



# **Universidad Austral de Chile**

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Naval

## **GUIA PRÁCTICA PARA PREVENIR DEFORMACIONES POR SOLDADURA**

Tesis para optar al Título de:  
Ingeniero Naval  
Mención: Arquitectura Naval

Profesor Patrocinante:  
Dr. Marcos Salas Inzunza.  
Lic. Ing. Naval; M.Sc.; Ph.D.

**FRANCISCO JAVIER GONZALEZ FLORES**

**VALDIVIA-CHILE**

**2006**

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la comisión de Tesis, como requisito para obtener el Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de Ingeniero Naval, mención Arquitectura Naval.

**EXAMEN DE TITULO:**

Nota de presentación (ponderada) (1) : .....  
Nota de Examen (ponderada) (2) : .....  
Nota Final de Titulación (1+2) : .....

**COMISIÓN EXAMINADORA:**

.....  
Decano Firma

.....  
Patrocinante Firma

.....  
Informante Firma

.....  
Informante Firma

.....  
Secretario Académico Firma

Valdivia,.....

$$\text{NOTA DE PRESENTACIÓN} = \frac{\text{NC} * 0.6 + \text{Nota Tesis} * 0.2}{\text{NA}}$$

$$\text{NOTA FINAL} = \text{Nota de Presentación} + \text{Nota Examen} * 0.2$$

NC: Sumatoria de Notas Currículum, sin Tesis.

NA: Número de asignaturas cursadas y aprobadas.

# INDICE

## ÍNDICE

### RESUMEN / SUMMARY

|                     |   |
|---------------------|---|
| I INTRODUCCION..... | 1 |
|---------------------|---|

### II REVISION BIBLIOGRAFICA

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| DEFORMACIONES POR SOLDADURA..... | 2 |
|----------------------------------|---|

|   |    |
|---|----|
| 1 Deformaciones durante el proceso de soldadura.....                                      | 2  |
| 1.1 Causas de deformación.....  | 3  |
| 2 Propiedades de los metales que influyen en la deformación.....                          | 7  |
| 2.1 Coeficiente de expansión térmica.....   | 7  |
| 2.2 Conductividad térmica.....  | 7  |
| 2.3 Resistencia a la fluencia.....  | 8  |
| 2.4 Módulo de Elasticidad.....  | 8  |
| 2.5 Ejemplos comparativos entre el acero al carbono o acero dulce<br>y otros metales..... | 8  |
| 2.5.1 Acero Dulce v/s Acero Inoxidable.....   | 8  |
| 2.5.2 Acero Dulce v/s Aluminio.....   | 9  |
| 2.5.3 Acero Dulce v/s Acero de Alta Resistencia.....                                      | 9  |
| 3 Control de las fuerzas de contracción.....  | 10 |
| 3.1 Excesiva soldadura. ....  | 10 |
| 3.2 Uso de soldadura intermitente. ....   | 11 |
| 3.3 Utilización de mínimas pasadas de soldadura.....                                      | 11 |
| 3.4 Soldadura próxima del eje neutro.....   | 11 |
| 3.5 Balance de la soldadura en torno al eje neutro.....                                   | 11 |
| 3.6 Soldadura según el método de paso atrás.....  | 12 |
| 3.7 Anticipación a las fuerzas de contracción.....  | 12 |
| 3.8 Planificación de la secuencia de soldadura.....                                       | 13 |
| 3.9 Remoción de las fuerzas de contracción después de la soldadura.....                   | 14 |
| 3.10 Disminución del tiempo de soldadura.....   | 15 |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4          | Ecuaciones para calcular deformaciones. ....               | 16        |
| 5          | Tipos de control de deformaciones. ....                    | 20        |
| 5.1        | Unión en T.....  | 20        |
| 5.2        | Columna de tres miembros. ....                             | 21        |
| 5.3        | Sección cuadrada. ....                                     | 22        |
| 5.4        | Viga asimétrica. ....                                      | 23        |
| 5.5        | Secuencia de soldadura. ....                               | 24        |
| 5.6        | Pandeo y torsión. ....                                     | 27        |
| 5.7        | Almas horizontales o verticales. ....                      | 29        |
| 5.8        | Columnas esbeltas y livianas. ....                         | 32        |
| 5.9        | Control de curvatura. ....                                 | 33        |
| 5.10       | Corrección de deformaciones por flama contracción.....     | 33        |
| 6          | Técnicas de taller para el control de deformaciones.....   | 37        |
| 7          | Lista de chequeo para la disminución de deformaciones..... | 40        |
| <b>III</b> | <b>CONCLUSIONES</b> .....                                  | <b>42</b> |
| <b>IV</b>  | <b>ANEXO</b> .....   | <b>43</b> |
| <b>V</b>   | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                  | <b>53</b> |

## **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es conocer y prevenir las deformaciones térmicas que se producen cuando se sueldan distintos metales en construcción naval. Para ello, se confeccionó una guía práctica donde se reúnen y actualizan los conceptos fundamentales en el control de las deformaciones, basándose principalmente en "The procedure handbook of are welding" Ref. 10, y en trabajos realizados en los Astilleros y Maestranzas de la Armada, ASMAR (T).

Utilizando la presente guía, los Ingenieros Navales podrán comprender a cabalidad el fenómeno de las deformaciones, y en la práctica laboral desarrollar soluciones rápidas y eficaces para su control, utilizando para ello las técnicas especiales que aquí se describen, teniendo siempre presente, eso sí, que no es posible eliminarlas.

## **SUMMARY**

The objective of this work is to understand and to prevent thermal deformation that take place when different metals are welded in naval construction. For this purpose a practical guide was made to bring together and up date the fundamental concepts in the control of deformations, being based mainly on "The procedure handbook of are welding" Ref. 10, and in works carried out in "Astilleros y Maestranzas de la Armada", ASMAR (T).

Using the present guide, Naval Engineers will be able to a complete understanding of the deformation phenomenon, and in the day practice to develop a quick and effective solutions for their control, using for it the special techniques described, always having present, is not possible to eliminate them.

