



TECNOLOGÍA EN SOLDADURA

Polígono Industrial Can Sedó

08292 Esparreguera

Tel: (34) 93 7774162

Fax: (34) 93 7774203

www.sunarc.com

METALURGIA

INDICE

1. Conceptos fundamentales	3
1.1. Clasificación de las sustancias por su composición	3
1.2. Clasificación de los cuerpos por su estructura	3
1.3. Diferencia entre mezcla y combinación	3
1.4. Aleación	3
1.5. Propiedades mecánicas de los metales	4
1.6. Medidas de las características mecánicas de los metales	
1.6.1. Limite de elasticidad	4
1.6.2. Carga de rotura	5
1.6.3. Alargamiento	
1.6.4. Dureza	6
1.6.5. Relilencia	
2. El hierro	7
2.1. Estado natural	7
2.2. Aleaciones de hierro con carbono	7
2.3. Componentes de los aceros	7
2.3.1. Carbono	8
2.3.2. Manganeso	8
2.3.3. Silicio	8
2.3.4. Cromo	8
2.3.5. Níquel	8
2.3.6. Molibdeno	8
2.3.7. Azufre y fósforo	
2.4. Clasificación de los aceros por su soldabilidad	9
2.5. Aceros de alta aleación: el acero inoxidable	10
2.5.1. Aceros inoxidables martensíticos	10
2.5.2. Aceros inoxidables ferríticos	10
2.5.3. Aceros inoxidables austeníticos	11
3. El aluminio y sus aleaciones	11
3.1. Estado natural	11
3.2. Aleaciones de aluminio	12
3.3. Aplicaciones del aluminio	12
4. El cobre	12
4.1. Estado natural	12
4.2. Aplicaciones del cobre	13
4.3. Aleaciones del cobre	13
5. Soldabilidad	14
5.1. Energía de aportación	14
5.2. Balance térmico de los procesos de soldeo	14
5.3. Zonas en una junta soldada	17
5.4. Riesgos de la absorción de gases en metal fundido	18
5.4.1. El oxígeno	18
5.4.2. El nitrógeno	18
5.4.3. El hidrógeno	18
6. Defectos de soldadura	19
6.1. Fisuras	19
6.2. Rotura frágil	19
6.3. Precipitación de carburos	19
6.4. Fase sigma	20
6.5. Desgarre laminar	20

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS POR SU COMPOSICIÓN.

Atendiendo a su composición, las sustancias pueden clasificarse en dos grupos:

a) **SUSTANCIAS SIMPLES:** son aquellas que no se pueden descomponer en otras más sencillas (hierro, cobre, plata, oro,...). Se pueden dividir en:

* **METALES:** poseen brillo y son buenos conductores del calor y la electricidad (hierro, níquel, oro, Plata,...)

* **NO-METALES:** carecen de brillo y son deficientes conductores del calor y la electricidad (oxígeno, hidrógeno, cloro,...).

b) **SUSTANCIAS COMPUESTAS:** son las que se pueden descomponer, como por ejemplo la sal, que resulta de la combinación del cloro y del sodio. Se pueden dividir en:

* **ORGÁNICAS:** en ellas entra a formar parte de su composición el carbono (alcohol, azúcar, urea,...).

* **INORGÁNICAS:** el carbono no forma parte de su composición (agua, sal común, ácido sulfúrico,...).

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS POR SU ESTRUCTURA.

Atendiendo a su estructura, los cuerpos se clasifican en:

a) **HOMOGÉNEOS:** tienen aspecto y propiedades idénticas en todos sus puntos (agua, hierro, aire,...).

b) **HETEROGÉNEOS:** su aspecto y propiedades no son iguales en todos sus puntos (granito, hormigón,...).

1.3. DIFERENCIA ENTRE MEZCLA Y COMBINACIÓN.

Una mezcla es la reunión de varias sustancias que se pueden separar solamente por medios físicos (hormigón,...). Se puede realizar en cualquier proporción. El proceso de mezcla no desprende ni absorbe calor.

Una combinación es la reunión de varias sustancias que dan origen a un nuevo producto del que no se pueden separar los componentes solamente por medios físicos, sino por reacciones químicas (agua,...). Su proporción es definida e invariable. El proceso de combinación puede absorber o desprender calor.

1.4. ALEACIÓN.

En muchas ocasiones, el metal puro no reúne las condiciones necesarias para ser utilizado en la fabricación de herramientas, piezas de máquinas,... y se requiere añadirle porciones variables de otros elementos metálicos o no-metálicos para conseguir las propiedades que exactamente corresponden al uso al que ha de ser destinada la aleación.

Desde el punto de vista físico, toda aleación es una mezcla más o menos homogénea.

Desde el punto de vista químico, las aleaciones pueden considerarse como uniones de metales o incluso con no-metales, ya que se han realizado a unas temperaturas, presiones y proporciones adecuadas para que el producto final corresponda a unas ciertas propiedades que se han previsto de antemano.

Las aleaciones pueden ser resultado de la unión:

* **METAL+METAL:** Ej. : Cobre + Zinc => Latón

- * METAL+METALES: Ej. : Cobre + Estaño + Zinc => Bronce
- * METAL+NO-METAL: Ej. : Plomo + Arsénico => Plomo de perdigones
- * METAL+METALES+NO METALES: Ej. : Cobre + Estaño + Plomo + Antimonio + Arsénico +
+... => Metal Babbitt

1.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METALES.

