transversal en la zona afectada térmicamente
- 4) Grieta longitudinal en el metal de aportación
- 5) Grieta en el borde del cordón de soldadura
- 6) Grieta bajo el cordón de soldadura en la zona afectada térmicamente
- 7) Grieta en la línea de fusión
- 8) Grieta en la raíz de la soldadura