## I INTRODUCCION

En Chile se construyen embarcaciones en base a distintos materiales, tales como, acero, aluminio, madera, plástico, fibra de vidrio reforzado y fibras exóticas como carbono. Sin embargo, la actividad principal se centra en el acero y el aluminio. Debido a esto, las deformaciones que tienen lugar durante la soldadura, producto de los ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento, tienen gran importancia en construcción naval.

Las operaciones de corte y soldadura son unas de las principales fuentes de introducción de desviaciones respecto a lo proyectado. Por lo tanto, la precisión de estos procesos ha de ser estrictamente controlada para conseguir las tolerancias deseadas. También es importante establecer estas tolerancias dentro de límites aceptables, ya que si se exigen límites muy severos, los costos de producción se verán excesivamente elevados. La aproximación racional al problema pasa por la predicción de las deformaciones en forma precisa, sólo así, se podrán tomar las medidas necesarias sobre los factores claves.

En la actualidad, la construcción naval es altamente tecnificada, con cadenas de producción que fabrican estructuras en forma casi automatizada. Por lo tanto, la necesidad de automatización ha ido adquiriendo una importancia cada vez más relevante. Sin embargo, para llegar a esto, se requieren ciertos requisitos de calidad. Por ejemplo, para automatizar un ensamblaje de bloques, durante su prefabricación es necesario mantener las deformaciones dentro de ciertos límites críticos según tolerancias admisibles.

En nuestro país, la construcción naval esta centrada en astilleros que avanzan en la técnica del control y disminución de deformaciones durante los procesos productivos. Sin embargo, existe alternativamente, una industria artesanal de embarcaciones menores que construye sin la calidad que otorga la implementación de los actuales sistemas de diseño y manufactura.

En el marco de la realidad chilena de la construcción naval, hemos querido apoyar a los Ingenieros Navales que egresan de nuestra escuela con una Guía Práctica para Prevenir las Deformaciones por Soldadura, teniendo por objetivo el entregar una referencia bibliográfica actualizada de los conceptos fundamentales en el control de la deformación. La guía se basa principalmente en "The procedure handbook of arc welding" Ref. 10, el cual ha sido complementado con otras referencias bibliográficas y trabajos realizados en los astilleros y maestranzas de la Armada (ASMAR) (T). De tal forma, una vez finalizada la lectura de esta guía, los profesionales podrán comprender de mejor manera el fenómeno de las deformaciones térmicas, y en la práctica laboral podrá desarrollar soluciones para el control y disminución de éstas, teniendo siempre presente que no es posible eliminarlas.

## II REVISION BIBLIOGRAFICA

### DEFORMACIONES POR SOLDADURA

#### 1. Deformaciones durante el proceso de soldadura.

La deformación en una soldadura se debe a la expansión no uniforme y a la contracción tanto del metal base adyacente, como del metal de aporte durante el ciclo de calentamiento/enfriamiento. Durante dicho ciclo, muchos factores están involucrados, tornándose complicado realizar predicciones exactas de las deformaciones.

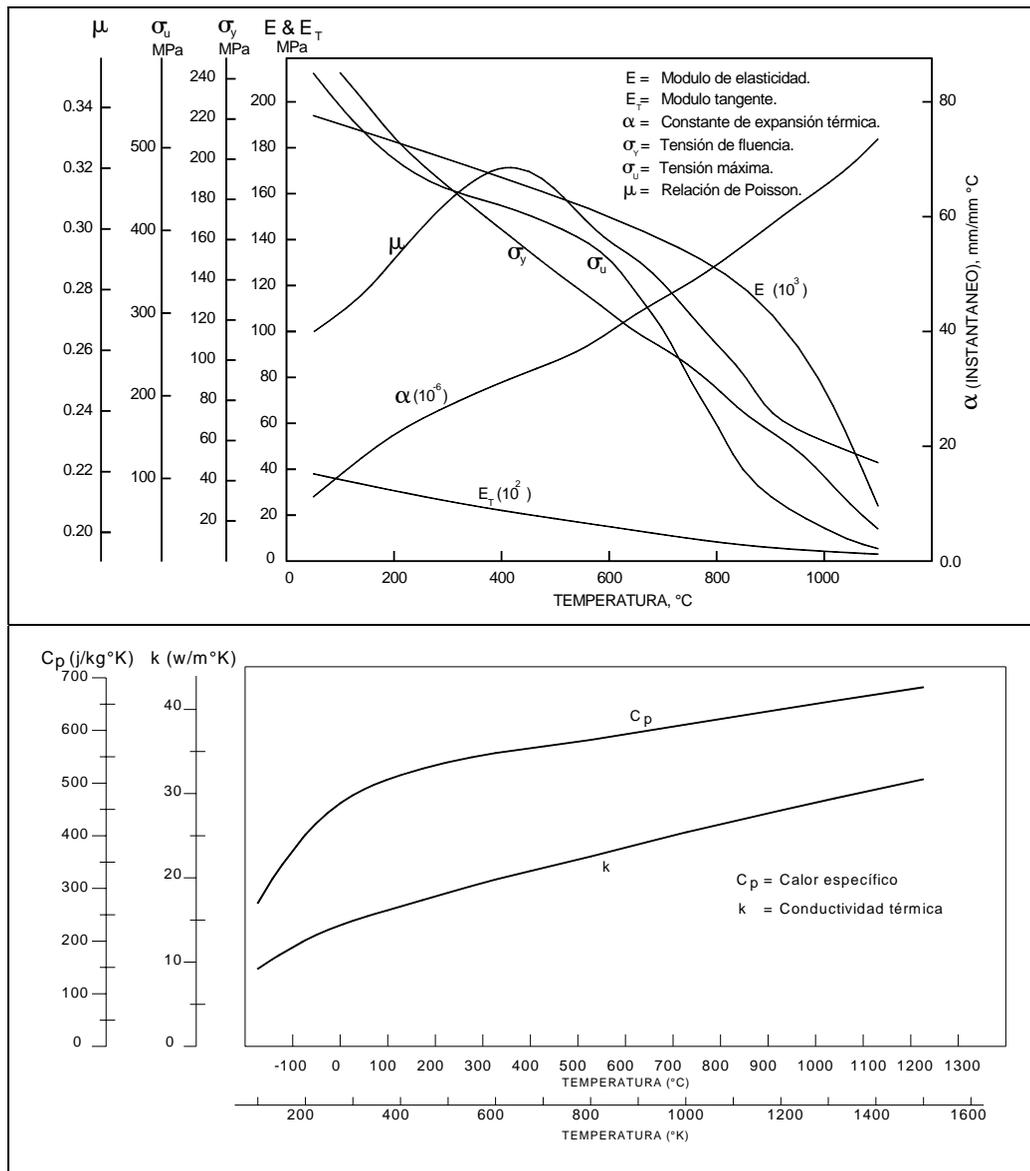


FIGURA 1.  
Cambios en las propiedades físicas y mecánicas al aumentar la temperatura  
(Acero inoxidable AISI 304, Ref. N°9).