- FRAGILIDAD: un sólido es frágil cuando se rompe con facilidad al golpearlo.
- TENACIDAD: se trata del caso contrario a la fragilidad.
- ELASTICIDAD: un sólido es elástico cuando es capaz de deformarse ante la acción de una fuerza y volver a su forma inicial cuando cesa la fuerza que lo deformó.
- DUREZA: un sólido es duro cuando presenta resistencia a ser rayado.
- DUCTILIDAD: un sólido es dúctil cuando presenta la propiedad de poder estirarse en hilos.
- MALEABILIDAD: un sólido es maleable cuando presenta la propiedad de poder extenderse en láminas.

1.6. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS METALES

Las características mecánicas de los metales son las siguientes:

- LIMITE DE ELASTICIDAD.
- CARGA DE ROTURA.
- ALARGAMIENTO.
- DUREZA.
- RESILENCIA.

1.6.1 LIMITE DE ELASTICIDAD.

El limite de elasticidad es la tensión máxima que puede soportar un metal sin sufrir deformación permanente. Su medición se realiza en un ensayo destructivo de tracción. Su valor viene dado por:

donde:

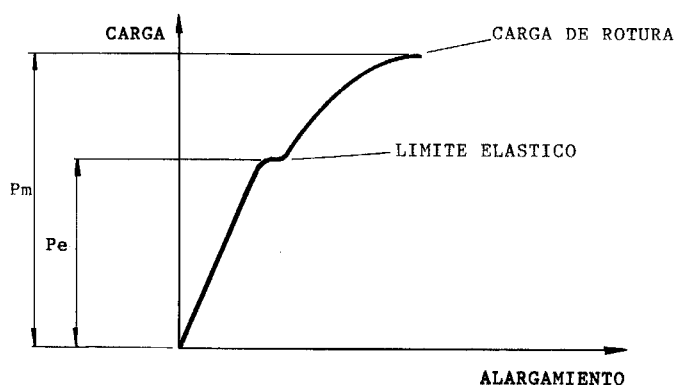
Pe : Carga límite de deformación elástica
So : Sección de la probeta antes de la rotura

$$E = \frac{Pe}{So}$$

1.6.1. CARGA DE ROTURA.

Una vez que en el ensayo de tracción se ha sobrepasado el limite elástico, el metal sigue deformándose, esta vez de forma permanente, hasta que llega el punto en que el metal se parte. Este punto es el llamado de Carga de Rotura.

En la figura siguiente se refleja tanto el límite elástico como la carga de rotura:



Para cuantificar los valores de carga de rotura, se emplea la expresión:

donde :

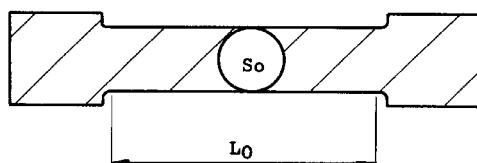
Pm : Carga máxima

So': Sección de la probeta después de la rotura.

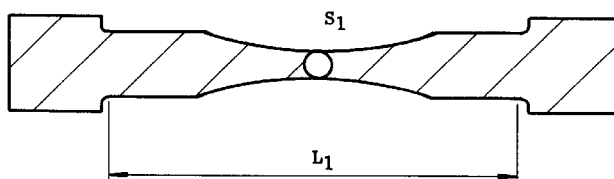
$$R = \frac{P_m}{S_o'}$$

1.6.2. ALARGAMIENTO.

Una vez rota la probeta, uniendo las dos partes se puede medir su longitud final.



PROBETA ANTES DE INICIAR EL ENSAYO



PROBETA DESPUES DE ROTA

Sabiendo su longitud inicial, el alargamiento vendrá indicado por la siguiente expresión:

donde:

L : Longitud final de la probeta después de la rotura

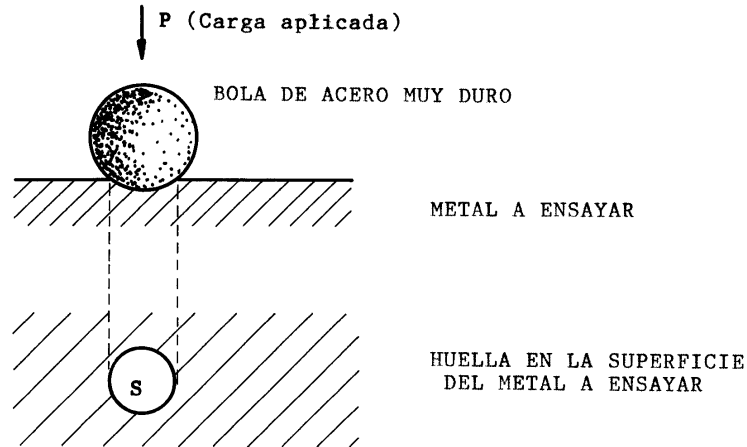
L₁ : Longitud inicial de la probeta antes de iniciarse el ensayo de tracción.

