

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ACERO ASTM A36

El acero ASTM A36 es un material que por sus características y propiedades se ha convertido en el más usado por la industria ecuatoriana; este material es el resultado de la composición de elementos químicos, siendo el más importante el hierro y el de menos presencia el carbón, el cual, no supera el 1,2% en peso de la composición, por lo general, alcanza porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%, lo que facilita el proceso de moldeo de este acero.

Las características de composición son las que clasifican a los materiales en función de los elementos que dominan en cantidad, en función de la facilidad de realizar algunos tratamientos térmicos y de su uso.

El acero es muy utilizado en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas; por la variedad que presenta y sobre todo por la disponibilidad en el mercado.

Una ventaja muy importante de este material es que tienen un comportamiento lineal y elástico hasta la fluencia, lo que hace que sea predecible en las estructuras, y por lo tanto el más usado en la industria.

Al existir una gran variedad de aceros por las características de la composición y de las aleaciones, se ha impuesto ciertas Normas que los regulan, estas son impuestas por cada país, cada fabricante de acero, y también por los consumidores de este material.

Las normas reguladores del acero, más conocidas a nivel internacional, son las clasificaciones de AISI, ASTM, DIN o ISO. Estas normas, indican la cantidad mínima o máxima de cada componente y las propiedades mecánicas que tienen el acero resultante. Por ejemplo en el sistema que usa el AISI, para aceros con bajo contenido de aleación, AISI XXXX, los dos primeros números indican el contenido

de aleación y los dos últimos indican el contenido nominal de carbono en fracciones de 0,01%. A los aceros también se los clasifica por el tratamiento térmico que se les realizó, este es un proceso de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y condiciones determinadas, al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Este proceso no cambia la composición química pero si los constituyentes estructurales. Los tratamientos térmicos básicos son: el Temple (aumenta la dureza y la resistencia del acero), Revenido (conserva dureza y aumenta tenacidad), Recocido (aumenta la elasticidad y disminuye la dureza) y Normalizado (deja el material en ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono).

2.1.1 PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS

Todos los materiales poseen propiedades y características inherentes que los diferencian entre sí, entre las principales propiedades se tienen: eléctricas, magnéticas, mecánicas, químicas físicas y térmicas, como ya se mencionó están en función de su composición. A continuación se describe las más importantes y las que tienen mayor influencia en la selección del material.

Las propiedades mecánicas son aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas, estas dependen de la composición química y de la estructura cristalina que tenga, y se expresan en cantidades que están en función de los esfuerzos y/o las deformaciones.

A continuación se definen las principales propiedades mecánicas del acero:

- Resistencia: Es la oposición al cambio de forma y a las fuerzas externas que pueden presentarse como cargas de tracción, compresión, cizalle, flexión y torsión.
- Elasticidad: Es la capacidad de un cuerpo para volver a su forma inicial al dejar de actuar la fuerza que lo deformó.

- **Plasticidad:** Es la capacidad de deformación de un metal antes que se rompa; si la deformación se produce por alargamiento se denomina ductilidad y por compresión, se llama maleabilidad.
- **Tenacidad:** Es la resistencia a la rotura por esfuerzos que deforman el metal.
- **Dureza:** Es la capacidad que presenta el metal a ser deformado en su superficie por la acción de otro material.
- **Resilencia:** Es la capacidad que presentan los materiales para absorber energía por unidad de volumen en la zona elástica.
- **Resistencia a la rotura:** Es la resistencia que opone el material a romperse por un esfuerzo mecánico exterior.
- **Fusibilidad:** Es la facilidad de poder dar forma a los metales, fundiéndolos y colocándolos en moldes.
- **Soldabilidad:** Es la facilidad de los metales para que dos piezas en contacto puedan unirse formando un conjunto rígido. Una unión sólida y fuerte es que la soldadura no tenga imperfecciones ni defectos, y debe ser tan resistente como el material base.

Entre las propiedades físicas están relacionadas con la estructura, materia, cuerpo, peso, masa, volumen, densidad, peso específico, y su comportamiento ante agentes físicos como la electricidad, magnetismo, calor, sonido, entre otros.

- **Estructura:** Es el orden de las moléculas que varían por el proceso de transformación o fabricación, en ciertos casos se diferencia a simple vista pero en otros es necesario el uso de un microscopio.

La estructura interna o cristalina de los aceros es un factor fundamental que define el comportamiento de los materiales, esta se clasifica en función del tamaño de grano de la siguiente forma: ferrita, cementita, perlita, martensita y austenita.

La ferrita es blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución, por lo que se considera como hierro puro. La cementita, es un compuesto de hierro con el 7% de carbono, es de gran dureza y muy

quebradiza. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica, tiene 88% de ferrita y 12% de cementita, y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes. Aparece por lo general en el enfriamiento lento de la austenita.

Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita; cuando el acero tiene un 0,8% de carbono es completamente perlita. El acero con cantidades mayores de carbono es una mezcla de perlita y cementita.

Cuando se aumenta la temperatura del material, la ferrita y la perlita se transforman en austenita, es una aleación de hierro, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, esta se vuelve a convertir en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es repentino la austenita se convierte en martensita, una modificación de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida.

- Densidad: Es la masa contenida en una unidad de volumen.
- Peso específico: Es el cociente entre el peso del material y el volumen que ocupa en el espacio.
- Punto de fusión: Es un límite en el que las moléculas del material se comienzan a separar y deja de comportarse como sólido.

Las propiedades térmicas están relacionadas con los mecanismos de transferencia de calor como son conducción, convección, radiación y son las siguientes:

- Conductividad eléctrica: Es la facilidad que presenta un material para dejar pasar a través de él la corriente eléctrica.
- Conductividad térmica: Es la facilidad que presenta un material para dejar pasar a través de él una cantidad de calor.
- Dilatación: Es el aumento de las dimensiones de un metal al incrementarse la temperatura.

Las propiedades químicas dependen de su composición; pero, de manera general se distinguen dos propiedades que son:

- Oxidación: La oxidación se produce cuando se combina el oxígeno del aire y el metal. La oxidación es superficial, produciéndose en la capa más externa del metal y protegiendo a las capas interiores de la llamada oxidación total.
- Corrosión: Se considera corrosión a toda acción que ejercen los diversos agentes químicos sobre los metales, primeramente en la capa superficial y posteriormente en el resto.

A continuación se detalla la composición química del acero al que se hace referencia, en la tabla 2.1 se muestra los valores que se utiliza en el presente proyecto, datos que fueron facilitados por la empresa IPAC:

Tabla 2.1. Composición química del acero A36

| Elemento | C | Cu | Fe | Mn | P | S |
|----------|------|------|----|---------|-------------|-------------|
| % | 0,25 | 0,02 | 99 | 0.8-1.2 | Máx 0,04 | Max 0,05 |

Fuente: IPAC

En la siguiente tabla se recopiló los datos de las propiedades más importantes del acero ASTM A36, en la elaboración de este proyecto se hace referencia a estos valores:

Tabla 2.2. Datos de propiedades del acero ASTM A36

| PROPIEDAD | VALOR | UNIDADES |
|--------------------------|------------------|-------------------|
| Densidad | 7850 | Kg/m ³ |
| Límite de fluencia | 32-36 (250-280) | Ksi (MPa) |
| Resistencia a la tensión | 58 – 80(400-550) | Ksi(MPa) |
| Modulo de elasticidad | 29 000 | Ksi |
| % de elongación mínimo | 20 (8") | % |
| Punto de fusión | 1538 | °C |

Fuente: Ciencia de materiales, Selección y Diseño", de Pat L. Mangonon

2.1.2. USO EN LA INDUSTRIA Y ESPEORES ADECUADOS

Por las características descritas, el acero A36, es un material generalmente usado en la industria y por lo tanto lo encontramos en la vida cotidiana.

Al acero lo encontramos en las herramientas, utensilios, equipos mecánicos, siendo parte de electrodomésticos y maquinaria en general, en las estructuras de viviendas y edificios. Usuarios de este material son los fabricantes de maquinaria agrícola, medios de transporte, constructoras ferroviarias y fabricantes de todo tipo de material rodante.

Este material también se usa en el armamento pesado, vehículos blindados y acorazados. En la construcción de barcos y especialmente en la industria petrolera.

Es importante recalcar que este material, en la industria automotriz es la base para su funcionamiento; por ejemplo:

- Cigüeñal, bielas, piñones, ejes de transmisión de caja de velocidades y brazos de articulación de la dirección son de acero forjado.
- De chapa de estampación, son las puertas y demás componentes de la carrocería.
- Muelles de válvulas, de asientos, de prensa embrague, amortiguadores, etc., son de acero.
- Tornillos y tuercas son de acero, etc.

2.1.2.1 Espesores

El acero tiene muchas aplicaciones, entre las principales están las tuberías, planchas para hacer perfiles para estructuras, para estas aplicaciones existen un rango de espesores que se detallan a continuación.

En la tubería, para fabricar tubos de acero se parte de una chapa de acero, que se deforma curvándola hasta llegar a una geometría cilíndrica y soldando dos bordes, esta soldadura se extiende a lo largo del tubo o puede ser helicoidal.

Los espesores de tuberías están entre los 3 y 6,2 mm, y están normalizados por la cedula de la tubería, el espesor es independiente del diámetro de la tubería.

Las planchas de acero se usan para elaborar perfiles para las estructuras metálicas, en la siguiente tabla se describen los espesores y sus aplicaciones.

TABLA 2.3. Espesores y aplicaciones de planchas de acero

| ESPESOR (mm) | APLICACIÓN |
|--------------|---|
| 2-4,5 | Estructuras de baja resistencia, tubería soldada, piezas no críticas y que no se expongan a altos esfuerzos de puentes, construcciones y edificios. |
| 5-13 | Construcción de puentes, estructuras metálicas |

Fuente: Web www.obraweb.com

2.1.3 ENSAYOS MECÁNICOS DEL ACERO

Los ensayos mecánicos son pruebas en las que al acero se le somete a cargas externas para poder determinar valores de resistencias, verificar las propiedades y conocer su comportamiento bajo la acción de ciertas influencias. Las propiedades que se conocen con estos ensayos son la resistencia, elasticidad y plasticidad, ductilidad, tenacidad y fragilidad, etc. También se identifican la dureza superficial, la resistencia a los diferentes esfuerzos que pueda estar sometido, el grado de acabado del mecanizado o la presencia de grietas internas en el material.

Estos ensayos se realizan para conocer cuáles son las capacidades del material, porque así se logra trabajar al límite de sus posibilidades; esto influye en la selección del material y por lo tanto en el factor económico, y se trabaja con menor peso, mejor calidad y mayor rendimiento.

A estos ensayos también se los conoce como ensayos destructivos porque después de aplicarse los materiales sufren alteración en su forma y presentación inicial.

Las principales cargas externas a las que se someten los elementos mecánicos para la realización de estos ensayos son:

- Tensión: Es la carga que se aplica de forma axial a la probeta y de forma creciente, en el ensayo se llega hasta la rotura de la misma.
- Compresión: Es la fuerza que tiende a hundir a la probeta, se llega a una reducción de volumen.
- Torsión: Es una fuerza que dobla el material, es cuando este es girado hacia lados contrarios desde sus extremos.
- Flexión: Es una fuerza en la que intervienen tensión y compresión en el mismo material y al mismo tiempo.
- Corte: Es una fuerza que corta, es cuando el material es presionado por arriba y por abajo en dos partes muy cercanas.

Las principales pruebas que se realizan son: de tracción, de resiliencia, de compresión, cizallamiento, flexión, torsión, plegado, fatiga, dureza, etc. Se detallan a continuación los más usados.

2.1.2.1. Ensayo de tracción.

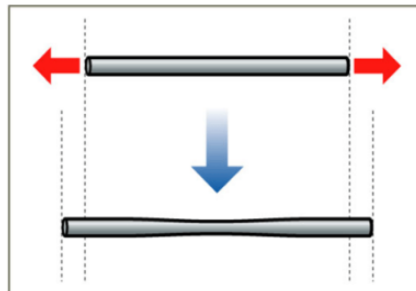


Figura 2.1. Esquema de la probeta de tracción

Este ensayo nos proporciona información sobre las propiedades principales para poder trabajar con el material. Este, consiste en que una probeta con extremos adecuados (espaldilla de apoyo), se ubica en la máquina de tracción; que posee dos mordazas una fija y una móvil, esta última se desplaza a velocidad constante; alargando paulatinamente la probeta, determinándose los esfuerzos que señala la máquina.

La probeta debe tener una sección regular o deben ser normalizadas, los extremos son de mayor sección para poder adecuar a la máquina de tracción, y debe estar marcada la longitud inicial con dos puntos referenciales.

La celda de carga unida a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, se imprime un gráfico que representa el desplazamiento y la tensión aplicada. Se muestra en la figura 2.2, los puntos más relevantes de la gráfica de este ensayo.

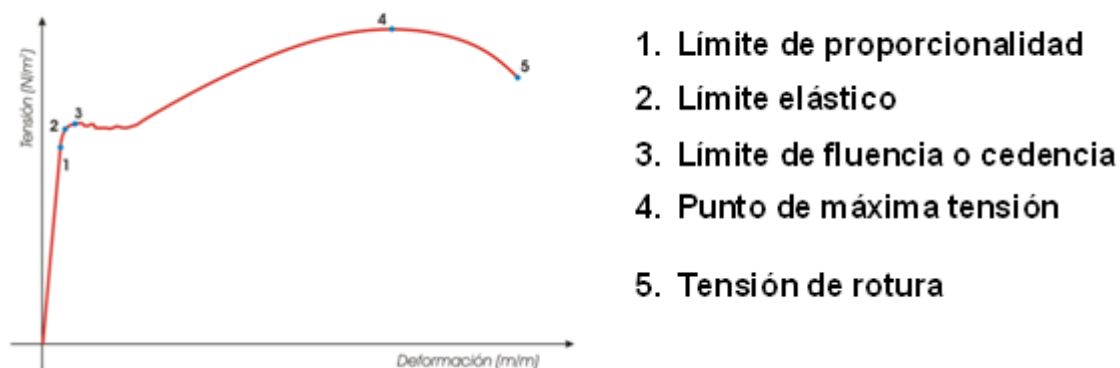


Figura 2.2. Diagrama desplazamiento – tensión aplicada ¹

En un ensayo de tracción, pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos como su módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el límite elástico, tensiones de rotura, entre otros.