Las Propiedades físicas y mecánicas del metal en las cuales se basan los cálculos, cambian al aumentar la temperatura. Por ejemplo, cuando la temperatura del área de la soldadura aumenta, la Resistencia a la Fluencia, Módulo de Elasticidad, y Conductividad Térmica del

material disminuyen, y el coeficiente de Expansión Térmica y el Calor Especifico aumentan (ver Figura 1). Estos cambios, a su vez, afectan el flujo de calor y uniformidad de distribución de éste. Así, estas variables hacen que un cálculo preciso de lo que ocurre durante el calentamiento y enfriamiento sea complicado.

Aún cuando el cálculo sea simple, en la fase de diseño y en taller, es importante el entendimiento práctico de las causas de las deformaciones, los efectos de las contracciones en varios tipos de uniones soldadas, métodos para controlar las contracciones y el uso de manera ventajosa de éstas.

### 1.1 Causas de deformación.

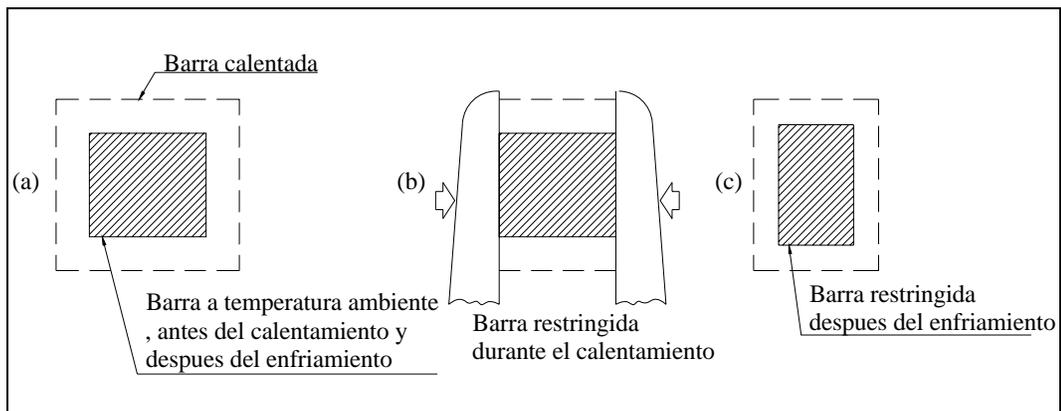


FIGURA 2.

Comportamiento de una barra de metal sometida a temperatura. Ref. N°10.

Para entender cómo y por qué las deformaciones ocurren durante el calentamiento y enfriamiento del metal, hay que considerar lo que ocurre con una barra de acero mostrada en la Figura 2. Cuando la barra está uniformemente calentada, se expande en todas direcciones, como en la Figura 2a. Cuando el metal se enfría a temperatura ambiente, se contrae uniformemente, retornando a sus dimensiones originales.

Ahora bien, si la barra de acero es restringida, por ejemplo, en un tornillo de banco, mientras está caliente, como en la Figura 2b, la expansión lateral no puede presentarse. Como la expansión volumétrica debe ocurrir, la barra se expande en forma considerable en la dirección vertical.

Como la barra deformada vuelve a la temperatura ambiente, se contraerá en todas las direcciones, como en la Figura 2c. La barra es ahora angosta pero más alta y está en un estado de permanente deformación. Por simplificación, las figuras muestran que las

deformaciones ocurren en un plano, pero en la realidad también se presentan longitudinalmente.

En una unión soldada, las mismas fuerzas de expansión y contracción actúan sobre el metal soldado y el metal base. Cuando el metal soldado solidifica y se funde con el metal base, está en su máximo estado de expansión, ocupando el máximo volumen posible como sólido. En el enfriamiento, trata de contraerse para alcanzar el volumen que normalmente ocupa a bajas temperaturas, pero es restringido por el metal base adyacente. Las tensiones desarrolladas en la soldadura, finalmente han alcanzado la fluencia del metal base. En este punto, la soldadura se estira, o fluye, ajustándose a los requerimientos de volumen a la temperatura más baja. Pero sólo aquellas tensiones que excedan la resistencia de fluencia del metal soldado son aliviadas con esta acomodación.

Cuando la soldadura alcanza una temperatura ambiente, asumiendo una restricción completa del metal base, presenta internamente tensiones a la tracción aproximadamente igual a la resistencia de fluencia del metal. Si las restricciones (abrazaderas que sostienen la pieza de trabajo, o una fuerza de contracción opuesta) son retiradas, las tensiones internas son aliviadas parcialmente, causando el movimiento del metal base, es decir, una deformación.