A : Alargamiento proporcionado en %

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100$$

1.6.3. DUREZA.

Existen diversos ensayos para medir la dureza, tales como el ensayo de dureza al rayado, a la lima,...; pero el que está más generalizado es el ensayo de dureza a la penetración. Uno de ellos es el ensayo Brinell, que se muestra a continuación:

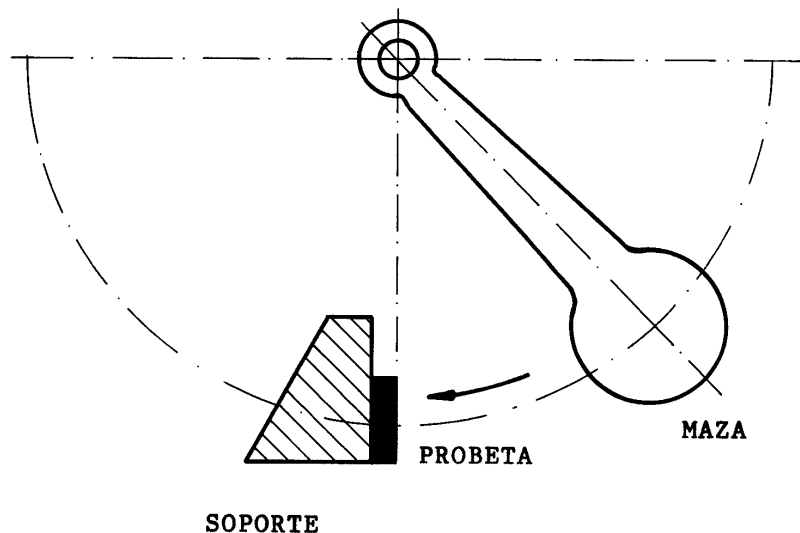


El valor de dureza Brinell viene dado por la expresión resultante del cociente entre la carga aplicada a la bola de acero y la sección de la huella producida en la superficie del metal a ensayar:

$$HB = \frac{P \text{ (Kg)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$

1.6.5. RESILENCIA.

La resiliencia se define como la energía consumida en la rotura de una probeta que ha sido sometida a un ensayo de choque por medio de un martillo especial, tal y como se muestra a continuación:



Por tanto, la resiliencia mide la TENACIDAD del material.

2. EL HIERRO.

2.1. ESTADO NATURAL.

El hierro se encuentra en la naturaleza en forma de óxidos de hierro, formando parte de diversos minerales (hematites parda, hematites roja, magnetita, siderita, piritita,...).

Es uno de los metales que mayor facilidad tiene para unirse al oxígeno, motivo por el cual es difícil hallarlo libre en la naturaleza.

En estado puro *es* un metal blanco azulado, dúctil y maleable, que funde a los 1536 °C.

Es un buen conductor de la electricidad y se imanta fácilmente.

El hierro puro tiene pocas aplicaciones industriales, por lo que se alea con otros elementos para obtener propiedades mejoradas. Las aleaciones más importantes son de hierro al carbono.

2.2. ALEACIONES DE HIERRO CON CARBONO.

En función del porcentaje de carbono, las aleaciones de hierro con carbono se dividen en:

* ACEROS: su contenido en carbono es inferior al 1,76 %

* FUNDICIONES: su contenido en carbono se sitúa entre valores del 1,76 % y el 6,67%

2.3. COMPONENTES DE LOS ACEROS.

Para conferir al acero definitivo determinadas propiedades mecánicas, se añaden a los aceros otros elementos además del carbono: silicio, manganeso,...

Además, los aceros contienen impurezas que son nocivas, tales como el azufre y el fósforo.

2.3.1. CARBONO.

En estado puro, el carbono se encuentra bajo las formas de diamante y grafito; en estado amorfo, en el carbón piedra, antracita, lignita,...

En los aceros, repercute en gran medida sobre las características mecánicas y en su soldabilidad. De esta manera, a mayor porcentaje de carbono, mayor dureza del acero, aunque aumenta el riesgo de temple y disminuye su soldabilidad.

2.3.2. MANGANESO.

En cantidades moderadas, el manganeso es beneficioso para el acero, ya que se combina con el oxígeno más fácilmente que el hierro, además de con otras impurezas tales como el azufre.

En cantidades excesivas produce efectos parecidos a los del carbono.

2.3.3. SILICIO.

En cantidades moderadas, también se combina con el oxígeno más fácilmente que el hierro.

En cantidades excesivas, los efectos que produce son parecidos a los del carbono.

2.3.4. CROMO.

En cantidades específicas, confiere a los aceros características de inoxidabilidad.

Por la facilidad que presenta para combinarse con el carbono, puede formar ciertos compuestos que son duros y frágiles.

A medida que aumenta el porcentaje de cromo, disminuye su soldabilidad.

2.3.5. NÍQUEL.

Añadido en los aceros, mejora las características de resistencia y alargamiento de los aceros.

A medida que aumenta el porcentaje de níquel, aumenta el riesgo de temple y disminuye su soldabilidad.

2.3.6. MOLIBDENO.

Aumenta la resistencia de los aceros al calor, pero su contenido debe ser muy pequeño, ya que en caso contrario hay riesgo de temple y se hace difícil su soldabilidad.

En los aceros inoxidables mejora su resistencia a la corrosión.

2.3.7. AZUFRE Y FOSFORO.

Son los causantes en muchas ocasiones de la formación de grietas en caliente y en frío. Durante la soldadura, favorecen la aparición de poros, sopladuras y fisuras.

Hay que limitar las cantidades de cada uno de ellos por debajo de 0,04% , no sobrepasando nunca la suma de los dos el 0,07%.