2.1.2.2. Ensayo de resiliencia

Se lo conoce también como ensayo de impacto, y nos ofrece el valor de la tenacidad y por lo tanto de su ductilidad por la correlación que entre ellas existe. Este valor que se obtiene para predecir el posible comportamiento de los materiales cuando trabajan a fatiga y en consecuencia determinar los materiales adecuados.

¹ www.iesvelazquez.org, Ensayos mecánicos, Español

Para estos ensayos se necesita de probetas normalizadas, que se rompen con un golpe midiendo la energía consumida para producir la rotura. La resiliencia es un valor que caracteriza a un material sometido a determinadas condiciones de ensayo, pero que no predice su comportamiento en situación real de servicio.

2.1.2.3. Ensayo de compresión

Este ensayo se basa en el mismo principio que el ensayo de tracción, con la única diferencia que en el de tracción las deformaciones son alargamientos y en el de compresión las deformaciones son acortamientos en las piezas cortas y pandeo o flexión en los elementos largos, en pandeo fallan por aplastamientos y en el segundo fallan por flexión.

Por la fuerza que se aplica a la probeta se produce la deformación como se indica en la figura 2.3.

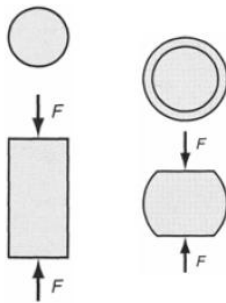


Figura. 2.3 Deformación probeta de compresión

2.1.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Este tipo de ensayos es muy usado en muchos materiales, y se lo usa particularmente en la inspección de uniones soldadas. La realización de estos ensayos no altera de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los materiales; y se basan en la aplicación de fenómenos físicos como ondas electromagnéticas, acústicas, etc.

Los ensayos no destructivos son importantes ya que ayudan a determinar la existencia de defectos en materiales, proporcionando información sobre la composición y sobre grietas, poros, inclusiones; y en lo que se refiere a soldadura

son aun mas importantes, ya que estos defectos pueden ser la causa de que se produzcan fallas catastróficas que pueden representar grandes pérdidas en dinero, seres humanos y daños al medio ambiente.

Tienen algunas aplicaciones por ejemplo: en la industria automotriz para algunas partes de motores y el chasis; en la aviación y la industria aeroespacial; en construcción, en estructuras y puentes; en petroquímica para transporte de tuberías o tanques de almacenamiento; etc.

Unos ejemplos de estos ensayos son: inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, pruebas radiográficas, pruebas electromagnéticas, pruebas de fuga, emisión acústica, pruebas infrarrojas, etc. A continuación se explican algunas de estas pruebas que son las más usadas y las más fiables.

2.1.4.1 Tintas penetrantes.

Esta prueba se basa en la capilaridad, consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar. Después de un tiempo considerable, se realiza una limpieza del exceso del líquido, y a continuación se aplica un líquido absorbente que se llama revelador, que es de color diferente al primero, el que absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

Por lo tanto en las áreas que se observe la presencia del líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales.

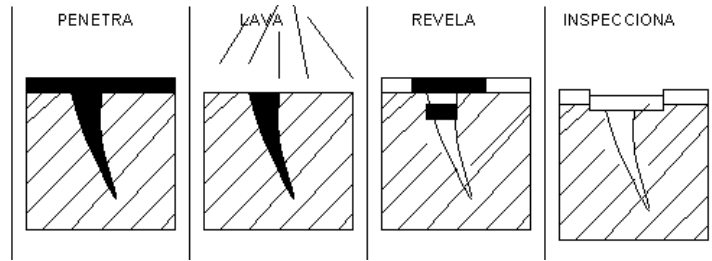


Figura 2.4 Esquema del ensayo de tintas penetrantes.

2.1.4.2 Ultrasonido

Este ensayo se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. Para esta prueba se utiliza un sensor ubicado en la superficie del material, este convierte los pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las que generan sonido, con frecuencias inaudibles para el ser humano.

Este sonido o las vibraciones, se propagan a través del material hasta que pierden su intensidad o hasta que choca con una interfase, es decir un material diferente al del análisis como por ejemplo aire o agua, y por lo tanto las ondas sufren reflexión, refracción, distorsión, etc., lo que se traduce como un cambio de intensidad, dirección, y ángulo de propagación de las ondas originales.

Con estas pruebas se puede determinar características internas de los materiales, pero por la complejidad se necesita personal calificado para la aplicación e interpretación de los resultados, y permite establecer algunas características de los materiales como: velocidad de propagación de las ondas, tamaño de grano en metales, presencia de discontinuidades, inspección de soldaduras, medición de espesores de pared, etc.

2.1.4.3 Pruebas radiográficas

Esta prueba se basa en la capacidad de penetración de los rayos X y los rayos gama. Estos rayos ayudan a determinar si el material presenta cambios internos que retengan la radiación, por lo tanto se visualiza con facilidad las irregularidades

internas, solo con medir la radiación incidente contra la radiación retenida o liberada por el material.

Las principales aplicaciones de esta prueba son en: medicina, evaluaciones de soldaduras, control de calidad de diferentes productos, etc.

El costo de adquisición y manutención del equipo para esta prueba radiográfica, se convierte en una desventaja limitante para su selección. También para la aplicación de este ensayo se necesita materiales radioactivos y por lo tanto se debe contar con el permiso autorizado para su uso, y no hay que dejar de lado las medidas de seguridad para mantener la integridad y salud del personal que trabaja en este ensayo.

2.2 SOLDADURA

Introducción

La soldadura es un proceso por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a las de las piezas que se han de soldar.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles.

2.2.1 MATERIALES DE APORTE

Los procesos de soldadura pueden realizarse con la aportación de otro material o sin él, esto depende principalmente del tipo de proceso por ejemplo; la soldadura por presión no usa ningún tipo de material adicional y se la realiza mediante la aplicación de presión y normalmente ayudada con calor; y la soldadura por fusión, realizada mediante la aplicación de calor a las superficies, que se funden en la zona de contacto, con o sin aportación de otro metal.

Existe una clasificación de los tipos de soldadura por la utilización de materiales de aportación, las cuales son soldadura aleación y soldadura autógena. La soldadura autógena se realiza sin añadir ningún material y la soldadura de aleación se lleva a cabo añadiendo un metal de aportación. Además existe otra clasificación de la soldadura que depende de la temperatura de fusión del metal de aportación empleado que son soldadura blanda y soldadura fuerte, la soldadura blanda utiliza metales de aportación cuyo punto de fusión es inferior a los 450 °C, y la fuerte metales con temperaturas superiores.

La selección de los materiales de aporte para la soldadura depende mucho de su aplicación y el del tipo de material base entre otros.

2.2.1.1 Metales de aporte

Los metales de aporte que se presentan a continuación se clasifican de acuerdo con las especificaciones que han desarrollado la sociedad americana de soldadura (AWS); y son los siguientes:

- Electrodo para soldadura de arco, de acero blando recubierto A5.1
- Varillas de soldadura de hierro y acero para soldar a gas A5.2
- Electrodo de aluminio y aleaciones de aluminio para la soldadura de arco: A5.3
- Electrodo de acero al cromo y al cromo níquel, resistentes a la corrosión y recubiertos: A5.4
- Electrodo para soldadura de arco, de acero con bajo contenido de aleación, recubiertos: A5.5
- Electrodo de cobre y aleaciones de cobre para soldadura de arco: A5.6
- Electrodo de cobre y aleaciones de cobre para soldar: A5.7
- Metal de aporte para soldadura fuerte: A5.8
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de acero al cromo y cromo níquel, resistentes a la corrosión: A5.9
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aluminio, y aleaciones de aluminio: A5.10

- Electrodo de soldadura de níquel y aleaciones de níquel, recubiertos: A5.11
- Varillas de soldadura y electrodos para recubrimientos superficiales A5.13
- Varillas desnudas de soldadura y electrodos desnudos de níquel y aleaciones de níquel: A5.14
- Varillas de soldadura y electrodos recubiertos para soldar hierro fundido: A5.15
- Varillas desnudas de soldadura y electrodos desnudos de titanio y aleaciones de titanio: A5.16
- Electrodo desnudo de acero blando, y fundente para soldadura de arco sumergido: A5.17
- Electrodo de acero blando para soldadura de arco metálico con gas A5.18
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aleaciones de magnesio: A5.19
- Electrodo de acero blando para soldadura de arco, con núcleo de fundente: A5.20
- Varillas de soldadura y electrodos compuestos para recubrimientos superficiales: A5.21

Mediante las especificaciones de los metales de aporte, se puede conocer si cierto electrodo o varilla de soldadura puede producir un metal de soldadura de propiedades mecánicas específicas.²

2.2.1.2 Gases de protección y gases combustibles

El propósito principal de un gas de protección es el proteger el metal fundido contra la contaminación de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, gases que existen en el aire, que en tanto el propósito primario de un gas combustible es crear una temperatura de combustión suficiente para fundir el metal que ha de soldarse.

1) Gases de protección: Son materiales consumibles que se utilizan en el proceso de soldadura con arco de tungsteno- gas y soldadura de arco metálico- gas. Se podrían utilizar cualquiera de los gases inertes pero los únicos gases de

² HORWITZ, H. Soldadura, Aplicaciones y Práctica, Alfaomega, pp 50-51

los que se puede disponer en volumen suficiente para usos prácticos de la soldadura son el helio y el argón. Estos gases dan resultados satisfactorios de protección para los metales más reactivos, tales como aluminio, el magnesio, el titanio y zirconio.

Los gases inertes puros pueden proteger al metal a cualquier temperatura pero no son adecuados para todas las aplicaciones de soldadura debido a la reacción de los gases con los elementos de la atmosfera.

- Gases de protección para soldadura con arco de tungsteno y gas (TIG): Comúnmente se emplea argón, helio o una mezcla de los dos.
- Gases de protección para soldadura con arco metálico y gas (MIG): Los gases que se usan más comúnmente para la soldadura de arco metálico y gas se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2.4. Selección del gas de protección para soldadura de arco metálico con gas

| TRANSFERENCIA DEL METAL POR ARCO DE ROCIO | | | | | | | |
|---|-------|-------|----------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------|
| Metal | Argón | Helio | Argón-oxígeno | $\frac{1}{2}Ar - CO_2$ | Mezclas de gases argón-helio | $^2Ar-O_2CO_2$ | 3CO_2 |
| Aluminio | X | X | | | X (90% He-10%Ar) o (He-75) | | |
| Aceros al carbono | | | X ($O_2 - 5$) | X (C-25) | | X (6% CO_2) (5% CO_2) | X |
| Aceros con bajo contenido de aleación | | | X ($O_2 - 2$) | | | | |
| Cobre | X | X | X ($O_2 - 1$) | | X (90% He-10%Ar) o (He-75) | | |
| Aceros inoxidables | | | X ($O_2 - 1$) ($O_2 - 2$) | | | | |
| Aleaciones de níquel | X | X | | | X (He-75) | | |
| Metales reactivos | X | X | | | | | |

Tabla 2.4. Selección del gas de protección para soldadura de arco metálico con gas (continuación)

| TRANSFERENCIA DE METAL POR CORTO CIRCUITO | | | | | | |
|--|-------|-------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Metal | Argón | Helio | Mezclas Argón-helio | Mezclas de Argón CO_2 | Mezclas de Argón-helio CO_2 | CO_2 |
| Aluminio | X | X | X (He-75) | | | |
| Aceros al carbono | | | | X (C-25) O (C-50) | | X Se Requiere Alambre Diseñado Para CO_2 |
| Aceros de alta resistencia | | | | | X (A-415) | |
| Cobre | | | X (He-75) | | | |
| Aceros inoxidables | | | | X (C-25) | X (A-1025) | |
| Aleaciones de níquel | X | | X (90% He-10%Ar) o (He-75) | | X (A-1025) | |
| Metales reactivos | X | X | X (He-75) | | | |
| 1 Adecuada para trabajar con corriente >300 A y arco de rocío 2 Se obtiene mejor calidad en plancha pesada de molino cuando se usa con alambres Linde 83 y 85 3 Se emplea con alambre con núcleo de fundente y para soldadura de alta velocidad con alambre sólido Origen: Reproducida con autorización de <i>How to do Manual Metal Inert Gas welding F-51-110-A 5/71, Union Carbide corporation, Division Linde</i> | | | | | | |

Fuente: Soldadura, Aplicaciones y Practica, Henry Horwitz, Pág. 97.

2) Gases combustibles: Tienen una propiedad en común; todos requieren de oxígeno para su combustión. Para lograr una buena combustión y ser útil para la soldadura debe tener las siguientes características: a) Temperatura de alta llama, b) alto régimen de propagación de la llama, c) contenido de calor adecuado y d) la mínima reacción química de la llama con el metal base y el metal de aporte.

El acetileno y el hidrógeno son los gases combustibles que pueden obtenerse comercialmente entre los que tienen propiedades deseadas.

El gas combustible de mayor uso es el acetileno, este gas es un compuesto de carbono e hidrógeno (C₂H₂) que contiene el 92,3% de hidrógeno por peso. Es incoloro, más ligero que el aire y tiene un olor dulce; es un compuesto altamente combustible que libera calor al descomponerse. Contiene un mayor porcentaje de carbono que cualquiera de los demás hidrocarburos que existen en gran número. El acetileno da a la mezcla oxiacetilénica una llama más caliente que la de cualquiera de los gases comerciales.