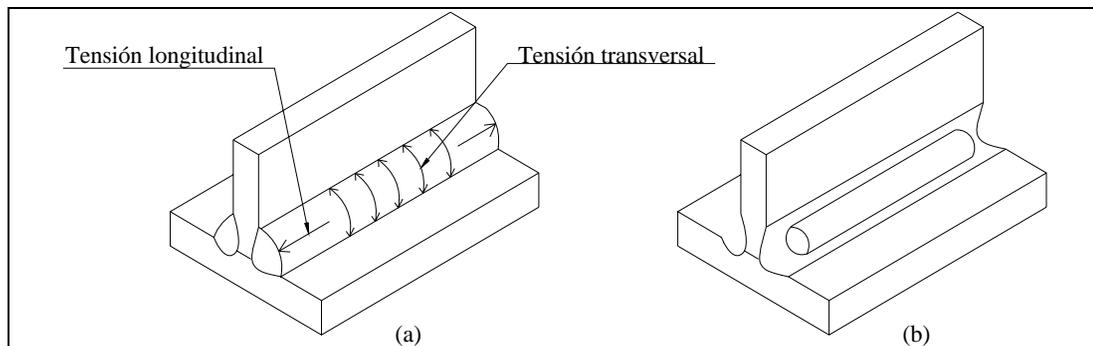


FIGURA 3.

Tensiones internas presentes en una soldadura de "filete". Ref. N°10.

Para entender mejor las tensiones internas presentes en una soldadura, se muestra la Figura 3. Soldaduras de filete que unen dos planchas gruesas, contienen tensiones longitudinales y transversales, como en la Figura 3a. Para visualizar estas tensiones en el interior de la soldadura, imagine la situación mostrada en la Figura 3b. Aquí los filetes están separados en la plancha base. Se asume que en ambos casos existe la misma cantidad de metal aportado. En su condición libre, el metal de la soldadura se encoge al volumen que normalmente ocuparía a temperatura ambiente. Está sin restricciones y libre de tensiones.

Para volver el metal de la soldadura a la condición mostrada en la Figura 3a, sería necesario tirar de éste longitudinalmente, para introducir fuerzas longitudinales, y transversalmente, para introducir fuerzas transversales. El metal de la soldadura tiene que ceder, o fluir, para alargarse, pero al mismo tiempo que alcanza las dimensiones requeridas, todavía está bajo tensión equivalente a su resistencia a la fluencia. Esta tensión residual intenta deformar la soldadura. En el caso mostrado, es improbable que las planchas puedan deformarse significativamente, porque son muy rígidas, y la soldadura, es relativamente pequeña. Sin embargo al depositar el primer filete, es probable que ocurra deformación angular, a menos que las planchas sean fuertemente sujetadas.

La contracción del metal base próximo a la soldadura se suma a las tensiones que conducen a la deformación. Durante la soldadura, el metal base próximo a esta, es calentado, casi hasta el punto de fusión. La temperatura del metal base a unas pulgadas de la soldadura es substancialmente menor. Esta gran diferencia de temperatura causa una expansión no uniforme, seguida por el movimiento del metal base, o desplazamiento del metal, si las partes a unir no son restringidas.

Al pasar el arco, el metal base se enfría y contrae simplemente el metal soldado. Si alrededor del metal, se restringe el metal base calentado, de las contracciones normales, se desarrollan las tensiones internas. Estas, en combinación con las tensiones desarrolladas en el metal soldado, aumenta la tendencia a la deformación por soldadura.

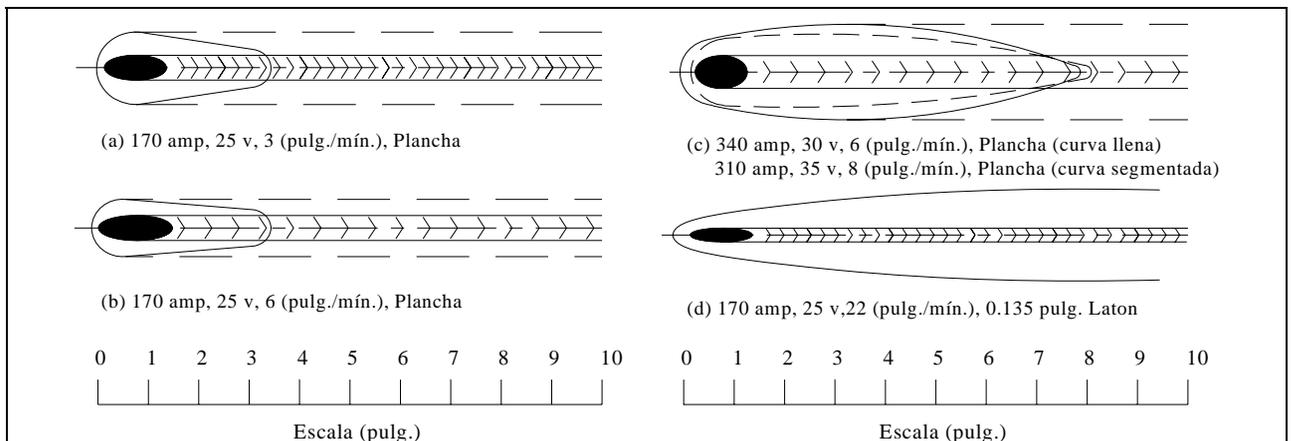


FIGURA 4.

Alta velocidad de soldadura reduce el tamaño de la contracción longitudinal en la zona del metal base próxima a la unión, minimizando las deformaciones. Ref. N°10.

El volumen del metal base adyacente que contribuye a la deformación puede ser controlado un tanto, con un adecuado procedimiento de soldadura. Altas velocidades de soldadura, por ejemplo (ver Figura 4), reducen el tamaño de la zona del metal base próxima, que se contrae a lo largo de la soldadura.

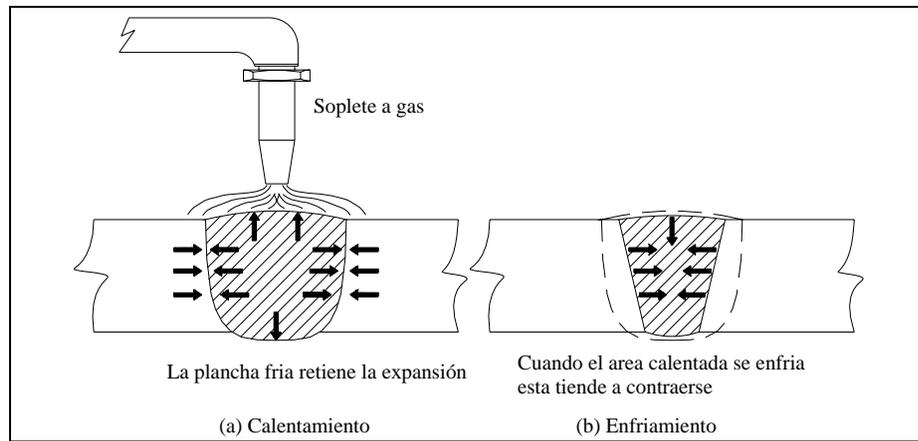


FIGURA 5.