2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS POR SU SOLDABILIDAD.

Atendiendo a la soldabilidad de los aceros, estos se pueden clasificar en:

- * SOLDABLES: su contenido en carbono no excede del 0,25%.
- * MEDIANAMENTE SOLDABLES: su contenido en carbono varía entre 0,25% y 0,4%.
- * POCO SOLDABLES: contienen carbono en porcentaje que va de 0,4% a 0,6%.
- * NO SOLDABLES: son aquellos que tienen porcentajes de carbono superiores al 6%.

Al igual que el carbono, los elementos aleantes y las impurezas juegan un papel muy importante en la soldabilidad del acero, así como en la aparición de grietas en el cordón de soldadura.

Para evitar que la soldadura fisure, se recurre al precalentamiento. Para determinar la temperatura de precalentamiento, existen varias fórmulas; una de ellas es la realizada por Seferian, que tiene en cuenta no solamente la composición del material sino también el espesor. Para ello, se calcula el llamado CARBONO EQUIVALENTE, que no es más que la suma del porcentaje de carbono y de la influencia, expresada en porcentajes, de los demás elementos aleantes. De esta manera, el carbono equivalente debido a la composición será:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}$$

Y,
debido
al

espesor:

$$C_e = 0,005 \cdot e \cdot C_c$$

siendo:

e : espesor de la chapa

El carbono equivalente total será la suma de los dos:

$$C_T = C_c + C_e$$

El cálculo de la temperatura de calentamiento se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_T - 0,25}$$

2.5. ACEROS DE ALTA ALEACIÓN: EL ACERO INOXIDABLE.

El acero inoxidable es un acero con contenido de Cromo suficiente (mínimo 11%) para que la aleación sea resistente a la corrosión.

Esta resistencia a la corrosión es debida a la formación de una película impermeable de óxido de cromo que impide que la acción del medio ambiente siga oxidando el metal.

Los elementos de aleación más comunes en el acero inoxidable (además del carbono y el cromo, por supuesto) son el níquel, el manganeso, el silicio, el molibdeno, el titanio y el niobio. Algunas de las influencias que estos elementos confieren al acero, son las siguientes:

- Níquel: es antimagnético, no se endurece y es maleable.
- Molibdeno: aumenta la resistencia a ciertos medios corrosivos y mejora la resistencia a la tracción.
- Titanio y niobio: impiden la formación de ciertos compuestos perjudiciales para los aceros inoxidables.

En la manipulación de las planchas de acero inoxidable, debe tenerse sumo cuidado en no rayarlas ni hacerles hendiduras más o menos profundas, ya que esto da lugar a la destrucción de la capa protectora y son zonas propensas a corrosiones por picaduras.

Asimismo, después de su soldadura, debe procurarse cepillar los cordones con cepillos de alambres de acero inoxidable con el fin de eliminar las posibles zonas de contaminación que pudieran dar lugar a corrosiones. También es aconsejable tratar las zonas soldadas con diversos compuestos como el ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico,..., que favorecen la creación de la capa de protección.

2.5.1. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.

Los aceros inoxidables martensíticos tienen un contenido en cromo situado entre el 11 y el 18%, y entre 0,1 y 1,4% de carbono.

Se endurecen cuando se enfrían desde la temperatura de soldadura (temple), produciendo fragilidad y tendencia al agrietamiento, por lo cual no se recomienda su soldadura. Son magnéticos y tienen menor coeficiente de expansión y menor conductividad térmica que un acero al carbono.

Se utilizan en plantas químicas sometidas a condiciones medianamente corrosivas, cuchillería,...

Si, a pesar de todo, deben soldarse, es preciso precalentarlos a temperaturas entre 200 y 400 °C para, después de la soldadura, pasar a enfriarlos lentamente para reducir la dureza y el peligro de grietas.

También es recomendable un postcalentamiento a 650-700 °C. El tipo de electrodo a utilizar debe ser lo más parecido al metal base.

2.5.2. ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.

Los aceros inoxidable ferríticos tienen un contenido en cromo situado entre el 16 y el 28% y entre 0,01 y 0,35% en carbono.

Debido a su bajo contenido en cromo, su estructura es casi completamente ferrítica. Son magnéticos y más fáciles de soldar que los martensíticos porque no son endurecibles en modo alguno por tratamiento térmico; solo un poco por deformación en frío o en caliente. Poseen unas propiedades moderadas o mediocres de tenacidad y ductilidad.

Sufren crecimiento de grano y fragilización a temperaturas superiores a los 900 °C.

Para su soldadura es preciso precalentarlos a 200 °C. Después de ésta, debe realizarse un post-tratamiento a 750 °C para ayudarles a recuperar su ductilidad.

2.5.3. ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Su contenido en cromo oscila entre 17 y 27%, en carbono es inferior al 0,1% y contiene además un 8% de níquel aproximadamente. El níquel aporta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión y controla el crecimiento de grano debido a la presencia de cromo. El cromo tiende a formar carburos, mientras que el níquel tiende a descomponerlos.

La adición de molibdeno a estos aceros mejora aún más la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas.

Son amagnéticos y presentan excelentes propiedades de tenacidad y ductilidad, y tienen una gran estabilidad estructural.

Son los más ampliamente conocidos y utilizados.

3. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

3.1. ESTADO NATURAL.

El aluminio, al igual que el hierro, se encuentra en la naturaleza en forma de óxidos de aluminio, formando parte de diversos minerales. Uno de estos minerales más importantes es la bauxita y el aluminio se encuentra en ella en forma de óxido de aluminio o alúmina.

El aluminio es un metal blanco, brillante, muy ligero y que funde a los 600 °C.

Su conductividad eléctrica es aproximadamente tres veces y media la del acero, mientras que su conductividad calorífica es de tres a cinco veces la del acero. Esta última propiedad obliga a utilizar grandes intensidades de soldadura, así como precalentamiento en el caso de utilización de piezas gruesas.

Su dilatación térmica es aproximadamente doble de la del acero, lo cual puede dar lugar a fuertes deformaciones y grietas en la soldadura.

Al igual que el acero inoxidable, este metal se autoprotege de la oxidación creando una capa de óxido de aluminio o alúmina compacta, dura y cristalina, que impide que el oxígeno siga atacando el metal.

Esta capa de alúmina, que desde el punto de vista de la protección es una gran ventaja, se convierte en inconveniente cuando se trata del tema de la soldadura, ya que si bien el aluminio funde a los 600 °C, la capa de alúmina lo hace a los 2050 °C.

Otra particularidad del aluminio es su invariabilidad de color frente a la temperatura, lo que no permite tomar éste como referencia de su temperatura. Por eso, es preciso emplear otros elementos como lápices termocolores, pirómetros,...

3.2. ALEACIONES DE ALUMINIO.

Las principales aleaciones del aluminio son:

- * ALUMINIO-COBRE: posee grandes propiedades mecánicas
- * ALUMINIO-SILICIO: mejora la ductilidad y la resistencia al choque.
- * ALUMINIO-ZINC: mejora las propiedades mecánicas, disminuye la resistencia a la corrosión y se convierte en más pesada.
- * ALUMINIO-MAGNESIO: son más ligeras que el propio aluminio, con buenas propiedades mecánicas, mecanizado fácil y buena resistencia a la corrosión.
- * ALUMINIO-MANGANESO: aumenta la dureza, la resistencia mecánica y a la corrosión.

3.3. APLICACIONES DEL ALUMINIO.

Debido a su ligereza, el aluminio es un metal muy útil para la fabricación de aleaciones ligeras empleadas en construcciones aeronáuticas y, en general, cada vez más, en los vehículos de transporte.

Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos.

Su elevada conductividad calorífica es aprovechada para la fabricación de utensilios de cocina y, en general, para aparatos intercambiadores de calor.

Su maleabilidad se utiliza para la fabricación de papel de aluminio.

Su resistencia a la corrosión hace que sea idóneo para la fabricación de depósitos que han de contener líquidos corrosivos.

4. EL COBRE.

4.1. ESTADO NATURAL.

El cobre fue uno de los primeros metales utilizados por el hombre, ya que debió existir con relativa abundancia en la naturaleza en estado nativo. Sin embargo, actualmente, la casi totalidad de la producción de cobre se obtiene de minerales, en forma de sulfuros, óxidos y carbonates.

El cobre es un metal de color rojo más o menos oscuro que funde a los 1083 °C.

Después de la plata, es el mejor conductor del calor y la electricidad: su alta conductividad calorífica es precisamente la que hace difícil su soldadura, ya que resulta muy difícil concentrar el calor en un punto determinado.

Es muy dúctil y maleable, pero aumenta mucho su resistencia y dureza al deformarlo en frío.

Los agentes atmosféricos forman en su superficie una delgada película de color verde grisácea que reduce la posterior oxidación.

4.2. APLICACIONES DEL COBRE.

Por su conductividad eléctrica, es muy útil para la fabricación de conductores.

Por su conductividad calorífica, es idóneo para la fabricación de serpentines de refrigeración.

Por su resistencia a la corrosión, se emplea en la fabricación de tuberías para la industria química.

Por su ductilidad y color, se emplea para trabajos artísticos.

4.3. ALEACIONES DEL COBRE.

Las aleaciones del cobre que cabe destacar son:

* **LATONES:** contienen un 50% de zinc como máximo. Esta adición de zinc aumenta simultáneamente la resistencia mecánica y la ductilidad de la aleación, cosa extraña en metalurgia ya que lo habitual es que cuando aumenta la resistencia mecánica disminuya la ductilidad y viceversa.

El zinc es un metal de bajo punto de ebullición, por lo que para evitar pérdidas de zinc en los latones durante la soldadura, ésta debe ser oxiacetilénica.

Presentan las propiedades esenciales del cobre, pero con un precio de costo más bajo y una mayor facilidad de trabajo.

Los latones tienen muchas aplicaciones: por su aspecto, en imitaciones de oro para joyería; por su ductilidad, para la fabricación de piezas por embutición; por su resistencia a la corrosión, en fabricación de maquinaria marina; por su menor precio que los bronce, sustituyen a estos en muchas fabricaciones.

* **LATONES ESPECIALES:** además de zinc, contienen otros elementos tales como plomo, manganeso, estaño,...

* **BRONCES:** son aleaciones de cobre y estaño (últimamente, se vienen llamando bronce a las aleaciones de cobre con cualquier otro metal, a excepción del zinc). El estaño en los bronce tiene una influencia parecida al zinc en los latones, aunque más enérgica.