La sociedad americana de la soldadura (AWS) ha desarrollado una serie de especificaciones para los elementos de aporte. El AWS A5.32 es la especificación para gases de protección para soldadura; establece los requisitos para la clasificación de los gases e identifica claramente la composición química de estos de forma similar a un alambre de soldadura, como por ejemplo un gas de protección SG-AC-10, contiene 10% de dióxido de carbono, el 90% de argón. Además en esta se especifica los niveles de pureza y punto de rocío requeridos por los gases como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.5. Tipo de gas, pureza y punto de rocío para los componentes del gas

| Gas type, purity, and dew point requirements for shielding gas components | | | | | | | | |
|---|--------------------|---------------|---------------------|-------------------------------------|--|-----|-----------|----------------|
| Gas | AWS Classification | Product State | Minimum Purity (%) | Maximum Moisture ^a (ppm) | Dew Point maximum Moisture at 1 Atmosphere | | CGA Class | |
| | | | | | °F | °C | | |
| Argon | SG-A | Gas | 99,997 | 10,5 | -76 | -60 | Type I | G-11.1 Grade C |
| | | Liquid | 99,997 | 10,5 | -76 | -60 | Type II | G-11.1 Grade C |
| Carbon Dioxide | SG-C | Gas | 99,8 | 32 | -60 | -51 | | G-6.2 Grade H |
| | | Liquid | 99,8 | 32 | -60 | -51 | | G-6.2 Grade H |
| Helium | SG-He | Gas | 99,995 | 15 | -71 | -57 | Type I | G9.1 Grade L |
| | | Liquid | 99,995 ^b | 15 | -71 | -57 | Type II | G9.1 Grade L |

Tabla 2.5. Tipo de gas, pureza y punto de rocío para los componentes del gas (continuación)

| | | | | | | | | |
|----------|------|--------|---------|-----|-----|-----|---------|----------------|
| Hydrogen | SG-H | Gas | 99,95 | 32 | -60 | -51 | Type I | G-5.3 Grade B |
| | | Liquid | 99,995 | 32 | -60 | -51 | Type II | G-5.3 Grade A |
| Nitrogen | SG-N | Gas | 99,9 | 32 | -60 | -51 | Type I | G-10.1 Grade F |
| | | Liquid | 99,998c | 4 | -90 | -68 | Type II | G-10.1 Grade L |
| Oxygen | SG-O | Gas | 99,5 | N/A | -54 | -48 | Type I | G-4.3 Grade B |
| | | Liquid | 99,5 | N/A | -82 | -63 | Type II | G-4.3 Grade B |

Notes:

- a. Moisture specifications are guaranteed at full cylinder pressure, at which the cylinder is analyzed
- b. Including Neon
- c. Including Helium

Fuente Código AWS D1.1

El código AWS D1.1 establece un procedimiento de registro de calificación (PQR), y con respecto a los gases de protección menciona que este requiere recalificación cuando exista algún cambio en el gas de soldadura a otro gas simple o mezcla de gases, o a uno de especificación nominal en la composición porcentual de la mezcla de gases, por lo tanto, es esencial que la composición del gas de soldadura sea precisa y coherente para garantizar que los WPS se están siguiendo y por lo tanto se mantiene la calidad de la soldadura.

2.2.1.3 Selección del material de aporte para la soldadura

En la selección del material de aporte se considerará:

- Los materiales base: Donde se contempla, sus temperaturas de fusión, el correcto mojado de los mismos y la posibilidad de que se produzca corrosión o compuestos inter-metálicos que reduzcan las propiedades mecánicas de la unión.

- Tipo de soldadura: Que afectará principalmente a la forma del material de aporte, lamina, pasta etc.
- La compatibilidad de los materiales base y de aporte y las propiedades finales de la junta soldada.

El punto más importante cuando se elige el metal de aporte, debe consistir en que la calidad del material depositado (características) debe resultar igual o mejor que las del material base y en los casos que requieran, debe ser aprobado por institutos calificados reconocidos para el material correspondiente.³

2.2.1.4 Electrodo para soldadura de arco

El material de aportación que se usa en el proceso de soldadura de arco se conoce como electrodo y consiste en una varilla metálica, generalmente de acero, recubierta de un revestimiento concéntrico.

Existe una amplia gama de electrodos para la calidad de acero, entre los cuales se pueden elegir lo que sean similares, dependiendo de la composición del metal depositado. Se diferencian entre sí por el tipo de revestimiento, características y velocidad de soldeo y calidad del metal depositado. Esto hace posible elegir el electrodo que brinde la soldadura más correcta, al costo más bajo en cada oportunidad.

1) Composición del revestimiento: La composición de los revestimientos suele ser muy compleja. Se trata generalmente de una serie de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- Óxidos naturales: óxidos de hierro, ilemita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepasto.
- Productos volátiles: celulosa, serrín.
- Fundentes
- Productos químicos: carbonatos, óxidos.

³ MASSIMO, P. Soldadura eléctrica y manual, Noriega, p 84

- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti.
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico.

2) Funciones del revestimiento.

a) Eléctrica: Permite el cebado de arco; las sustancias que se descomponen produciendo gases fácilmente dissociables exigen tensiones de cebado de arco más elevadas, debido al calor absorbido en la disociación. Con corriente alterna, se necesitan tensiones de cebado más altas. Los silicatos, carbonatos, óxidos de Fe, óxidos de Ti, favorecen el cebado y el mantenimiento del arco. Otra función del revestimiento es estabilizar el arco, la cual depende del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo. Para un arco en corriente alterna es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se añaden al revestimiento, entre otras sustancias, sales de sodio y de potasio.

b) Física: Evita que el metal fundido entre en contacto con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire, ya sea por la formación de un gas protector alrededor del camino que han de seguir las gotas del metal fundido y después, mediante la formación de una abundante escoria que flota por encima del baño de fusión. El revestimiento debe ser versátil y permitir generalmente la soldadura en todas las posiciones.

c) Metalúrgica: El revestimiento dispone de elementos que se disuelven en el metal fundido con objeto de mejorar las características mecánicas del metal depositado.

La escoria reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura por su efecto aislante; reduce el número de inclusiones en la soldadura al eliminar un gran número de impurezas; produce en el baño una verdadera micro metalurgia, desoxidando, desnitrurando, desfosforando y desulfurando el metal fundido

2.2.1.4.1 Nomenclatura de los electrodos para soldadura de arco

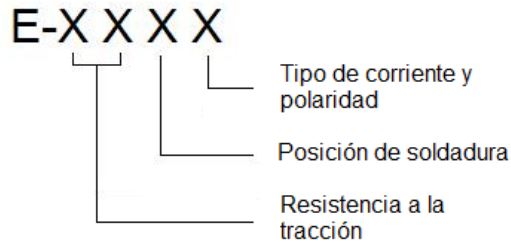


Figura 2.5. Nomenclatura de los electrodos para soldadura de arco

El prefijo “E” significa “electrodo” y se refiere a la soldadura por arco.

Resistencia a la tracción: Para los electrodos de acero dulce y los aceros de baja aleación, las dos primeras cifras de un número de cuatro cifras, o las tres primeras cifras de un número de cinco cifras indican la resistencia a la tracción en Ksi.

Posiciones para soldar: La penúltima cifra indica la posición en la que se debe soldar para optimizar la operación del electrodo.

- 1: Todas las posiciones.
- 2: Posición horizontal o plana
- 3: Posición plana solamente.

Tipo de corriente y polaridad: Interpretación del último dígito de la numeración del electrodo.

0: Alta Penetración: Para soldar únicamente con C.C en corriente invertida (celulosa y sodio)

1: Alta penetración: Para soldar en C.A, -C.C polaridad invertida (celulosa y potasio).

2: Mediana penetración: Para soldar en C.A, -C.C polaridad directa y polaridad invertida (titanio y sodio).

3: Ligera penetración: Acabado terso para aplicarse con C.A, -C.C polaridad directa y polaridad invertida (titanio y sodio).

4: Penetración mediana: (polvo de hierro y titanio).Polaridad directa o invertida.

5: Bajo hidrógeno y sodio: Para soldar en C.C polaridad invertida.

6: Bajo hidrógeno y potasio: Para soldar en C.A. –C.C. polaridad invertida.

7: Bajo hidrógeno, polvo de hierro, óxido de hierro: Para soldar en C.C polaridad directa.

8: Bajo hidrógeno y polvo de hierro: Para soldar en C.C polaridad invertida o con C.A. ⁴

2.2.1.4.2 Descripción y propósito del electrodo E6011 (de acero al carbono)

Los electrodos que pertenecen a este grupo, se distinguen por la alta penetración que es producida por la alta potencia del arco, debido al alto contenido de celulosa en el revestimiento (aproximadamente el 35% de su peso). Otra característica especial, es que durante la fusión producen un ruido parecido a un fuerte soplido, que se distinguen claramente entre todos los demás electrodos. Este soplido se produce durante la influencia del arco eléctrico que descompone la celulosa en gas carbónico (CO) y vapor de agua (H₂O).

Los electrodos que pertenecen a este grupo son fabricados para ser usados como transformadores (corriente alterna), sin embargo, se pueden usar también con corriente continua o directa, conectando el porta electrodo al polo positivo (polaridad invertida), y obtener así las mismas características mecánicas de los electrodos E6010. El elemento primario para el revestimiento de los electrodos E6011, es de alta celulosa. Los elementos secundarios son el dióxido de titanio, disoxidantes metálicos tal como el hierro de manganeso y otros como el magnesio, silicato de aluminio y además tienen pequeñas cantidades de calcio y potasio, y viene llamado de alta celulosa y potasio. ⁵

Características

- Resistencia a la tracción: 60,000 lb/plg² (42,2 kg/mm²)
- Posición de soldeo: Todas las posiciones
- Para soldar en C.A, -C.C polaridad invertida

⁴ MASSIMO, P. Soldadura eléctrica y manual, Noriega, p 74

⁵ MASSIMO, P. Soldadura eléctrica y manual, Noriega, pp 87-88

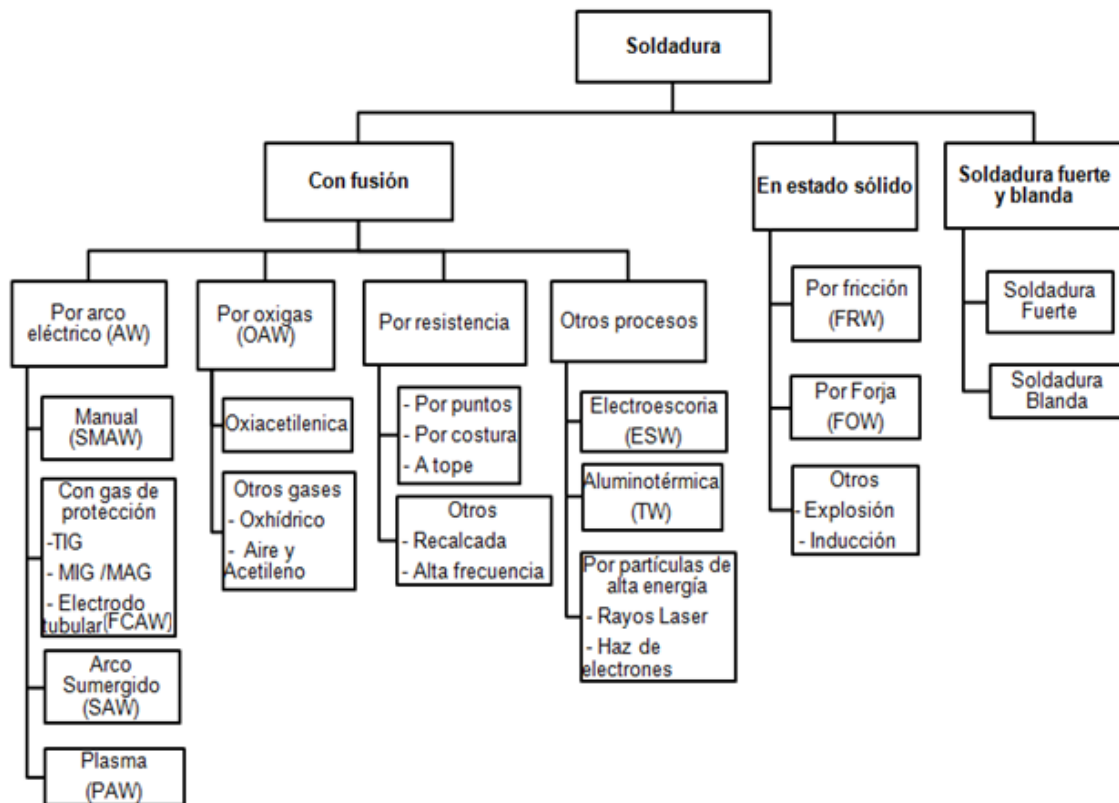


Figura 2.6 Electrodo E6011

2.2.2 TIPOS DE SOLDADURA

Clasificación de los procesos de soldadura

Se pueden distinguir los siguientes tipos de soldadura, con sus respectivos subgrupos, como se muestra en el siguiente cuadro:



Cuadro 2.1 Clasificación de la soldadura

2.2.2.1 Soldadura con fusión

a) **Soldadura por arco eléctrico:** Este proceso obtiene su energía por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma entre la pieza y un electrodo. El electrodo también sirve de metal de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, para que así pueda ser depositado entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso puede llegar hasta los 5,000°C. La corriente que se utiliza en el proceso puede ser directa o alterna, en la mayoría de las veces se emplea directa, debido a la energía es más constante con lo que se puede generar un arco estable. Las máquinas para corriente directa se construyen con capacidades hasta de 1,000 A, con corrientes de 40 a 95 V.

- **Soldadura con gas de protección:** Este procedimiento aísla el arco y el metal fundido de la atmósfera, mediante un gas inerte (helio, argón, hidrógeno, anhídrido carbónico, etc.). Existen varios procedimientos:
- **TIG:** Se utiliza un electrodo de Wolframio o tungsteno que no se consume, el metal de aportación es una varilla sin revestimiento de composición similar a la del metal base.
- **MIG / MAG:** Utiliza el hilo de alambre continuo y sin revestimiento que se hace llegar a la pistola junto con el gas. Según sea el gas así recibe el nombre, (MIG: Metal Inert Gas) o MAG si utiliza anhídrido carbónico que es más barato.

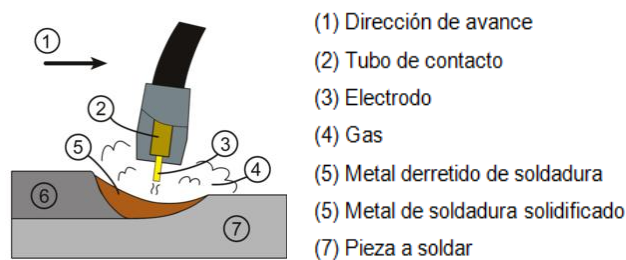


Figura 2.7 Elementos del proceso de soldadura GMAW

- **Soldadura de arco sumergido:** Utiliza un electrodo metálico continuo y desnudo. El arco se produce entre el alambre y la pieza bajo una capa de fundente granulada que se va depositando delante del arco.

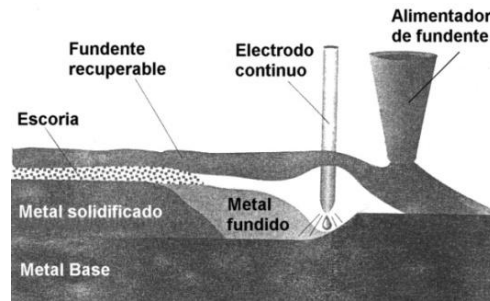


Figura 2.8 Proceso de soldadura de arco sumergido

b) Soldadura por oxigas: Este proceso incluye a todas las soldaduras que emplean un gas combustible para generar la energía que es necesaria para fundir el material de aporte. Los combustibles más utilizados son el metano, acetileno y el hidrógeno, los que al combinarse con el oxígeno como comburente generan las soldaduras oxiacetilénica (autógena), oxhídrica.