El calentamiento con soplete (a), provoca un aumento de tamaño en la zona calentada. Al enfriarse (b), tiende a disminuir su volumen, dentro del espesor de la plancha. Ref. N°10.

El control de la expansión y contracción es aplicado satisfactoriamente a una plancha con una llama-contracción. Por ejemplo, para contraer la porción central de una plancha deformada, se dirige la llama de un soplete a una pequeña área localizada en el centro. El área, se calienta rápidamente y se expande. Pero alrededor de la plancha, que esta fría, impide que la zona calentada se expanda, en el plano de la plancha. La única alternativa es que la zona se expanda en el espesor, como se muestra en la Figura 5. En esencia, es en el espesor de la plancha donde es aplicado el calor. Al enfriarse, tiende a contraerse uniformemente en todas direcciones. Cuando se realiza cuidadosamente, la zona calentada, produce contracciones que son eficaces en la corrección de deformaciones provocadas por previos ciclos de calentamiento y enfriamiento.

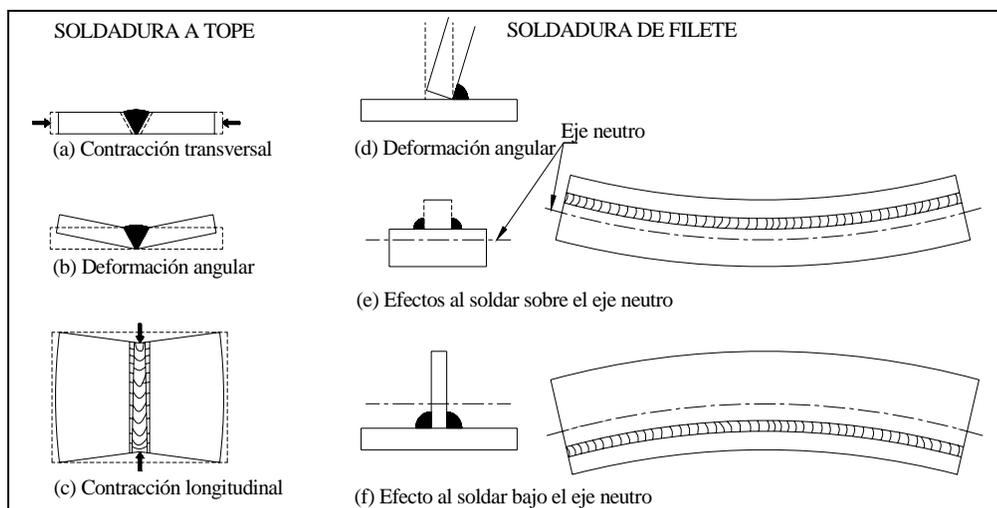


FIGURA 6.

Tipos de deformación y cambios dimensionales causados por la contracción de una soldadura. Ref. N°10.

La contracción de una soldadura causa varios tipos de deformación y cambios dimensionales. En una soldadura a tope entre dos trozos de plancha se presentan contracciones transversales, lo que se traduce en un cambio en el ancho del conjunto, como en la Figura 6a. También causa deformación angular, como se ve en la Figura 6b. Aquí, la mayor cantidad de metal soldado y temperatura sobre la unión, producen grandes contracciones en la superficie superior, causando que los bordes de plancha se levanten. La contracción longitudinal de la misma soldadura tiende a deformar la unión de las planchas, como se muestra en la Figura 6c.

La deformación angular, también se presenta en la soldadura de filete, como es mostrado en la Figura 6d. Si se suelda con filete una unión en T por sobre el eje neutro (centro de gravedad) del conjunto, los extremos tienden a curvarse hacia arriba, como se ve en la Figura 6e. Si la soldadura está por debajo del eje neutro, los extremos se curvan hacia abajo (ver Figura 6f).

## **2. Propiedades de los metales que influyen en la deformación.**

La deformación es causada por los efectos del calentamiento en el metal y su posterior enfriamiento. Esto involucra rigidez y fluencia. Propiedades mecánicas y físicas de los metales, tales como, Coeficiente de Expansión Térmica, Conductividad Térmica, Módulo de Elasticidad, y Tensión de Fluencia, influyen considerablemente en el grado de deformación. El conocimiento de los valores aproximados de estas propiedades es una gran ayuda al diseñador y al soldador para anticiparse adecuadamente a la deformación.

### **2.1 Coeficiente de Expansión Térmica, $\alpha$ [mm/mm\*°C].**

Es una medida de la cantidad de expansión que un metal sufre cuando es calentado, o la magnitud de la contracción que sufre cuando se enfría. Metales con altos coeficientes de expansión térmica se extienden y contraen más que los metales con coeficientes bajos, para un gradiente de temperatura dado. Debido a que los metales con coeficientes altos tienden a aumentar las contracciones en el metal soldado y metal adyacente a este, las posibilidades de deformaciones aumentan.

### **2.2 Conductividad Térmica, $k$ [W/m\*°K].**

Es la medida del flujo de calor a través de un material. Metales con conductividad térmica relativamente baja, por ejemplo, aceros inoxidable y las aleaciones base-níquel, no disipan el calor en forma rápida. Metales con conductividad térmica alta, como el aluminio y cobre, lo hacen rápidamente. La Soldadura en metales de baja conductividad, resulta en un aumento del gradiente de temperatura, que aumenta el efecto de contracción en la soldadura y en el metal base.

### 2.3 Resistencia a la Fluencia, $\sigma_f$ [ $N/m^2$ ].

Para aliviar la contracción que ocurre en el ciclo de enfriamiento, en una unión soldada, las tensiones del metal soldado deben alcanzar resistencia a la fluencia.