Los bronce dan productos moldeados más sanos que los latones, y se trabajan más fácilmente.

El color depende también del porcentaje de estaño, y varía del rojo pálido hasta el blanco.

Su resistencia al agua de mar es menor que la de ciertos latones.

Las aplicaciones más típicas de los bronce son: por sus buenas calidades para el rozamiento, se utilizan para la fabricación de cojinetes; por su excelente resistencia a la corrosión, para la

fabricación de hélices; por su bello y permanente aspecto, para la fabricación de monedas, medallas y adornos en general.

Los bronce más importantes son los fosforosos, los al aluminio, los al plomo y el cuproníquel.

5. SOLDABILIDAD.

Un acero se considera soldable en un grado prefijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la continuidad metálica de la unión, de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de que forma parte integrante.

5.1. ENERGÍA DE APORTACIÓN.

Se denomina energía de aportación o Heat Input al calor puesto en juego en el proceso de soldeo.

Esta energía, también llamada Energía Bruta Aportada EBA, se expresa en función de los parámetros del arco en julios por unidad de longitud de soldadura:

$$EBA = \frac{U \ I \ 60}{v} \quad (\text{Julios/cm})$$

en donde:

U .- tensión del arco en voltios

I : intensidad de la corriente en amperios

t : tiempo de fusión del electrodo durante el cual se aporta calor a la pieza, en segundos

v .- velocidad de avance de la soldadura en cm/min

Como puede observarse, la EBA es independiente del diámetro del electrodo. En realidad, esta influencia va implícita en la intensidad de la corriente y el tiempo necesario para su fusión.

5.2. BALANCE TÉRMICO DE LOS PROCESOS DE SOLDEO.

El calor puesto en juego en el proceso de soldeo se transmite a la pieza:

- por los procesos iónicos o electrónicos que tienen lugar en la zona de contacto de la columna del arco con la pieza;
- por el choque del chorro caliente de plasma;
- por la recombinación de todos los gases disociados en la columna del arco.

El calor se pierde en el arco:

- por conducción en flujo de retroceso a través del propio electrodo, con mayor razón si no es consumible y está refrigerado;
- por radiación;
- por convección, a través de los gases que se separan de la columna del arco.

El calor se pierde en el baño de fusión:

- por la formación de cualquier tipo de escoria originada por fundentes presentes en el arco;
- por convección;
- por conducción, a través de la pieza.

Así, pues, puede verse que no toda la energía generada en el arco llega a la pieza, puesto que parte de ella se disipa en pérdidas que son función en su mayor parte de la naturaleza del proceso de soldadura y en bastante menor medida de la posición del soldeo.

Se denomina Energía Neta Aportada ENA a la energía real que recibe la pieza durante la operación de soldadura. Por tanto:

$$ENA = p_1 \cdot EBA$$

Siendo p_1 el rendimiento del proceso de soldeo.

Se consideran normales los siguientes rendimientos

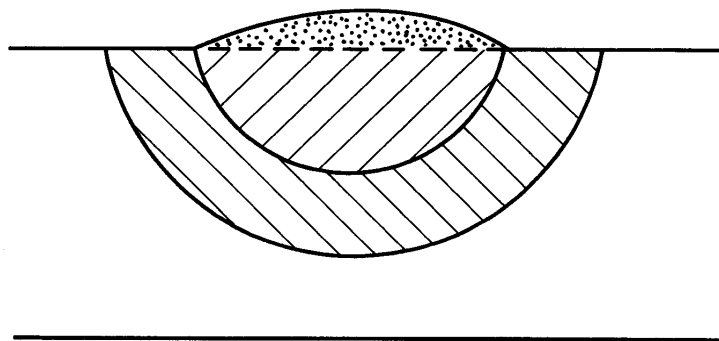
- Arco sumergido : 0,9-1
- Electrodo recubierto : 0,75 - 0,80
- MIG : 0,70
- MAG : 0,85
- TIG : 0,65




Se entiende fácilmente la diferencia de rendimientos. El mayor de ellos, corresponde en buena lógica a la soldadura por arco sumergido, debido a la protección térmica que produce sobre el baño de fusión la manta de escoria y el flux no consumido.

En cuanto a procesos de soldeo MIG/MAG, el gas de protección produce un efecto refrigerante sobre el baño de fusión, que resulta mayor en el inerte porque, como su nombre indica, al no descomponerse en el arco no aporta calor a la pieza.

La influencia de la posición de soldeo es muchísimo menor y aunque globalmente resulta insignificante, es fácil deducir que en cuanto a pérdidas de calor por convección se pueden clasificar por este orden: bajo techo, vertical descendente, vertical ascendente, horizontal y sobremesa.

En la siguiente figura se muestra la sección de un cordón de soldadura:



-  Am : área metal de base fundido
-  Aa : área metal aportado
-  Az : área zona afectada térmicamente ZAT

El área del cordón de soldadura es: $A_s = A_a + A_m$

La cantidad teórica de calor necesaria Q para fundir un material es igual a la suma de los calores parciales requeridos para elevar la temperatura desde la inicial a la temperatura de fusión (q_1) y el necesario para transformarlo de sólido a líquido a esa temperatura (q_2). Este último se denomina calor latente de fusión.