- **Soldadura oxhídrica:** Es producto de la combinación del oxígeno y el hidrógeno en un soplete. El hidrógeno se obtiene de la electrólisis del agua y la temperatura que se genera en este proceso es entre 1500 y 2000°C.



Figura 2.9 Equipo de soldadura oxhídrica

- **Soldadura Oxiacetilénica:** Esta soldadura se logra al combinar al acetileno y al oxígeno en un soplete. Se conoce como autógena porque con la combinación del combustible y el comburente se tiene autonomía para ser manejada en diferentes medios. En los sopletes de la soldadura autógena se pueden obtener tres tipos de flama las que son reductora, neutral y oxidante. De las tres la neutral es la de mayor aplicación.

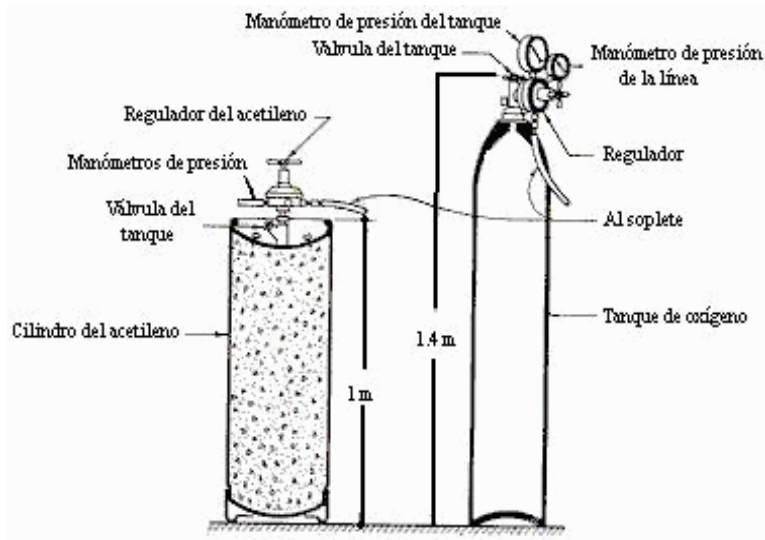


Figura 2.10 Cilindros y reguladores para soldadura oxiacetilénica

c) Soldadura por resistencia: Este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir, como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en sus cuerpos se generará el aumento de temperatura, aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La soldadura por resistencia es aplicable a casi todos los metales, excepto el estaño, zinc y plomo. Existen varios tipos de soldadura por resistencia como: por puntos, por resaltes, por costura, a tope

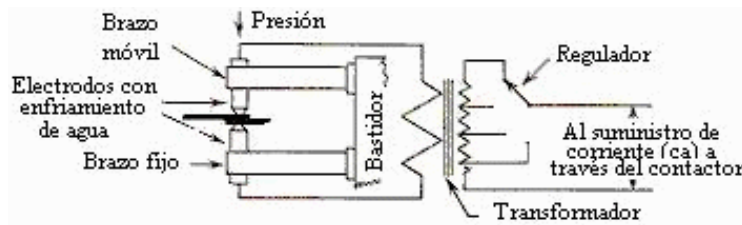


Figura 2.11. Diagrama de una máquina soldadora por puntos

d) Otros procesos

Soldadura aluminotérmica: Este proceso utiliza como fuente de calor para fundir los bordes de las piezas a unir un hierro líquido y sobrecalentado que se obtiene de la reacción química se produce entre el óxido de hierro y el aluminio de la cual se obtiene la alúmina, hierro y una muy alta temperatura, al mismo tiempo el hierro líquido cumple la función de metal de aportación el

La alúmina forma una escoria en la parte superior de la unión evitando la oxidación. Para efectuar la soldadura se realiza un molde de arena alrededor de la zona de soldadura y se vierte el metal fundido en él



Figura 2.12 Proceso de soldadura aluminotérmica en una línea férrea

2.2.2.2 Soldadura en estado sólido

a) Soldadura por fricción: En este proceso la unión se logra por el calor que se genera al girar una de las piezas a unir en contra de la otra que se encuentra fija, una vez alcanzada la temperatura adecuada se ejerce presión en las dos piezas y con ello quedan unidas.

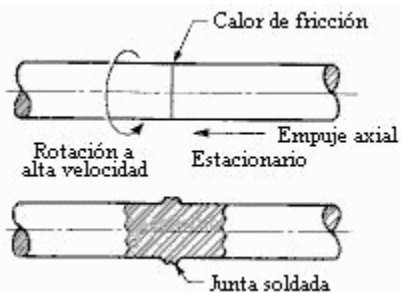


Figura 2.13 Ilustración de un proceso que emplea calor generado por fricción para producir una soldadura

b) Soldadura por explosión: Esta soldadura también se llama de recubrimiento consiste en la unión de dos piezas metálicas, por la fuerza que genera el impacto y presión de una explosión sobre las proximidades a las piezas a unir.



Figura 2.14 Ilustración de un proceso de soldadura por explosión

2.2.2.3 Soldadura fuerte y blanda

a) Soldadura fuerte: En esta soldadura se aplica también metal de aporte en estado líquido, pero este metal, por lo regular no ferroso, tiene su punto de fusión superior a los 430 °C y menor que la temperatura de fusión del metal base. Por lo regular se requiere de fundentes especiales para remover los óxidos de las superficies a unir y aumentar la fluidez al metal de aporte. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata. Este tipo de soldadura se lleva a cabo cuando se exige una resistencia considerable en la unión de dos piezas metálicas, o bien se trata de obtener uniones que hayan de resistir esfuerzos muy elevados o temperaturas excesivas. Se admite que, por lo general, una soldadura fuerte es más resistente que el mismo metal que une.



Figura 2.15 Proceso de soldadura fuerte en tuberías

b) Soldadura blanda: Esta soldadura se realiza a temperaturas por debajo de los 400 °C. El material metálico de aportación más empleado es una aleación de estaño y plomo, que funde a 230 °C aproximadamente.

En muchas ocasiones, el material de aportación se presenta en forma de hilo enrollado en un carrete. En este caso, el interior del hilo es hueco y va relleno con la resma antioxidante, lo que hace innecesario recubrir la superficie.

Aunque la soldadura blanda es muy fácil de realizar, presenta el inconveniente de que su resistencia mecánica es menor que la de los metales soldados; además, da lugar a fenómenos de corrosión.

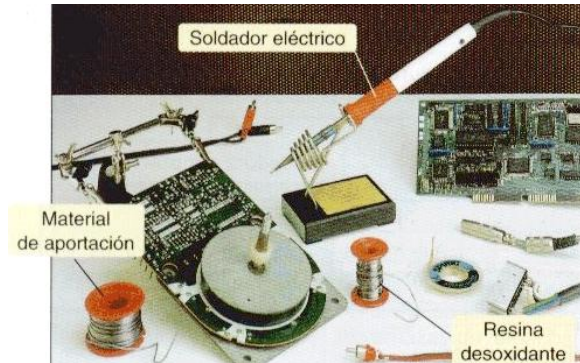


Figura 2.16 Elementos de la soldadura blanda

2.2.2.4 Soldadura SMAW (Shield Metal Arc Welding)

En este proceso de soldadura de arco, se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base. Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido. Como son los propios electrodos los que aportan el flujo de metal fundido, será necesario reponerlos cuando se desgasten. Los electrodos están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento.

La composición y clasificación de cada tipo de electrodo está regulada por AWS (*American Welding Society*), organismo de referencia mundial en el ámbito de la soldadura, como ya se menciono anteriormente.

Este tipo de soldaduras pueden ser efectuados bajo corriente tanto continua como alterna. En corriente continua el arco es más estable y fácil de encender y las

salpicaduras son poco frecuentes; en cambio, el método es poco eficaz con soldaduras de piezas gruesas. La corriente alterna posibilita el uso de electrodos de mayor diámetro, con lo que el rendimiento a mayor escala también aumenta

El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo precio. La sencillez del procedimiento lo hace muy práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un porta electrodo y electrodos. El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción. Además, la soldadura SMAW es muy versátil. Su campo de aplicaciones es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo.

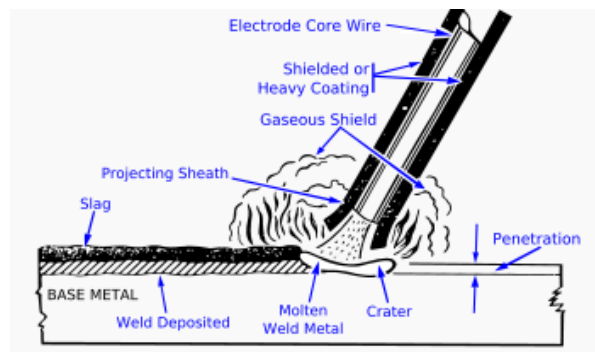


Figura 2.17 Diagrama de una máquina soldadora a tope

2.2.3 DEFECTOS EN LA SOLDADURA

2.2.3.1 Cordones defectuosos



Figura 2.18 Cordón defectuoso

Este tipo de defecto se produce por varios factores como, la forma en que el soldador conduce el electrodo, el incorrecto ajuste de la corriente para el diámetro empleado.

En los catálogos de electrodos está indicado el amperaje máximo que de ninguna manera debe excederse. Los amperajes normales son inferiores a estos valores en aproximadamente 20%.

2.2.3.2 Entalladuras de penetración

Son ocasionadas por incorrecta conducción del electrodo o por un amperaje demasiado elevado. Deben evitarse de todas maneras, ya que debilitan cualquier unión soldada.

2.2.3.3 Consumo diagonal de los electrodos

Se produce en caso de corriente continua, por efecto del soplo del arco. Para remediar este defecto se puede conectar un segundo cable de tierra entre la fuente de poder y la pieza de trabajo, teniendo en este caso que aplicar los dos cables en puntos lo más alejados en la pieza base.

2.2.3.4 Porosidad en el cordón

Puede tener origen muy diferente:

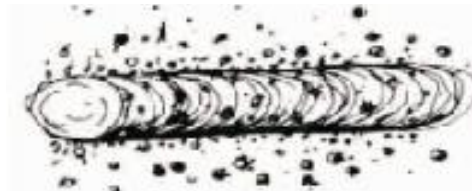


Figura 2.19 Porosidad en el cordón

a) Poros en los primeros centímetros de la costura: Son frecuentemente producidos por electrodos húmedos que debido al calentamiento del electrodo durante la operación del soldeo, la humedad en el revestimiento se vaporiza, produciéndose la formación de poros. Los electrodos básicos tienen tendencia a la formación de poros iniciales, en caso de soldar con arco demasiado largo. También pueden presentarse poros al haber contacto con un electrodo de revestimiento básico en una base completamente fría. Es bastante fácil evitarlo.

El soldador debe encender el electrodo aproximadamente 1 cm. detrás del cráter final del cordón anterior, esperando hasta que adquiera buena fluidez para

avanzar sobre el cráter final y continuar el cordón. Otra alternativa consiste en demorar un poco sobre el punto de partida, antes de iniciar el avance del electrodo.

b) Poros al final del cordón: Se presentan, cuando se suelda el electrodo con sobrecarga de corriente, calentándose por esta razón hasta la temperatura de ebullición del alambre. Puede evitarse reduciendo el amperaje.

c) Poros que se presentan en forma regular sobre toda la longitud del cordón: La causa reside generalmente en el material base. Por ejemplo, aceros con alto contenido de azufre o fósforos no pueden soldarse libres de poros cuando se usan electrodos con revestimiento ácido. En muchos casos el remedio es usar electrodos básicos.

d) Nidos de poros no visibles en la superficie: Se deben, por lo general, a un manejo incorrecto del electrodo. Por una oscilación demasiado pronunciada o una separación excesiva entre los bordes de las planchas a soldar, el metal de aporte se solidifica por acceso del aire e insuficiente protección de la escoria, volviéndose poroso.

2.2.3.5 Rajaduras en el cordón



Figura 2.20 Rajaduras en el cordón

Estas rajaduras pueden ser ocasionadas casi siempre por los siguientes motivos:

a) Sobrepasar el límite de resistencia de la costura: Debido a esfuerzos en la pieza de trabajo, lo que ocurre con especial frecuencia en objetos de forma complicada fuertemente estriados y con paredes de gran espesor. Cambiando la secuencia de soldadura o mediante cambios de construcción puede evitarse tales defectos.

b) Inadecuada selección del electrodo: Todos los aceros con más de 0,25% de C (Resistencia algo mayor que 52Kg/mm²) pueden soldarse garantizadamente solo con electrodos básicos.

Electrodos con revestimiento ácido producen en estos materiales rajaduras. Los aceros con más de 0,6% de carbono son soldables solo con cierta reserva, es decir habrá que usar electrodos especiales. Igualmente se requiere gran cuidado en el caso de piezas de fundición de acero.

c) Empleo inadecuado de electrodos con revestimiento ácido: Este tipo de electrodos no deben emplearse para el cordón de raíz en soldaduras de capas múltiples y tampoco en trabajos de apuntalado. Igualmente, pueden ocasionar fisuración del cordón los aceros con contenido de azufre o fósforo.


2.2.4 TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS

Cada unión se diferencia de la otra por el ángulo o por el tipo de bisel que la compone, y en secuencia la soldadura se depositara según las exigencias que imponga la preparación de la costura y el tipo del material base.

Normalmente en la preparación de una junta el tipo de la misma se relaciona con el espesor del material que se va a unir y con las características de trabajo de la pieza en construcción.

Los tipos de juntas dependen de factores como el tamaño y forma de los miembros que forman la junta, el tipo de carga, la cantidad de área en la junta disponible para soldar y el costo relativo de varios tipos de soldaduras. Existen cinco tipos básicos de juntas soldadas, aunque en la práctica se consiguen muchas variaciones y combinaciones.