Cuando ocurre el estiramiento y adelgazamiento, la soldadura y el metal base adyacente son tensionados a aproximadamente su resistencia a la fluencia. En materiales con alta resistencia a la fluencia en el área soldada, las altas tensiones residuales pueden actuar para deformar el conjunto. Por el contrario, en metales de baja resistencia, las deformaciones son menos probables o de menor gravedad.

La resistencia a la fluencia de los metales puede ser modificada con tratamientos térmicos o mecánicos. Tratamientos de calor en acero medio-carbono, alto-carbono y aleaciones, por ejemplo, pueden aumentar considerablemente la resistencia a la fluencia. Tratamientos en frío, tienen un efecto similar en muchos aceros inoxidable y en aleaciones de cobre y aluminio. Para minimizar la deformación, los metales pueden ser soldados en un estado de temple (de baja resistencia) siempre cuando sea posible.

### 2.4 Módulo de Elasticidad, E [ $N/m^2$ ].

Es la magnitud de rigidez que presenta un determinado material. Con un módulo de elasticidad alto es más probable encontrar resistencia a la deformación.

### 2.5 Ejemplos comparativos entre el acero al carbono o acero dulce y otros metales.

CUADRO 1 Propiedades de Metales importantes en el análisis de las deformaciones.\*

| Metal                | Modulo de Elasticidad (GPa) | Tensión de Fluencia (MPa) | Coefficiente de Expansión Térmica ( $\mu m/m-^{\circ}C$ ) | Conductividad Térmica (W/m-K) |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------|---|-------------------------------|
| Acero al carbono     | 204                         | 312                       | 12  | 51                            |
| Acero inoxidable     | 196                         | 273                       | 17  | 16                            |
| Aleación de aluminio | 70                          | 105                       | 23  | 198                           |
| Aleación de cobre    | 118                         | 72                        | 17  | 367                           |

\* La información mostrada de resistencia mecánica y térmica, son aproximaciones para uso solo comparativo. La actual información para diferentes calidades y aleaciones de estos metales varia ampliamente; Por ejemplo, pequeñas cantidades de elementos de aleación tienen cambios considerables en la conductividad térmica del aluminio y cobre. Ref. 11.

**2.5.1 Acero Dulce v/s Acero Inoxidable.** La tensión de fluencia y modulo de elasticidad del acero dulce y el acero inoxidable están en el mismo rango general, indicando pequeñas diferencias en una probable deformación. La conductividad térmica en el acero inoxidable, sin embargo, es solo un tercio de la encontrada en el acero dulce. Este tiene, por ende, un incremento en el efecto de contracción. El coeficiente de expansión térmica de aceros

inoxidables es de 1 ½ veces mayor que el acero dulce, lo que aumenta la contracción en la plancha adyacente a la soldadura. De esta manera, para la misma cantidad de soldadura y el mismo tamaño de miembros, el acero inoxidable tiende a deformarse más que el acero dulce.

**2.5.2 Acero Dulce v/s Aluminio.** El coeficiente de expansión del aluminio es casi el doble que el del acero. Si los dos metales pudieran soldarse a la misma temperatura, el efecto de contracción en el aluminio sería mucho más alto. Sin embargo, la temperatura de fusión del acero dulce es considerablemente más alta que el aluminio, dejando el factor de expansión prácticamente fuera. La conductividad térmica del aluminio es aproximadamente cuatro veces la del acero dulce, lo que significa que el flujo de calor externo en el aluminio es elevado, resultando un bajo diferencial de temperatura en la plancha cercana a la soldadura. El módulo de elasticidad del aluminio es 1/3 del encontrado en el acero, produciendo altas deformaciones en el aluminio para las mismas tensiones residuales.

Los factores que aumentan o disminuyen la deformación en el aluminio y en el acero dulce están aproximadamente en equilibrio externo, indicando que la probabilidad de deformación es generalmente igual para los dos metales. Debido a la existencia de numerosas aleaciones en ambos metales, se producen variaciones en las generalidades discutidas, por lo tanto, el grado de deformación dependería de las propiedades de las aleaciones específicas a utilizar.

**2.5.3 Acero Dulce v/s Acero de Alta Resistencia.** La única diferencia significativa entre las propiedades de estos metales que afecta la deformación, es la resistencia a la fluencia. Esta es mayor en aceros de alta resistencia, sugiriendo un incremento en la deformación. Debido a su alta resistencia, es probable que se utilice una delgada sección, lo que aumentaría aun más la deformación.