El calor teórico viene dado por la expresión:

$$Q = \frac{(T_f + 273)^2}{300000} \quad (\text{J/mm}^3)$$

En donde T_f es la temperatura de fusión del material en grados centígrados.

El rendimiento térmico ρ_2 , que caracteriza el depósito de un cordón de soldadura, se determina por la relación entre la sección del metal A_s y la ENA:

$$\rho_2 = \frac{Q \cdot A_s}{\text{ENA}} = \frac{Q \cdot A_s}{\rho_1 \cdot \text{EBA}} = \frac{Q \cdot A_s \cdot v}{\rho_1 \cdot U \cdot I}$$

El rendimiento térmico depende principalmente del proceso de soldeo y del material y, en menor escala, del espesor y diseño de junta.

La soldadura por arco sumergido es, dentro de los procesos de soldadura al arco, el de mejor rendimiento térmico.

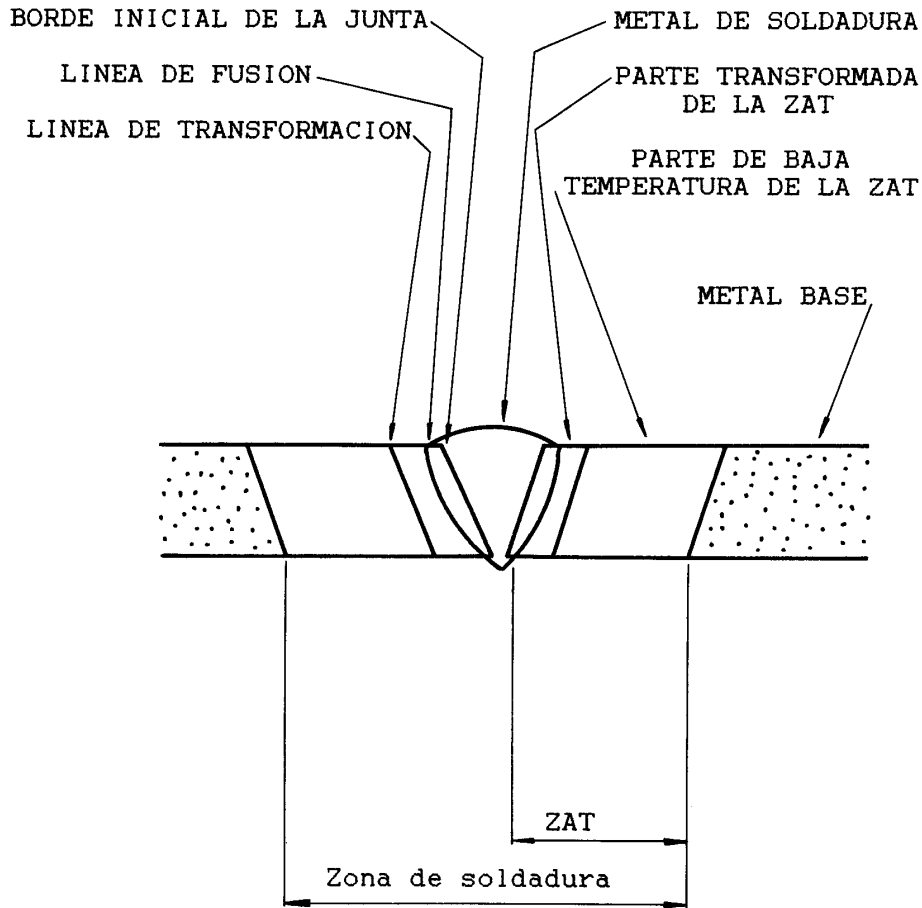
De la anterior ecuación se obtiene:

$$A_s = \frac{\rho_2 \cdot \text{ENA}}{Q} = \frac{\rho_2 \cdot \rho_1 \cdot \text{EBA}}{Q}$$

O sea, que la sección transversal de un cordón es directamente proporcional a la EBA con que ha sido depositado. De esta manera, en una réplica metalográfica, en donde por ataque químico puedan distinguirse los cordones, midiendo el área de su sección y conociendo el proceso de soldadura utilizado, se puede calcular la energía de aportación empleada, ya que dentro de un mismo proceso de soldadura, ρ_1 y ρ_2 no varían cuando se modifican los otros parámetros de soldadura.

5.3. ZONAS EN UNA JUNTA SOLDADA.

La composición química del material de base, del aportado y las temperaturas a que han estado sometidos durante el soldeo tienen una influencia decisiva sobre la estructura metalúrgica y, como consecuencia, en el comportamiento del conjunto soldado, tanto desde el punto de vista mecánico como frente a la corrosión. A continuación se indican las zonas características del depósito de soldadura:



METAL BASE: es el material de la construcción no afectado por la operación de soldadura, cuya composición química y estructura corresponden completamente a las de partida.

METAL DE SOLDADURA: es el metal fundido por la operación de soldeo y cuya composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del material de aportación (electrodo revestido, alambre, varilla, alambre + flux,...) y del material de base.

ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE (ZAT): es la zona del metal de base que ha permanecido durante cierto tiempo en una gama de temperaturas en la que pueden producirse transformaciones o modificaciones estructurales, ya sea por formación de otras fases en aceros al carbono o poco aleados, ya sea por precipitación de compuestos de elementos intersticiales como carburos o nitruros o por formación de fases intermetálicas en los aceros inoxidable.