A continuación se muestran los distintos tipos de juntas, en la figura 2.21.

| | |
|------------------|--|
| 1) Juntas a tope |  |
|------------------|--|

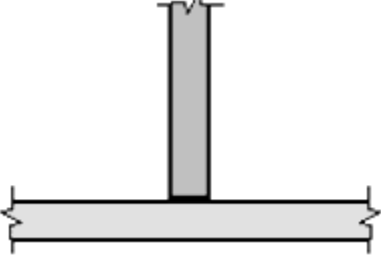

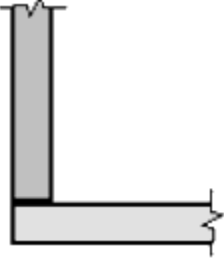

| | |
|------------------------------|--|
| 2) Junta en T |  |
| 3) Junta en Traslape |  |
| 4) Junta de Esquina |  |
| 5) Junta de reborde u orilla |  |

Figura 2.21 Tipos de juntas soldadas

2.3 NORMAS

Las normas son documentos que rigen y regulan actividades industriales. Estos documentos establecen lineamientos para las actividades relacionadas con la industria, y tienen el propósito de asegurar que solo se tendrá soldaduras seguras y confiables, además eliminar los peligros a los que están expuestos los operadores.

Estas normas tienen especificaciones, códigos, métodos, definiciones, símbolos gráficos, etc., que han sido aprobados por un comité patrocinador de una sociedad técnica.

Estos comités tienen miembros especialistas en sus campos, preparan borradores o versiones preliminares de las normas, los que serán revisados por grupos más amplios para su aprobación.

El cumplimiento de las normas es obligatorio cuando están incluidas en los contratos o documentos de compra. Caso contrario estas normas se convierten en opcionales. Pero al cumplirse se garantiza que el trabajo sea de buena calidad.

2.3.1 DESCRIPCIÓN DE NORMAS API, AWS, ASME

2.3.1.1 API (American Petroleum Institute)

El instituto Americano de Petróleo, explica en sus normas todo lo referente con la industria del petróleo, se explica el diseño y uso adecuado de las tuberías para el transporte del petróleo, gases, vapores, con los materiales y sus tratamientos térmicos.

Esta norma contiene manuales, materiales para entrenamiento, normas, especificaciones, datos técnicos, información sobre equipos y materiales, producción en aguas profundas, perforaciones, transportación, nomenclatura, válvulas, efectos ambientales, etc.

2.3.1.2 AWS (American Welding Society)

La Asociación Americana de soldadura, en esta norma se explica los procedimientos, evaluaciones y técnicas de soldadura.

Son estándares, códigos, prácticas recomendadas y guías relacionadas con la construcción de elementos soldados, aportes para soldadura y procedimientos de soldadura. Para cada situación existirá un documento aplicable, con el cual el producto fabricado debe tener conformidad.

Estas normas se convierten en una guía para el usuario, quedando en completa responsabilidad las consecuencias del trabajo, en las manos del ingeniero encargado. Las decisiones que se basan en el código son de exclusivo criterio del profesional.

2.3.1.3 ASME (American Society of Mechanical Engineers)

La Sociedad Americana de ingenieros mecánicos explica las especificaciones de la ingeniería industrial, y mecánica. Tiene un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos. También tiene normas que se refieren a calderas y recipientes a presión.

Esta norma contiene:

- Criterios de diseño de cada sección
- Códigos y especificaciones relacionadas
- Bases de diseño de elementos (esfuerzos considerados, efectos de la temperatura, tipos de tensiones)
- Materiales (definición, tipos, especificaciones, propiedades de los aceros para uso en calderas y plantas industriales)
- Diseño a presión (recipientes de pared delgada y gruesa, categorías y eficiencia de las juntas, tipos de fondos, diseño de juntas soldadas)
- Efectos de las aberturas en recipientes (diseño de esfuerzos, refuerzo de aberturas múltiples)
- Soldadura (materiales, especificaciones, criterios de selección, ensayos, variables, cualificación de procedimientos y de soldadores, elaboración de procedimientos de soldadura)
- Diseño de tuberías (límite de tensiones, conexión de tuberías, cálculo de refuerzos)
- Requisitos de fabricaciones, inspección y ensayos.

2.3.2 USO Y APLICACIONES EN LA SOLDADURA

2.3.2.1 API (American Petroleum Institute)

Esta norma se usa específicamente en la industria petrolera y petroquímica, ya que cubren el diseño, fabricación, inspección, montaje y mantenimientos de tanques, también se refieren al petróleo y sus derivados. Por ejemplo la norma API 653 indica los requerimientos para la inspección, reparación, modificación o

nueva ubicación de los tanques que se construyen con la norma API 650 y también se refiere al diseño y construcción de tanques atmosféricos.

Las normas API 620, 650 se aplican a grandes tanques horizontales o verticales soldados en el campo, aéreos que operan a diferentes presiones y temperaturas.

Las API 12D, 12F se aplica a tanques horizontales o verticales soldados en el campo para almacenaje de líquidos de producción y con capacidades estandarizadas.

Existe también la gravedad API que es una medida de densidad que describe si el petróleo es pesado o liviano comparándolo con el agua. Y en base a esto se establece el valor del petróleo, mientras mayor grado API mayor valor del producto, pero hasta los 45 grados API, de ahí en adelante los productos tengan menor valor comercial.

El producto se clasifica como liviano (grado mayor a 31,1), mediano (entre 22,3 y 31,1°API), pesado (entre 10 y 22,3°API) y extra pesado (menores a 10°API). Esta es una de las principales aplicaciones ya que el precio del petróleo se establece a nivel mundial, entonces se tiene una referencia según la calidad del mismo, y esta es aprobada y aceptada por los productores y consumidores de este producto. También se usa estas normas para determinar los niveles de calidad exigidos a los lubricantes destinados a los motores.

2.3.2.2 AWS (American Welding Society)

Estas normas se usan en la industria, especialmente en la realización de planos de ingeniería, la simbología que representa los detalles de diseño que indica al soldador las reglas que debe seguir o como debe realizar el trabajo, aunque no tenga conocimientos de ingeniería. La AWS estandarizó los símbolos para que se usen en la industria y que ilustren toda la información necesaria para realizar el trabajo.

Además, se refiere a todos los parámetros de soldadura, tiene la clasificación de electrodos por sus características: material que se va a soldar, diámetro, etc., y las

aplicaciones que estos tienen: los materiales, sus características, estructuras, aplicaciones. También se detallan los tipos de juntas: a tope con bisel, con ranura en V, 1/2V, U, J, etc.

En la sección AWS A5, se detallan la clasificación del metal de aporte y los procesos de soldadura que se usan. En la sección AWS D1.1 se detalla la soldadura estructural para aceros, el diseño de las conexiones soldadas, precalificación y calificación de procesos, calificación del personal de soldadura, entre otros tópicos. El uso de notas al pie de página es importante, ya que estas establecen los límites de la aplicación de cierta parte del código o pueden incrementar su campo de aplicación. Se toma en cuenta las sugerencias y obligaciones de los códigos pero la base principal es el criterio del profesional que está haciendo uso del mismo, porque la responsabilidad del buen desempeño del trabajo es netamente de él.

A lo largo de este proyecto se hará referencia a la norma ASTM E837-01 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL STRESSES BY THE HOLE-DRILLING STRAIN-GAGE METHOD, el que explica y normaliza parámetros y ecuaciones que se usará para la medición de los esfuerzos residuales en las placas de prueba. Comienza estableciendo el alcance de la norma seguido de una explicación del proceso, una pequeña descripción teórica del estado interno del material y por ende la determinación de las ecuaciones aplicables, el detalle de cómo se obtienen las constantes de aliviación y una tabla de valores en función de los tipos de galgas extensiométricas que se usen, a continuación se tiene la descripción de los 3 tipos de galgas que se pueden utilizar, se explica el proceso de taladrado, seguido de las graficas de comportamientos de las galgas según el tipo, e información adicional de este proceso. Es por esto que a esta norma se toma como base para la realización del estudio y posterior análisis de los resultados obtenidos.

2.3.2.3 ASME (American Society of Mechanical Engineers)

Las normas ASME tienen una sección que trata con calderas y recipientes a presión, calderas de potencia, consta en códigos de construcción y códigos de referencia.

Una sección muy usada por la industria es la IX “Calificación de Soldadura y Soldadores”; y contiene: Requisitos para la soldadura, calificación de los procedimientos de soldadura, calificaciones de la habilidad de los soldadores, especificaciones de procedimientos de soldadura estándar.⁶

La norma ASME B31, Códigos de Tuberías. En la siguiente tabla se muestran los códigos de esta sección:

Tabla 2.6 Códigos de la sección ASME B31

| SECCION | INSTALACION CONSIDERADAS |
|----------------|--|
| ASME B31.1 | Tubería de potencia |
| ASME B31.3 | Tubería de proceso |
| ASME B31.4 | Sistemas de transporte de hidrocarburos Líquidos y otros líquidos |
| ASME B31.5 | Tubería de refrigeración |
| ASME B31.8 | Sistemas de transporte y Distribución de gas |
| ASME B31.9 | Tubería deservicio de edificios |
| ASME B31.11 | Transporte de barras |

2.4 ESFUERZOS RESIDUALES

2.4.1 ORIGEN

⁶ Alcoser, J. Folleto de Diseño Mecánico. CIME – ESPE, 2007

Los esfuerzos residuales se introducen en muchas estructuras y componentes metálicos durante su fabricación y se generan por diferentes motivos: en fundiciones, mediante las fuerzas de contracción que surgen a medida que la pieza se solidifica; al conformar metales, debido a las características elásticas del material; al cortar metal, por la acción cortante que va siempre acompañada de deformación; al soldar, debido a la expansión y contracción del material que resultan por los cambios de temperatura; al mecanizar, etc. Frecuentemente, estos esfuerzos son de tal magnitud que es preciso atenuarlas para prevenir la excesiva distorsión o agrietamiento de la pieza.

Estos son esfuerzos que están presentes en el interior del material y que permanecen en él cuando se eliminan todas las cargas aplicadas, se encuentra libre de fuerzas o restricciones externas y de cambios o gradientes de temperatura. Y se las puede definir como cualquier esfuerzo en un cuerpo elástico, además estos esfuerzos están en equilibrio solo con ellos mismos y pueden actuar de manera temporal o permanente.⁷

Los esfuerzos residuales a pesar de lo difíciles que son de calcular y medir si se dejan sin tratamiento se pueden manifestar por sí mismos a través del tiempo en una variedad de formas indeseables, provocando frecuentemente la debilidad y el agrietamiento prematuro de las piezas, su deformación o torcedura y con frecuencia debilitando la integridad de las soldaduras clave. Esto conduce a una reducción en la duración útil de los componentes que, aparte de esto, han sido bien fabricados. Los estrictos requisitos de tolerancias actuales están haciendo cada vez más importante la necesidad de poseer un alivio de esfuerzos residuales, con el fin de lograr una estabilidad dimensional y una ausencia de deformaciones. Por lo que para su eliminación es necesaria la introducción de energía a la pieza.

En los esfuerzos residuales hay dos componentes a tener en cuenta: tensión y compresión. Las leyes de la física y las matemáticas exigen un equilibrio entre la

⁷ RADAJ ,D. Heat Effects of welding, p 5

magnitud de compresión y la de tensión. Desafortunadamente, en el trabajo con el metal, no hay un equilibrio uniforme.

Los esfuerzos residuales de tensión reducen la resistencia a la fatiga y a la corrosión. Los esfuerzos residuales de compresión disminuye el límite de estabilidad. Por el contrario los efectos positivos de los esfuerzos residuales de la soldadura tienen un significado práctico secundario⁸

2.4.1.1 Esfuerzos residuales en la soldadura

Los esfuerzos en la zona de soldadura se presentan como resultado del calentamiento y enfriamientos dispares y la carencia de dilatación y contracción libres. Existen dos tipos de esfuerzos en cualquier proceso de soldadura:

- 1) Esfuerzos térmicos que se crean por el calentamiento del metal
- 2) Esfuerzos residuales que permanecen después del enfriamiento y dan origen a la mayoría de los problemas en las piezas soldadas.⁹

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado.

La situación en la soldadura se complica porque: 1) el calentamiento está *muy* localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco eléctrico).

Por ejemplo, si se considera una soldadura empalmada de dos placas mediante una operación de soldadura con arco eléctrico. La operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto. Conforme avanza, se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de aporte), el cual se solidifica con rapidez detrás del arco

⁸ RADAJ, D. Heat Effects of welding, p 2

⁹ RENDER, J. Soldadura, 3ra Ed. México McGrawHill, p 47.

en movimiento. Las partes del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se vuelven extremadamente calientes y se expanden, en tanto que las porciones removidas de la soldadura permanecen relativamente frías. El pozo de soldadura se solidifica rápidamente en la cavidad entre las dos partes y, conforme el pozo y el metal circundante se enfrían y contraen, ocurre un encogimiento a través de lo ancho de la soldadura. Las partes adyacentes al cordón de la soldadura queda en tensión residual y se acumulan tensiones compresivas de reacción en las regiones de las partes lejanas a la soldadura. También ocurren tensiones residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Dado que las regiones exteriores de las partes base han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura.

Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado.

Para entender de mejor manera la generación y el comportamiento de los esfuerzos residuales en la soldadura, se puede representar a este proceso como una barra restringida luego de un ciclo térmico de calentamiento y enfriamiento, como se explica a continuación.

En la figura 2.22, la barra central representa el cordón de soldadura y el material adyacente y las dos barras laterales el material base un poco más lejos del cordón. La curva representa la evolución de las tensiones en la barra central como consecuencia de un ciclo de calentamiento de la misma hasta una temperatura de 593°C (1100°F) y posterior enfriamiento hasta temperatura ambiente. La curva entre los puntos *A* y *B* representa la generación de tensiones (elásticas) de compresión debido a que la barra central al calentarse tiende a dilatar pero esta dilatación es impedida por las dos barras laterales cuya temperatura no se modifica. Al llegar a la temperatura correspondiente al punto *B*, un calentamiento posterior de la barra produce una disminución de las tensiones de compresión porque a esta temperatura se produce el ablandamiento del material que por lo

tanto se deforma plásticamente relajando las tensiones. Alcanzada la temperatura pico en el punto C, comienza el enfriamiento y la barra central experimenta ahora una contracción, que al ser impedida por las barras laterales genera una tensión de tracción (elástica) que aumenta linealmente como lo muestra la parte CD de la curva. Finalmente al alcanzarse el punto D, la tensión de tracción es lo suficientemente alta para producir la deformación plástica en tracción del material, que fluye plásticamente hasta alcanzar el punto E que culmina el ciclo.