3. Control de las fuerzas de contracción.

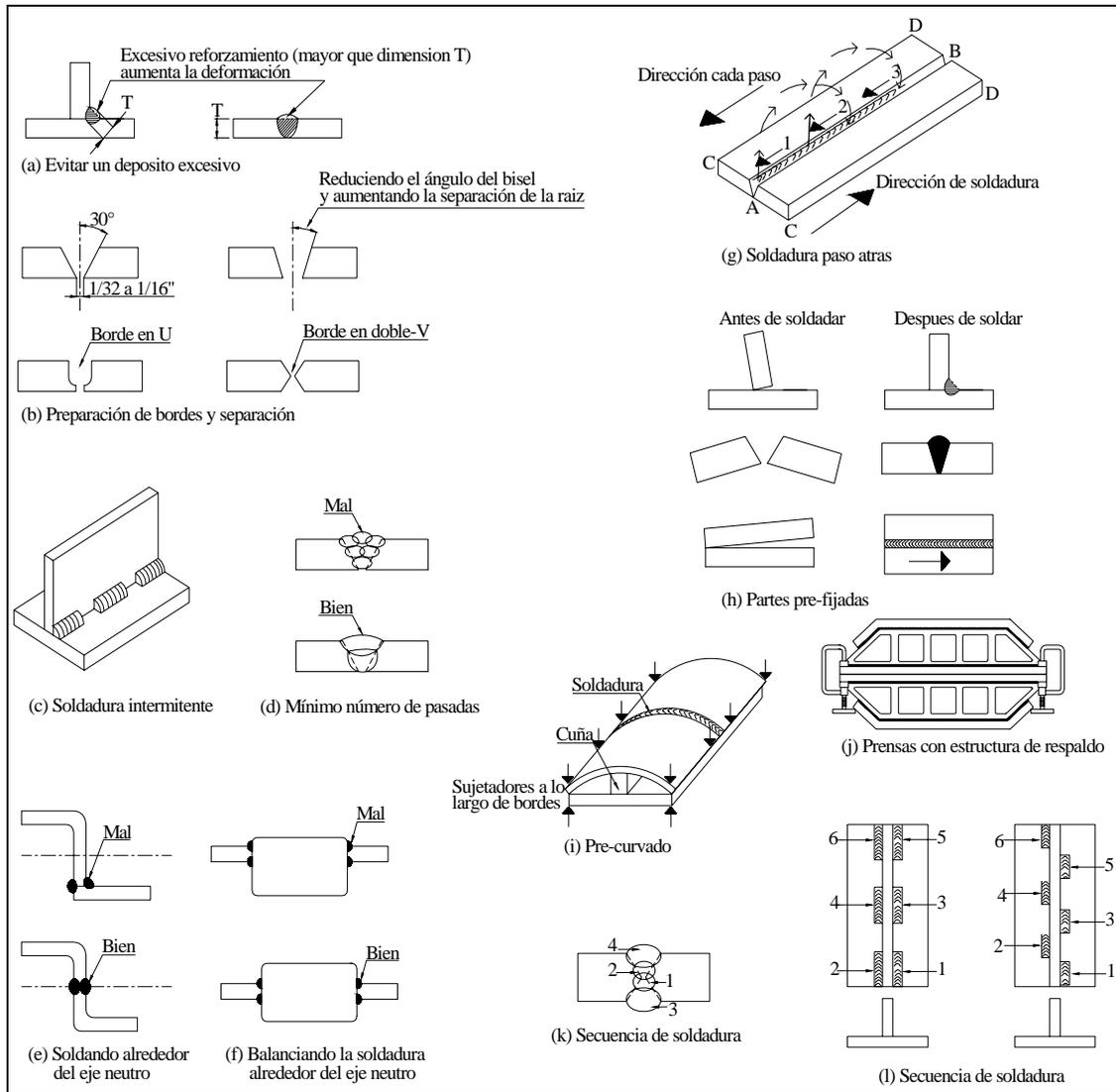


FIGURA 7.  
Técnicas que vencen o utilizan favorablemente los efectos del ciclo de calentamiento/enfriamiento. Ref. 11.

Siempre que una deformación en una soldadura pueda ser prevenida o minimizada, debe hacerse todo lo posible, tanto a nivel de diseño como en el taller. Muchas veces la contracción no puede ser prevenida, pero puede ser controlada. Para esto, pueden utilizarse algunas técnicas prácticas descritas a continuación.

**3.1 Excesiva soldadura.** Al colocar más metal en una unión, mayores son las fuerzas de contracción. El tamaño correcto de la soldadura para los requerimientos de servicio de la unión, no sólo minimiza la deformación, también ahorra metal de soldadura y tiempo. La cantidad de metal de soldadura en un filete puede ser minimizada por el uso de un cordón plano o ligeramente convexo, y en una unión a tope por una apropiada preparación de bordes y ajuste. Sólo la garganta efectiva, dimensión T, como muestra la Figura 7a, puede ser utilizada para calcular el diseño de una soldadura resistente en "filete".

El exceso de metal soldado en un cordón muy convexo no hace aumentar la resistencia admisible, sino hace aumentar las fuerzas de contracción. La preparación apropiada del borde y el ajuste de soldaduras a tope, como en la Figura 7b, ayudan a obligar el uso de cantidades mínimas de metal soldado. Para una máxima economía, las planchas pueden ser separadas de 1/32 a 1/16 de pulgada. Un bisel de 30 grados en cada lado proporciona una apropiada fusión en la raíz de la soldadura, requiriendo un mínimo de material de aporte.

En planchas relativamente gruesas, el ángulo del bisel puede disminuirse si la abertura de raíz es incrementada, o una preparación en J o U pueden ser utilizada para disminuir la cantidad de metal de aporte requerido en la unión. Una unión en doble-V requiere aproximadamente  $\frac{1}{2}$  del metal de aporte que una unión en V-simple en el mismo espesor de plancha. En general, si la deformación no es un problema, hay que seleccionar la unión más económica. Si la deformación es grave, es recomendable seleccionar una unión en la cual estén balanceadas entre sí las tensiones por soldadura, o una unión que requiera menos cantidad de metal soldado.

**3.2 Uso de soldadura intermitente.** Otra manera de minimizar el metal soldado, es soldar en forma intermitente en lugar de hacer una soldadura continua, donde sea posible, como en la Figura 7c. Al unir un rigidizador a la plancha, por ejemplo, la soldadura intermitente puede reducir el metal de aporte en un 75%, manteniendo la resistencia requerida.

**3.3 Utilización de mínimas pasadas de soldadura.** Menos pasadas con grandes electrodos, como muestra la Figura 7d, es preferible a un gran número de pasadas con pequeños electrodos, donde la deformación puede ser un problema. La contracción causada por cada pasada tiende a acumularse, es por este motivo que se incrementa el total de contracciones cuando se utilizan muchas pasadas de soldadura.

**3.4 Soldadura próxima del eje neutro.** Debido a la menor influencia que tienen las fuerzas de contracción, para mover las planchas fuera de su alineamiento, la deformación es minimizada. La Figura 7e ilustra este concepto. Ambos diseños, el de la unión y el de la secuencia, pueden ser utilizados efectivamente para el control de deformaciones.

**3.5 Balance de la soldadura en torno al eje neutro.** Esta práctica, mostrada en la Figura 7f, compensa una fuerza de contracción con otra, minimizando efectivamente la deformación por soldadura. También son factores importantes el diseño de la unión, y la correcta secuencia de soldadura.