5.4. RIESGOS DE LA ABSORCIÓN DE GASES EN METAL FUNDIDO.

Uno de los problemas más importantes que afectan a la calidad final de la construcción soldada y que debe tenerse presente en todas las clases de aceros es la absorción de gases por parte del material fundido.

Los gases que afectan principal y desfavorablemente a la unión soldada son el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Los dos primeros proceden del aire y el último de la humedad ambiental o del agua absorbida por los materiales de aporte.

5.4.1. EL OXIGENO.

El oxígeno es un elemento muy activo. Su acción puede evitarse utilizando desoxidantes adecuados. En los aceros, el manganeso y el silicio, que tienen gran afinidad por el oxígeno lo captan formando óxido de manganeso y óxido de silicio que pasan a la escoria.

El oxígeno libre forma monóxido de carbono con el carbono del acero a la temperatura de soldadura. Este gas, si no dispone de tiempo para desprenderse, queda ocluido dentro del metal fundido formando porosidades esféricas o vermiculares originadas por la tendencia de escape del gas.

5.4.2. EL NITRÓGENO.

El acero fundido puede disolver grandes cantidades de nitrógeno. A temperatura ambiente, la solubilidad es menor. El exceso de nitrógeno precipita en forma de nitruros o permanece como nitrógeno libre.

Los nitruros aumentan la carga de rotura, el límite elástico y la dureza, pero disminuyen la ductilidad, lo que provoca fisuraciones en el cordón o en la zona térmicamente afectada. El nitrógeno libre provoca porosidad.

5.4.3. EL HIDROGENO.

El acero fundido, además, también puede disolver grandes cantidades de hidrógeno. El paso de austenita cargada de hidrógeno a ferrita provoca fisuras bajo cordón. En ensayos estáticos, un acero cargado de hidrógeno muestra el fenómeno denominado "ojos de pez", especie de copos de color blanco que suelen aparecer en la superficie de rotura de las probetas. Se deben, según la teoría general, a la concentración de hidrógeno en vacantes del material producida por las grandes presiones motivadas por el efecto de estricción en la prueba de tracción.

6. DEFECTOS DE SOLDADURA.

6.1. FISURAS.

La fisuración en frío o retardada ocurre desde temperatura ambiente hasta 250 °C y puede tardar meses en producirse. Ocurre en el metal depositado y en la zona de transición (HAZ: Heat Affected Zone) debido a:

- Embridamiento y alta severidad térmica.
- Área de soldadura de sección insuficiente.
- Entallas.
- Hidrógeno en el metal depositado (MIG y TIG no presentan).
- Presencia de impurezas (principalmente fósforo).
- Altas velocidades de soldeo a bajas intensidades.

La fisuración en caliente o de solidificación está causada por impurezas de bajo punto de fusión en el baño de fusión que permanecen líquidas cuando el metal restante se está solidificando y, por lo tanto, contrayendo. Depende de:

- Alta densidad de corriente.
- Distribución de calor y tensiones.
- Embridamiento y severidad térmica.
- Dilución.
- Impurezas (azufre, níquel, carbono).
- Pre calentamiento.
- Alta velocidad soldeo y arco largo.

6.2. ROTURA FRÁGIL.

Por debajo de cierta temperatura llamada de transición, el comportamiento dúctil-elástico de los metales se convierte en plástico frágil. Para que se de rotura frágil, deben coincidir tres factores:

- Temperaturas bajas.
- Entallas.
- Tensiones residuales.

6.3. PRECIPITACIÓN DE CARBUROS.

En el caso de aceros inoxidables, para que se produzca la precipitación de carburos de cromo es necesario que haya un mantenimiento prolongado a temperaturas entre 600 y 850 °C.

En ese caso, ocurre una decromización y el material se hace sensible a la corrosión electrolytica (las zonas empobrecidas en cromo actúan de cátodos y el cromo de ánodo). Se acostumbra a producir no en el cordón de soldadura, sino en la zona de transición que es la que está mayor tiempo a temperaturas de 600-850 °C.

Algunos de los remedios para evitarlo, pueden ser:

- Material base con carbono inferior a 0,03%.
- Adición de titanio (atención: cantidades superiores al 0,06% pueden producir corrosión en hoja de cuchillo).
- Adición de niobio (en contrapartida, aumenta el riesgo de fisuración en caliente).
- Adición de molibdeno.
- Tratamiento térmico de solubilización de carburos (calentar a 1000-1100 °C y enfriar rápidamente).

6.4. FASE SIGMA.

Los aceros inoxidables austeníticos con elevada cantidad de ferrita en el intervalo de temperaturas de 450-900 °C, pueden perder ductilidad y resiliencia debido a la transformación de la ferrita en la fase sigma frágil (compuesto intermetálico hierro-cromo). La ferrita proporciona resistencia a la fisuración en caliente pero no debe exceder de ciertos límites.

6.5. DESGARRE LAMINAR.

Ocurre en estructuras grandes con muchas tensiones, y son grietas que aparecen generalmente en metal base o zona de transición paralelamente a la superficie de la chapa. Es consecuencia de tensiones elevadas y pobre ductilidad, debido a la presencia de inclusiones no metálicas paralelas a la superficie de la chapa. Algunas uniones como en T, rincón o en cruz son las más susceptibles.

Si ocurre este fenómeno, debe cambiarse el diseño.