Puede verse que como consecuencia del ciclo térmico experimentado por la barra central, se generó una tensión residual de tracción en la misma y por lo tanto tensiones residuales de compresión equilibrantes en las barras laterales.¹⁰

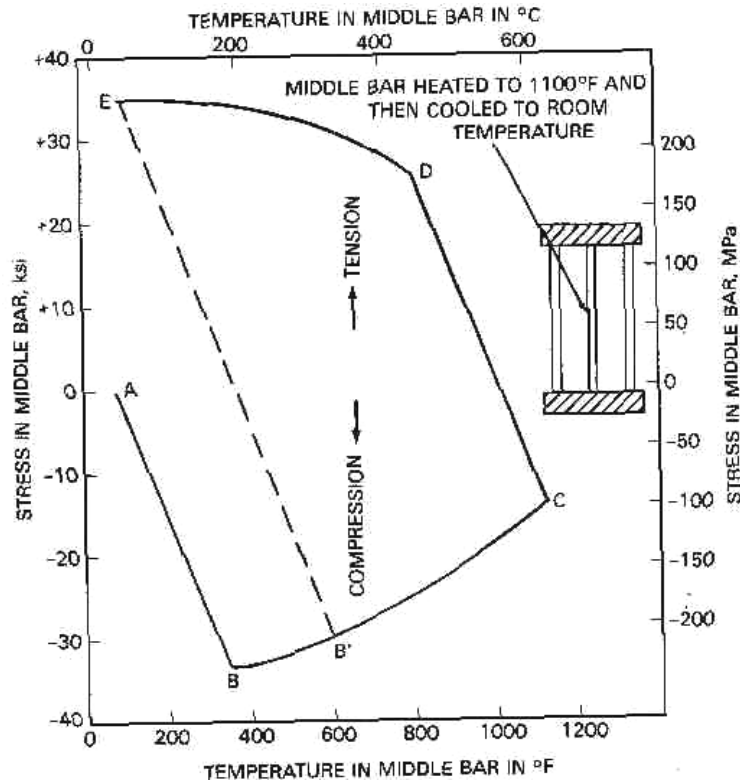


Figura 2.22 Generación de esfuerzos residuales en una barra restringida luego de un ciclo térmico de calentamiento y enfriamiento

2.4.1.2 Distribución de esfuerzos residuales en elementos soldados.

¹⁰ Handbook ASTM, Tomo 8, p 859

La distribución de los esfuerzos residuales se representa en una soldadura a tope de dos planchas. A lo largo del cordón se forman altos esfuerzos residuales de tracción, los cuales descienden rápidamente conforme se alejan de la soldadura hasta convertirse en esfuerzos residuales de compresión en el material base (Figura 2.23 a). La misma soldadura provoca esfuerzos residuales transversales al cordón, pero de menor magnitud. Sin embargo pueden aumentar al restringir la contracción lateral de las planchas al momento de soldarlas. (Figura 2.23 b).

Cuando las planchas son fijadas a través de dispositivos de manera que se impide su deformación en la dirección perpendicular al cordón, aparecen esfuerzos de tracción uniformes a lo largo de la soldadura que se suman a las tensiones residuales e incrementan la tensión máxima en la dirección transversal.¹¹

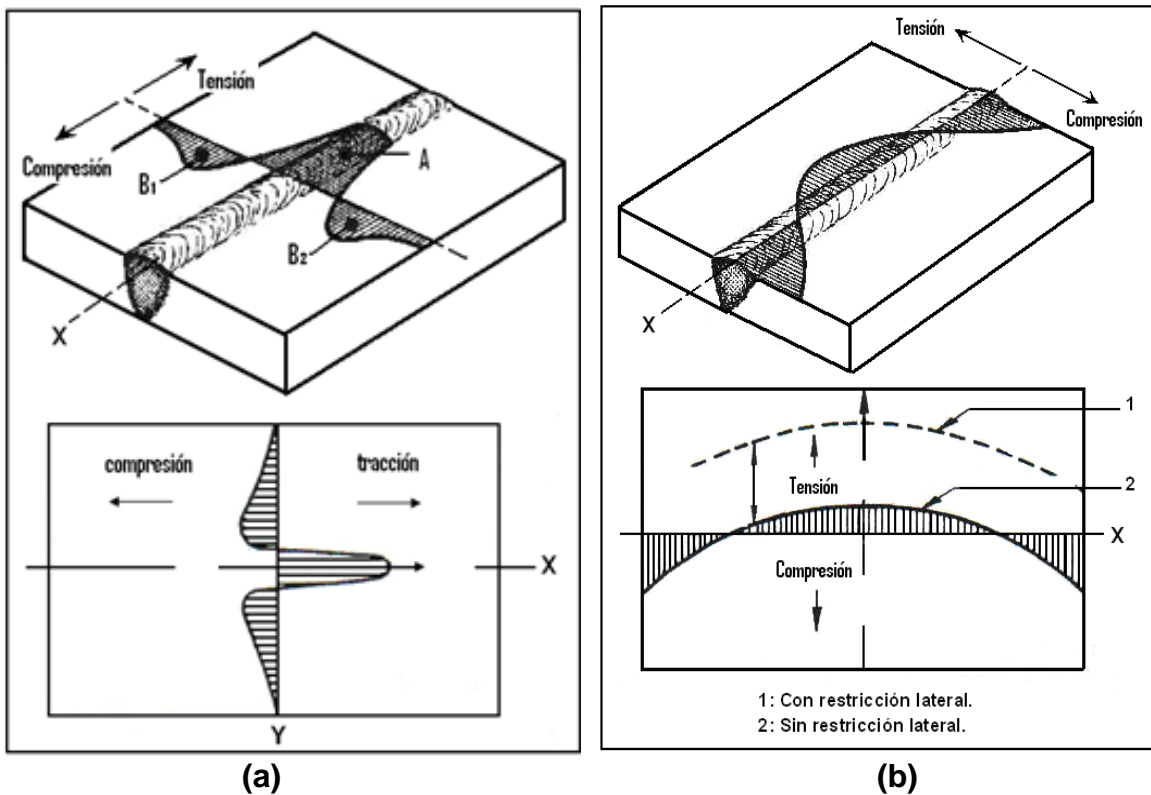


Figura 2.23 Distribución de esfuerzos residuales longitudinales y transversales en una placa debido al proceso de soldadura

2.4.1.3 Zona de afectación térmica (ZAT)

¹¹ AJILA, C.F. Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas. Tesis Ing. Mec. Guayaquil, Escuela Politécnica del Litoral. 2008, pp 55-56

La zona de afectación térmica (ZAT) o como su denominación en inglés Heat affected zone (HAZ), es el área de material de base cuya microestructura y propiedades han sido alteradas por la soldadura o el calor intenso de corte. El calor del proceso de soldadura y posterior re-enfriamiento son las causas de este cambio en el entorno de la soldadura.

El alcance y la magnitud del cambio de propiedades dependen principalmente del material base material, la soldadura de metal, y la cantidad y la concentración de calor por el proceso de soldadura.

La difusividad térmica del material de base es muy importante, si la difusión es alta, el material tiene una velocidad de enfriamiento alta y el ZAT es relativamente pequeño, ocurre todo lo contrario cuando la difusividad térmica es baja, el material tiene una velocidad de enfriamiento baja y el ZAT tiene un valor alto.

La cantidad de calor introducida por el proceso de soldadura juega un papel importante, tal como el proceso de soldadura oxyfuel de alta concentración de calor y por lo que el valor del ZAT es alto. Procesos como la soldadura con rayos láser y de soldadura mediante haz de electrones dan un alto grado de concentración pero una limitada cantidad de calor, resultando en una pequeño ZAT. La soldadura por arco cae entre estos dos extremos, con los procesos individuales de alguna variable de entrada en calor.

El proceso de soldadura por arco eléctrico por ser una operación totalmente localizada, presenta una zona de material totalmente fundido y otra en la cual el material ha sufrido un calentamiento. Este proceso ocurre en tiempos muy cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la estructura del metal base. La figura 2.24 representa esquemáticamente estas regiones.

Como consecuencia de esto se originan velocidades de enfriamiento variables y muy rápidas dentro de cada zona.

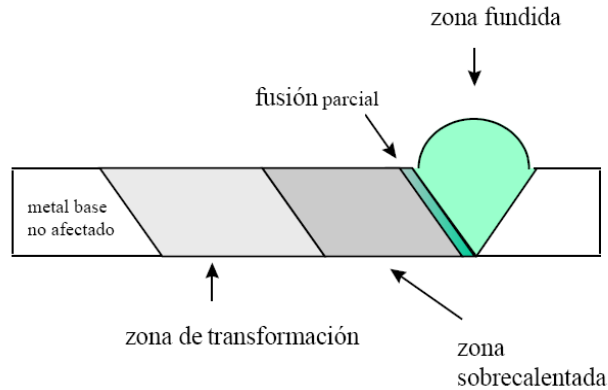


Figura 2.24 Zonas afectadas térmicamente

La velocidad de enfriamiento a una determinada temperatura está gobernada por la difusividad térmica del material 'a' dada por:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad 2.1$$

La distribución de temperatura y la velocidad de enfriamiento en cada zona del cordón y sus adyacencias está influenciada por:

- el aporte de energía
- el diámetro del electrodo
- la temperatura inicial o de precalentamiento T_0
- la geometría de la junta
- las características térmicas del material
- condiciones particulares de enfriamiento

La figura 2.25, ilustra el efecto del calor aportado concentrado en el centro de un cordón de soldadura, representando las distintas isothermas que se generan, a distintas distancias del arco. El punto cero representa el centro del cordón hacia la izquierda se tiene isothermas de calentamiento y hacia la derecha de enfriamiento. Considerando que la temperatura de fusión del acero es de 1538°C y la temperatura correspondiente a la transformación austenítica es de 815°C , entonces entre estas dos isothermas tenemos la región sobrecalentada y entre 815 y 540°C la región transformada.

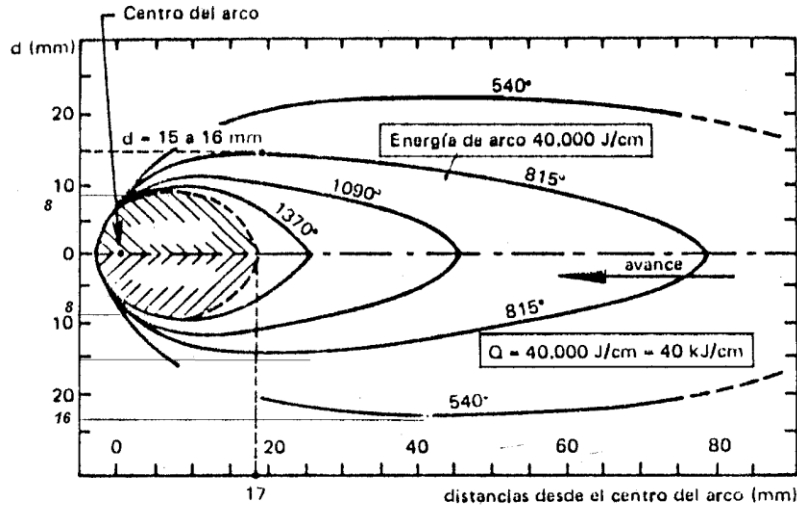
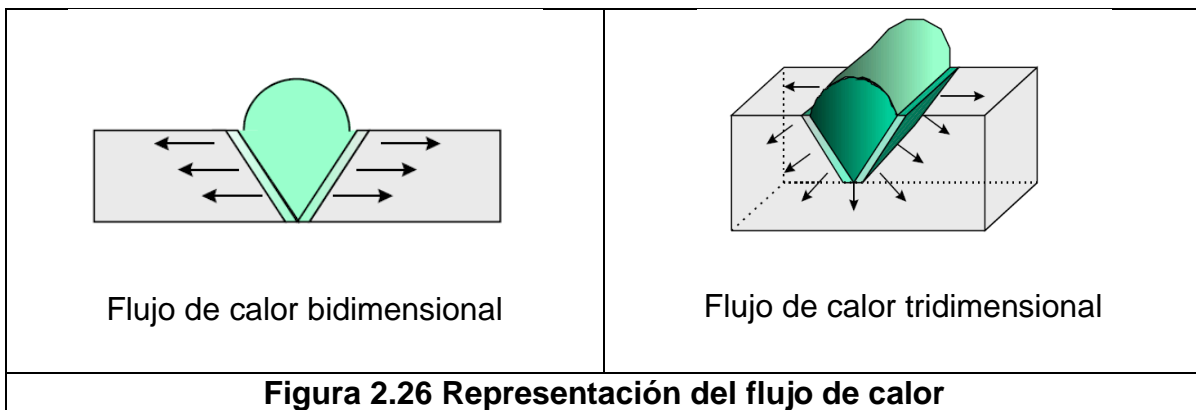


Figura 2.25 Representación de isotermas generadas por la soldadura

La figura 2.25 se refiere a un cordón realizado sobre una chapa de 12,7mm de espesor con una energía de 40 kJ/cm y una temperatura inicial de 27 °C. (correspondería por ejemplo a una soldadura manual con electrodo de 5mm de diámetro empleando 200A, 25V y 7,5cm/min de velocidad de avance).

En el caso de placas finas las isotermas se consideran bidimensionales mientras que para placas gruesas la distribución de temperatura es considerada tridimensional, pensándola como una superficie de revolución alrededor del cordón de soldadura.



Las ecuaciones que se utilizan para analizar el flujo de calor en una soldadura fueron obtenidas por Rosenthal en 1935.

Rosenthal considera a la soldadura como el movimiento de un punto de una fuente de calor que avanza a velocidad constante en una dirección dada en un sistema de coordenadas rectangulares fijas, como muestra la figura siguiente:

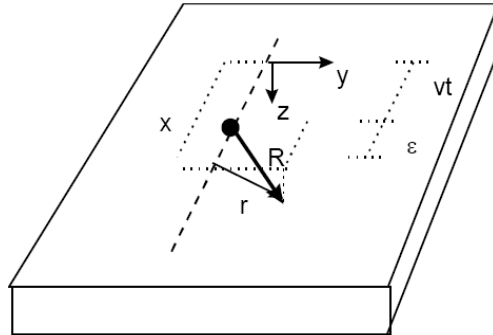


Figura 2.27 Sistema de coordenadas rectangulares fijas

La ecuación diferencial (2) corresponde al flujo de calor expresado en coordenadas cartesianas espaciales (x, y, z) según la figura anterior y está dada por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.2$$

Aquí se consideran constantes la conductividad térmica y el producto de calor específico por densidad del metal base, para distintas temperaturas.

Realizando una serie de operaciones se obtiene la siguiente las soluciones para la distribución de temperaturas, la cual están dadas por:

$$\text{Para placa gruesa: } T - T_0 = \left[\frac{Q_{ef}}{2\pi\lambda} \cdot \frac{e^{\left[\frac{-V_w(\xi+R)}{2\alpha}\right]}}{R} \right] \quad 2.3$$

$$\text{Para placa fina: } T - T_0 = \left[\frac{Q_{ef}}{2\pi\lambda t} \cdot e^{\left[\frac{-V_w(\xi)}{2\alpha}\right]} \cdot K_0 \left[\frac{V_w(R)}{2\alpha} \right] \right] \quad 2.4$$

Donde:

Q_{ef} : Potencia efectiva

V_w : Velocidad de soldeo

Ko: Es la función de Bessel de primera semejanza de orden cero

t: Es el espesor de la placa

$R = (\xi^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$: Es la distancia de la fuente de calor a un cierto punto fijo, según la figura 2.27.

A continuación se presenta una tabla que contiene propiedades térmicas de distintos materiales, la cual se usa para el cálculo de las temperaturas:

Tabla 2.7 Propiedades térmicas de distintos materiales

| Material | Capacidad volumétrica ρ (J/m ³ K) | Difusividad térmica α (m ² /s) | Conductividad térmica λ (J/m s K) | Temperatura de fusión (K) |
|-------------------|---|--|---|---------------------------|
| Aluminio | 2,7 x 10 ⁶ | 8,5 x 10 ⁻⁵ | 229 | 933 |
| Acero al carbono | 4,5 x 10 ⁶ | 9,1 x 10 ⁻⁶ | 41,0 | 1800 |
| Acero 9% Níquel | 3,2 x 10 ⁶ | 1,1 x 10 ⁻⁵ | 35,2 | 1673 |
| Acero austenítico | 4,7 x 10 ⁶ | 5,3 x 10 ⁻⁶ | 24,9 | 1773 |
| Inconel 600 | 3,9 x 10 ⁶ | 4,7 x 10 ⁻⁶ | 18,3 | 1673 |
| Aleaciones de Ti | 3,0 x 10 ⁶ | 9,0 x 10 ⁻⁶ | 27,0 | 1923 |
| Cobre | 4,0 x 10 ⁶ | 9,6 x 10 ⁻⁵ | 384 | 1336 |
| Monel | 4,4 x 10 ⁶ | 8,0 x 10 ⁻⁶ | 35,2 | 1573 |

Fuente Introducción a la metalurgia de la soldadura, pág. 88

2.4.2 CARACTERÍSTICAS

2.4.2.1 Clasificación de los esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales pueden ser clasificados mediante una escala de acuerdo como se encuentran dentro del material y existen tres tipos de esfuerzos.

- Tipo I de esfuerzos: Esfuerzos residuales macroestructurales: Se generan por las dilataciones producidas por el calentamiento de una placa durante su soldadura. Aparecen sobre las áreas que involucran muchos granos dentro del material

- Tipo II de esfuerzos: Esfuerzos Residuales Microestructurales: Se generan por las transformaciones microestructurales como la formación de martensita en el acero y aparecen sobre las áreas comparables al tamaño de un grano en el material
- Tipo III de esfuerzos: Existen dentro del grano como resultado de las imperfecciones cristalinas dentro del grano

Un ejemplo de esfuerzos residuales macroestructurales se muestra en la figura 2.28a, cuando una estructura esta calentada por radiación solar en un lado, distorsiones térmicas y esfuerzos térmicos se producen en la estructura.

El esfuerzo residual producido por la soldadura es mostrado en la figura 2.28b y se observa que los esfuerzos se encuentran en las áreas cercas a la soldadura.

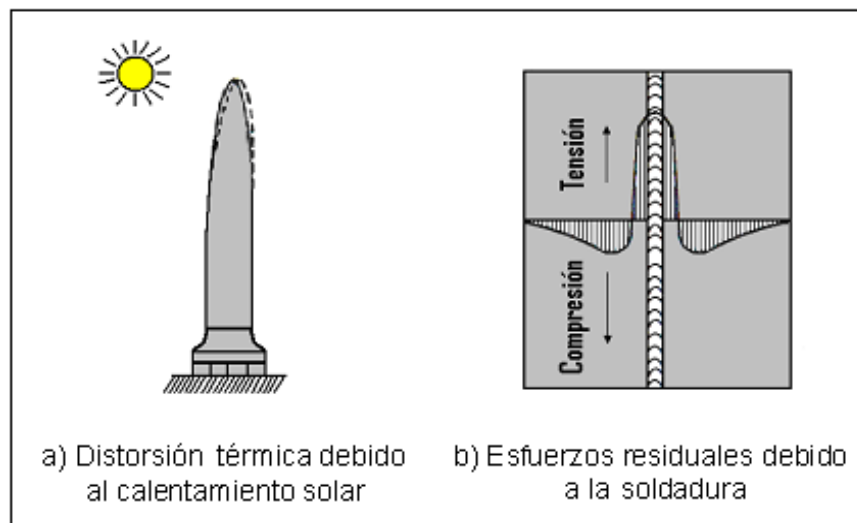


Figura 2.28 Esfuerzos residuales macroscópicos.

2.4.3 EFECTOS Y DEFORMACIONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

Introducción

Entendemos por distorsión en soldadura a las deformaciones que se producen en las piezas durante la soldadura, es decir, modificaciones en la geometría de las partes que son unidas por soldadura que sufren cambios dimensionales que es necesario en general controlar para que no excedan límites aceptables

Se producen como consecuencia de las tensiones mecánicas que se generan en las piezas como resultado de las deformaciones plásticas localizadas producidas por expansiones y contracciones no uniformes del metal de soldadura y metal base adyacente.

2.4.3.1 Formas comunes de distorsión

- Contracción (distorsión) transversal.
- Contracción (distorsión) longitudinal.
- Distorsión angular.

2.4.3.1.1. Contracción (distorsión) transversal.

La contracción transversal es una reducción adimensional en una dirección perpendicular a la línea de soldadura, dicha reducción ocurre cuando el elemento soldado comienza a enfriarse.

La cantidad de contracción varía con:

- El grado de restricción en los miembros durante la soldadura y el enfriamiento.
- El área de la sección transversal del metal soldado.
- El extenso flujo de calor el cual está dentro del metal base adyacente
- El número de pases empleados para realizar la soldadura y el ciclo de temperatura – tiempo el cual ocurre durante la deposición.

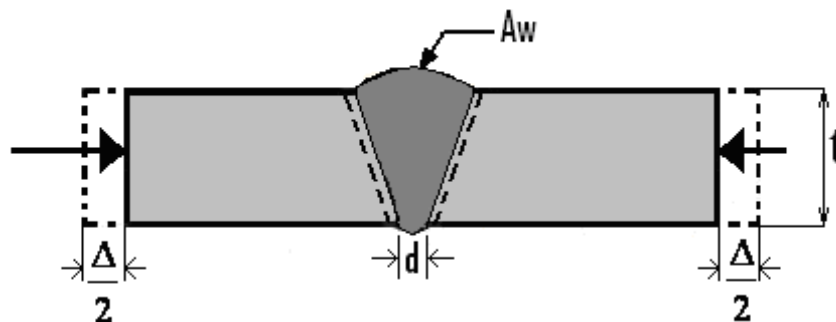


Figura 2.29 Contracción transversal de una junta a tope.

2.4.3.1.2 Contracción (distorsión) longitudinal.

Esta contracción ocurre paralela a la línea de la soldadura y tiende a reducir la anchura de la placa en la soldadura como se muestra en la figura 2.29. Esto es razonable de creer que ésta contracción longitudinal sería proporcional al largo de la soldadura.

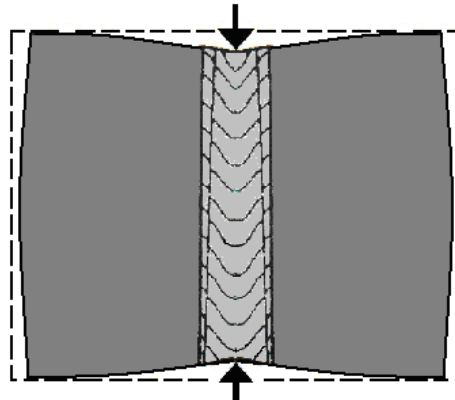


Figura 2.30 Contracción longitudinal de una junta a tope.

2.4.3.1.3 Distorsión angular

En las mediciones tanto reales como analíticas se mide la deflexión en el borde de las planchas debido a que estos valores son fácilmente llevados a grados.

El cambio angular depende en muchos factores, como son: la forma y dimensiones de la junta, el espesor de la placa y el procedimiento de soldadura. No hay fórmulas exactas para predecir este tipo de distorsión, pero un entendimiento del mecanismo que origina este tipo de distorsión ayudaría a minimizar y en algunas situaciones eliminar el cambio angular.

La distorsión angular puede ser minimizada teniendo un calor más uniforme a través del espesor de la placa el cual depende en parámetros de soldadura, especialmente aquellos relacionados a entradas de calor y penetración.

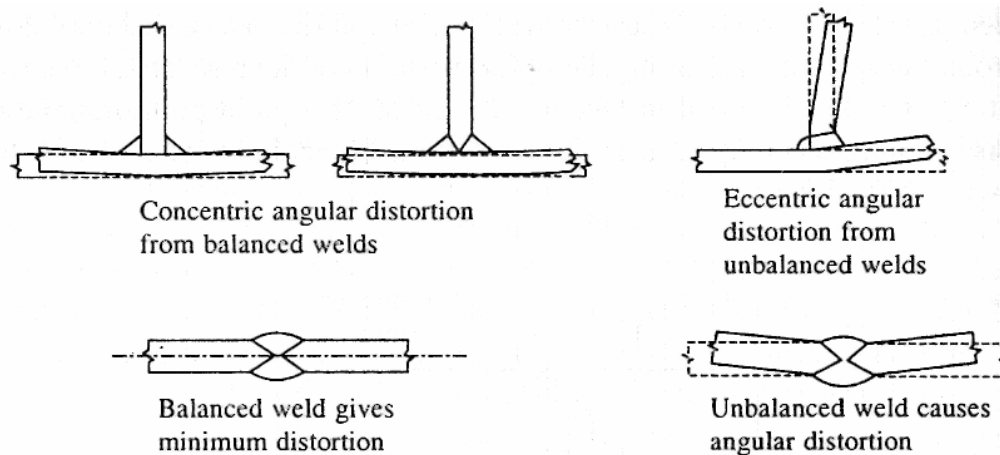


Figura 2.31 Distorsión angular.

2.4.4 MÉTODOS DE ATENUACIÓN

Los esfuerzos residuales pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles por lo que es necesario reducir dichos esfuerzos, existiendo diferentes métodos los cuales son agrupados en dos grandes campos:

- 1) Por tratamientos térmicos y
- 2) Por tratamientos mecánicos

Ambos son utilizados para reducir los esfuerzos residuales, incluyendo precalentamiento, post calentamiento, impactos, vibraciones, etc. Pero, para el caso de construcciones o estructuras metálicas de gran porte para tratamientos “in situ” están limitados.

2.4.4.1 Métodos de atenuación por vía térmica.

Este tipo de tratamiento son muy utilizados en la industria y consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo como para que se uniformen en toda la pieza y puedan efectuarse los re-acomodamientos dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente a dicha temperatura.

Las temperaturas empleadas para el tratamiento térmico de alivio de tensiones son de:

- 600 °C para los aceros estructurales comunes
- 700 a 750 °C en aceros de alta aleación a base de molibdeno.

Se debe tener muy en cuenta el tipo de material al momento de elegir este método, por que al momento de aplicarlo puede ocurrir la fragilización del mismo o la corrosión intercrystalina y por consiguiente una disminución catastrófica de las propiedades mecánica del material con el consiguiente gasto del recurso.

En algunos materiales no resulta aconsejable la permanencia a temperaturas del orden indicado por el riesgo de afectar desfavorablemente sus propiedades físicas y mecánicas y por ende no cumplir satisfactoriamente a las sollicitaciones del servicio.

Tal es el caso de los aceros inoxidable, que son susceptibles a la precipitación de cromo para formar carburos de cromo cuando son sometidos a temperaturas dentro del rango 400-700 °C, trayendo como consecuencia que aparezca zonas cuya pasividad frente a los agentes químicos agresivos se encuentra disminuida, además de disminuir sus propiedades mecánicas.

Los métodos de atenuación por vía térmica tienen ventajas y desventajas porque para realizarlo hay que contar con instalaciones complejas y costosas, además, de su alto consumo de energía eléctrica, estando limitado el tamaño de piezas voluminosas.

2.4.4.2 Métodos de atenuación por vía mecánica.

Este método es realizable cuando la pieza posee una suficiente reserva de ductilidad, es decir, exhibe capacidad de estirarse plásticamente. Dicho de otra forma durante el proceso el metal se debe comportar de una manera puramente elástica, siempre y cuando haya tenido una deformación plástica.

Al aplicarlo ocurre una redistribución de las tensiones residuales al aplicar y remover tensiones externas como muestra en la siguiente figura para una chapa soldada a tope.

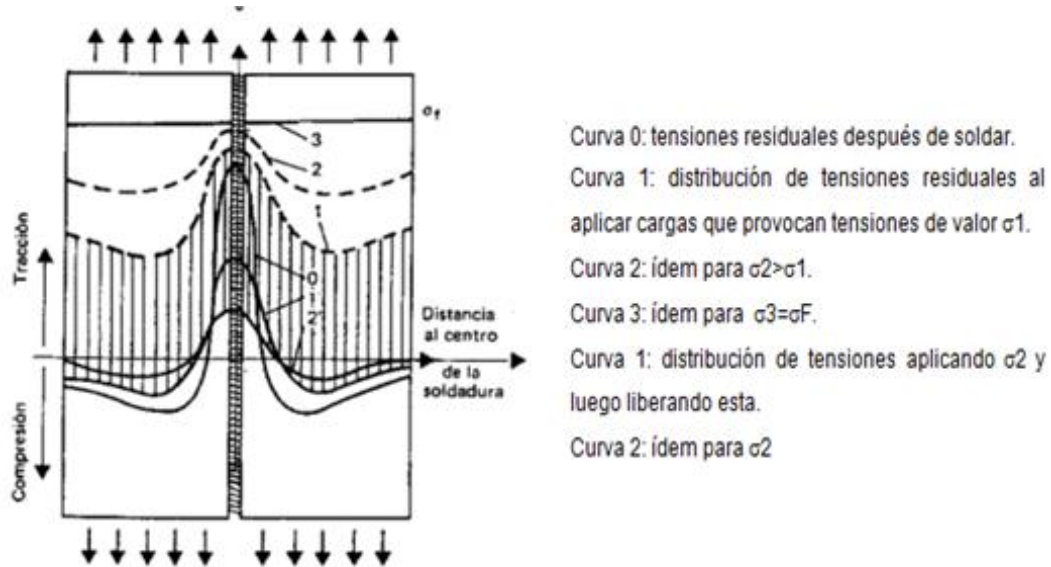


Figura 2.32 Redistribución de las tensiones residuales al aplicar y remover tensiones externas

Es apreciable la disminución del nivel de tensiones residuales que se logra por este método.

También queda de manifiesto que en la prueba hidráulica que se practica en la recepción de recipientes sometidos a presión interior tiene, indudablemente el efecto de un alivio de tensiones por vía mecánica.

Este método de alivio de tensiones es aplicable a conjuntos de dimensiones reducidos quedando limitado el tamaño de las piezas a tratar por la capacidad dimensional y de fuerza, disponible en los dispositivos de estiramiento.

2.4.4.2.1 Martillado de los cordones de soldadura.

Este método consiste en golpear cada cordón con una maza pesada y golpes lentos, el empleo de una maza liviana y golpes rápidos endurece la superficie del metal, ya que no se logran deformaciones profundas, sino que fragiliza la cáscara del metal sin aliviar la tensión.

En esencia, desde que la soldadura se halla en estado de tracción, si el metal es desplazado plásticamente en dirección del espesor fluirá en el plano perpendicular con lo que se producirá un efectivo alivio de las tensiones longitudinales y transversales.

A pesar de su sencillez y efectividad no resulta un método de producción recomendable por la imposibilidad de cuantificar sus resultados y de asegurar la uniformidad y repetitividad de los mismos siendo por lo tanto de muy difícil control.

2.4.4.2.2 Aplicación de vibraciones.

Este método consiste en hacer vibrar la pieza mediante un vibrador de velocidad variable, provisto de un amplificador electrónico.

Haciendo variar la velocidad puede alcanzarse la frecuencia de resonancia la que se mantiene un periodo de tiempo relacionado con el peso del elemento a tratar, el cual, usualmente varía entre 10 y 30 minutos.

La reducción es en función del número de ciclos de tensiones impuestos, la mejor reducción ocurre en el 1^{er} ciclo, algunas nuevas reducciones tienen lugar en algunos cientos de ciclos y una relativa pequeña reducción ocurre con un largo número de ciclos, debido a que ocurren cambios no metalúrgicos y se forman grietas de fatiga.

La efectividad del método de alivio de tensiones por vibración puede ser diferente en vibraciones en metales suaves que en metales endurecidos.

Para una exitosa aplicación industrial de este método se requieren otras exigencias:

1. Una relativa simple geometría y la aplicación de múltiples modos de vibración son necesarios tener en cuenta todas las áreas de la estructura para una alta amplitud vibracional. El uso de estrategias adicionales localizadas dificulta la operación.

2. Grandes amplitudes de vibración con tensiones en el orden de los límites de fatiga del material deben aparecer para un mejor porcentaje de relajación de las tensiones residuales.
3. El material debe ser del tipo que sea susceptible a la relajación de tensiones por vibración.

En determinadas circunstancias puede que no se logre la eliminación total de las tensiones por este método, pero sí de forma parcial por lo que representaría una alternativa conveniente.

El alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones no modifica la estructura metalográfica de la soldadura ni de la zona de influencia térmica (ZIT), por lo que no deberán esperar mejoramientos de las propiedades mecánicas de estas con esta técnica.

En muchas ocasiones no se puede aplicar esta técnica por no cumplir las exigencias para su aplicación. Las estructuras pueden ser complicadas e irregulares y complican la aplicación del método, piezas pequeñas y de poco volumen se prestan para el uso de este método. Con el incremento de la complejidad de las estructuras la aplicación del alivio de tensiones por vibración se dificulta o imposibilitan.



Figura 2.33 Aliviación de esfuerzos por medio de la aplicación de vibraciones

2.4.4.2.3 Alivio por explosión.

El uso de sustancias explosivas para el tratamiento de cordones de soldadura por explosión es uno de los métodos de mayor perspectiva para el mejoramiento de las propiedades de las uniones soldadas, debido a la gran capacidad energética, la posibilidad de obtener gran potencia, la sencillez y lo económico de la operación.

Consiste en someter localmente la zona de soldadura a la acción directa de la detonación de una carga explosiva, lo cual garantiza la formación de un frente lineal de detonación perpendicular al eje lineal de la carga. Durante esto en el material de la chapa se provoca, en ángulo con su superficie, una onda de choque de compresión, con velocidad de masa, cuya dirección coincide con el movimiento del frente de la onda de choque. (Figura 2.34)

El ángulo de este frente con respecto a la superficie de la chapa, y también su posición con respecto al frente de detonación lo determina la relación D/C ; donde C es la velocidad de la onda expansiva en el material y D es la velocidad de detonación de la sustancia explosiva. Esto permite la entrada en movimiento longitudinal del material en todo el espesor de la chapa siempre que esta no sea muy gruesa.

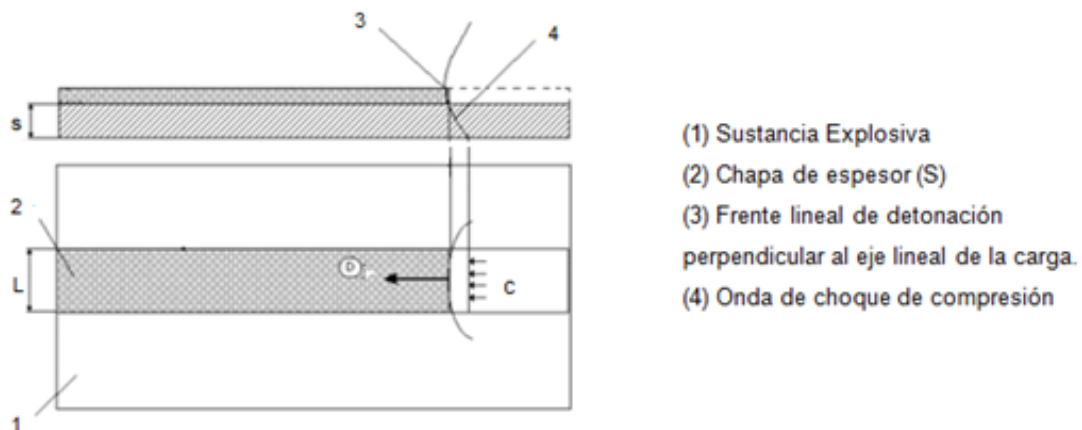


Figura 2.34 Esquema de colocación de la sustancia explosiva en una chapa de espesor (S)

El efecto de mejorar las propiedades de las uniones soldadas se basa en que la onda de choque de compresión, la cual surge como resultado de la detonación de

la carga explosiva colocada sobre la zona afectada térmicamente, provoca deformaciones plásticas locales del metal que llevan a la formación en las capas superficiales de recalcado y tensiones residuales de compresión. Además, bajo la acción de la carga explosiva, cambia el campo de las tensiones residuales en un volumen comparativamente grande de la unión soldada.

Está demostrado que la deformación de alargamiento creada en la dirección de la detonación, lo cual es una de las principales particularidades de este método, queda determinado por las componentes longitudinales de la velocidad de masa detrás del frente de la onda de choque en el material, las cuales a su vez dependen de la potencia y geometría de la carga de sustancia explosiva.

El campo de aplicación de los tratamientos con carga explosiva para el alivio de las tensiones residuales no solo está limitado a los materiales ferrosos, sino que pueden aplicarse en las aleaciones de aluminio, aumentando las posibilidades de utilización del método.

La colocación de dicha carga es a lo largo del eje longitudinal de la soldadura o paralelo al mismo y puede realizarse de diversas maneras o esquemas, entre ellas se pueden indicar las siguientes: utilizando un cordón detonante colocado en forma sinusoidal, triangular, trapezoidal, etc.; cordón detonante longitudinal (uno o varios); carga en forma de tira o cinta; carga cilíndrica a lo largo del eje de la soldadura (una o varias). La utilización de uno u otro esquema va a estar determinado por la experiencia práctica de la utilización del explosivo.

La utilización del cordón detonante en forma de senoide es más usual que el resto, debido a la fácil manipulación del mismo y por el aumento significativo de la disminución de las tensiones residuales por unidad de masa de la carga explosiva.

Es necesario destacar que la acción de la onda de choque de compresión producida por la detonación, debido al efecto de presión súbito, produce una onda de choque en el aire circundante; este choque de compresión es el principal efecto de destrucción de larga distancia de las explosiones. Si la propagación de la onda

de choque es casi esférica, el nivel de compresión disminuye rápidamente, y así hace que la velocidad de la onda de choque del material; se vuelva cero.

Los explosivos utilizados con mayor frecuencia son el HMX, PETN, TNT, los que permiten una velocidad de explosión en el rango de 6000 a 9000 m/s. Se recomienda densidades de carga de carga de la sustancia explosiva igual a 0,5 g/cm³.

2.4.5 MÉTODOS DE MEDICIÓN

En general se han propuesto y utilizando muchas técnicas para medir las tensiones residuales en los metales.

En la actualidad estas técnicas para medir los esfuerzos residuales, se dividen en los grupos siguientes:

- 1) Relajación de tensiones (stress-relaxation).
- 2) Difracción de Rayos-X.
- 3) Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos
- 4) Técnica de Agrietamiento.

Estos grupos a su vez tienen diferentes campos de aplicación y utilizan diferentes sensibles para la medición como muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.8 Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales.

| | | |
|--|-----------------------------------|--|
| 1.1 Relajación de tensiones utilizando defómetros mecánicos y galgas eléctricas. | Aplicable principalmente a chapas | 1. Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas strain gauges. 2. Técnica de Gunnert 3. Técnica de barrenado de Mathar-Soete 4. Técnica de fresado sucesivo de Stablein |
|--|-----------------------------------|--|

Tabla 2.8 Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales. (Continuación)

| | | |
|--|--|---|
| 1.1 Relajación de tensiones utilizando defórmómetros mecánicos y galgas eléctricas | Aplicable principalmente a cilindros sólidos y tubos | 5. Técnica de maquinado sucesivo de Heyn-Bauer 6. Técnica de trepanación de Mesnager-Sachs |
| | Aplicable principalmente a sólidos tridimensionales | 7. Técnica de barrenado de Gunnert 8. Técnica de seccionado de Rosenthal-Norton |
| 1.2 Relajación de tensiones utilizando aparatos diferentes a los anteriores. | | 9. Técnica utilizando sistema divisor de retícula. 10. Técnica de barrenado con capa frágil. 11. Técnica de barrenado con capa fotoelástica |
| 2. Difracción por Rayos-x | | 12. Técnica de película de rayos-x 13. Técnica de difractómetro de Rayos-x. |
| 3. Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos. | Técnicas ultrasónicas | 14. Técnicas de ondas ultrasónicas polarizadas 15. Técnica de atenuación Ultrasónica |
| 4. Técnica de agrietamientos | | 16. Técnica de durezas 17. Técnica de agrietamiento Hidrógeno-inducido 18. Técnica de agrietamiento Esfuerzo-corrosión. |

2.4.5.1 Relajación de tensiones

En las técnicas de relajación de tensiones, los esfuerzos son determinados midiendo las deformaciones elásticas lineales liberadas. Esto ocurre cuando los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de la muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de la muestra. En la mayoría de los casos se utilizan para medir la deformación liberada, defómetros mecánicos o galgas eléctricas. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

2.4.5.2 Difracción por Rayos-x

Las deformaciones elásticas en los metales que tienen estructuras cristalinas pueden ser determinadas por la medición de sus parámetros reticulares utilizando la técnica de difracción por rayos-x. Puesto que el parámetro reticular de un metal en estado no tensionado es conocido o puede ser determinado de forma separada, las deformaciones elásticas en el metal pueden ser determinadas no destructivamente sin maquinar o barrenar. En la actualidad se tiene disponibles dos técnicas: la de la película de rayos-X y la de difracción de rayos-x. Con la técnica de difracción de rayos-x, la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una profundidad y diámetro de 0,003mm. Las técnicas de difracción de rayos-x son las únicas técnicas aplicables para medir tales esfuerzos residuales como los de cajas de bolas (rodamientos) y dientes de engranes y esfuerzos residuales superficiales posterior al maquinado o rectificado.

Sin embargo, estas técnicas por rayos-x tienen varias desventajas. Primero, son procesos lentos. En cada punto de medición se debe hacer en dos direcciones requiriendo cada una de 15 a 30 minutos de tiempo de exposición para la técnica de película. Segundo, la medición no es muy precisa, especialmente cuando se aplica a materiales tratados térmicamente en los cuales la estructura se distorsiona.

2.4.5.3 Técnicas ultrasónicas

Se han realizado intentos de determinar los esfuerzos residuales en los metales mediante la medición de propiedades sensibles a los esfuerzos. Las técnicas propuestas de medición de esfuerzos incluyen los métodos ultrasónicos y el de dureza.

Las técnicas ultrasónicas pueden utilizar las ondas ultrasónicas polarizadas y hacer uso del cambio inducido por esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas ultrasónicas polarizadas (de forma semejante a las fotoelásticas) o hacer uso de los cambios inducidos por esfuerzos en la absorción de ondas ultrasónicas; es decir, atenuación ultrasónica. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada mas allá de la etapa de laboratorio y ninguna ha sido utilizada con éxito para la medición de esfuerzos residuales en las construcciones soldadas. Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en las muestras.

2.4.5.4 Técnica de agrietamientos

Las técnicas por agrietamiento son útiles para el estudio de los esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas los cuales tienen una distribución complicada de esfuerzos residuales. Las grietas pueden ser inducidas por el hidrógeno o por el esfuerzo corrosión (stress corrosión).

Una vez que son medidas estas tensiones residuales es necesario referir los métodos comúnmente utilizados para eliminarlas y no ser víctimas de consecuencias nocivas. En el presente trabajo se propone la utilización de la técnica de relajación de tensiones (stress relaxation) utilizando galgas extensiométricas, que más adelante se explicará con detalle.