**3.6 Soldadura según el método de paso-atrás.** En la técnica del paso-atrás, la progresión general de la soldadura puede ser, por ejemplo, de izquierda a derecha, pero cada tramo de cordón es depositado de derecha a izquierda como se ve en la Figura 7g. Cuando cada segmento del cordón es colocado, los bordes calentados se expanden, separando temporalmente las planchas en B. Sin embargo, como el calor se desplaza fuera de la sección de las planchas a C, la expansión a lo largo del borde exterior CD, vuelve a juntar las planchas. Esta separación es más pronunciada en el primer cordón. En los cordones siguientes, la expansión de las planchas es cada vez menor debido a las restricciones de las soldaduras anteriores. El paso-atrás no es efectivo en todas las aplicaciones, y no es económico utilizarlo en la soldadura automática.

**3.7 Anticipación a las fuerzas de contracción.** Al colocar, antes de ser soldadas, las partes fuera de su posición de alineación, se pueden crear contracciones que realizan un trabajo constructivo. Uniones realizadas de esta manera, se muestran en la Figura 7h. La cantidad requerida de contracción presente para tirar las planchas hasta alinearlas, puede ser determinada a través de ensayos.

El Pre-curvado de las partes a ser soldadas, como muestra la Figura 7i, es un ejemplo simple del uso de las fuerzas mecánicas opuestas que neutralizan la deformación producto de la soldadura. La parte superior de la ranura de soldadura, que puede contener el volumen del material de aporte, es alargada cuando las planchas son curvadas. Por esto, la soldadura final es ligeramente más larga que si se hubiera hecho en una plancha plana. Después de soldar, cuando las restricciones son retiradas, la soldadura libera sus tensiones de contracción longitudinal en un acortamiento lineal. Las dos acciones coinciden, y las planchas soldadas asumen la deseada forma plana.

Otra práctica común para el balanceamiento de las fuerzas de contracción es colocar, sujetadas firmemente, soldaduras idénticas en posiciones opuestas, como muestra la Figura 7j. La soldadura se realiza en ambas uniones, dejando enfriar antes de soltar las sujeciones. El pre-curvado puede combinarse con este método insertando cuñas en determinadas posiciones entre las partes, antes de ser sujetadas.

La soldadura pesada, particularmente la rigidización de miembros y su disposición relativa, puede proporcionar las fuerzas de balance requeridas. Si estas fuerzas no están presentes en forma natural, es necesario usar otros medios para neutralizar el encogimiento del metal soldado por acción de las fuerzas de contracción. Esto puede ser logrado equilibrando una fuerza de contracción con otra o creando una fuerza contraria a través del sujetador. Las fuerzas contrarias pueden ser otras fuerzas de contracción, fuerzas de restricción impuestas por sujetadores, soportes, o accesorio; fuerzas de restricción por la disposición

de miembros en la unión; o las fuerzas de hundimiento en un miembro debido a la gravedad.

**3.8 Planificación de la secuencia de soldadura.** Una buena planificación de la secuencia de la soldadura involucra la posición del metal de aporte en diferentes puntos sobre la unión, ya que la estructura se contraerá en un lugar, neutralizando las fuerzas de contracción de la soldadura realizada. Un ejemplo de esto es soldar alternadamente en ambos lados del eje neutro realizando una soldadura a tope, como en la Figura 7k. Otro ejemplo, en una soldadura del filete, consiste en realizar las soldaduras intermitentes según la secuencia mostrada en Figura 7l. En estos ejemplos, la contracción en N° 1 es equilibrada por la contracción en N° 2, y así sucesivamente.

Probablemente los medios mas ampliamente utilizados para controlar las deformaciones en pequeñas uniones o componentes son las pinzas, alineadores y soportes sujetadores que bloquean las partes en una posición deseada y las sostienen hasta que la soldadura es finalizada. La fuerza de sujeción proporcionada por éstos elementos aumentan las tensiones internas en la soldadura hasta alcanzar el punto de fluencia del metal soldado. Para soldaduras típicas de planchas de bajo carbono, estos niveles de tensiones pueden aproximarse a  $310 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  (Pa).



FIGURA 8.

Bloque de alargamiento de un buque pesquero Atunero. Este es un ejemplo de planificación de la secuencia de soldadura. Las deformaciones deben estar controladas para que una vez finalizada la construcción el bloque mantenga sus dimensiones de diseño, y de esta manera, ajuste en forma correcta con el bloque del buque existente. Ref. 12.

Después de soltar la pieza soldada de los alineadores o pinzas, se podría esperar que las tensiones causaran considerables movimientos o deformaciones. Sin embargo, esto no ocurre, ya que la deformada (unidad de contracción) con estas tensiones es muy baja comparada con la cantidad de movimiento que puede ocurrir si no las sujetáramos durante la unión. Por ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{Modulo de elasticidad (E)} &= \text{tensión } (\sigma) / \text{Deformación } (\varepsilon) \\ \varepsilon &= \sigma / E \text{ acero} \\ \varepsilon &= 310 \times 10^6 / 206,8 \times 10^9 \\ \varepsilon &= 0,0015 \text{ [m/m]} \end{aligned}$$

**3.9 Remoción de las fuerzas de contracción después de la soldadura.** El martillado es una manera de contrarrestar las fuerzas de contracción del cordón de soldadura, cuando este se enfría. Esencialmente, el martillado estira un cordón y lo adelgaza, aliviando (por deformación plástica), las tensiones inducidas por contracción del metal enfriado (Ref. 15). Sin embargo, este método debe usarse con cuidado. Por ejemplo, la raíz de un cordón nunca debe ser martillada, debido al peligro de ocultar una grieta o causar una. Generalmente, el martillado no es permitido en la pasada final, debido a la posibilidad de cubrir una grieta e interferir con la inspección, debido al efecto del endurecimiento. Así, la utilidad de la técnica es limitada, aunque se han presentado casos donde entre las pasadas se martilla demostrando ser una solución sólo para problemas de deformación o agrietamiento.

Otro método para remover las fuerzas de contracción, es a través del alivio de tensiones controlando el calentamiento en la soldadura a una elevada temperatura, seguido por un enfriamiento controlado. Muchas veces, dos piezas idénticas se sujetan espalda con espalda, posteriormente soldadas, aliviándose así, las tensiones residuales que tenderían a deformar las soldaduras, mientras se permanezca en esta condición recta.

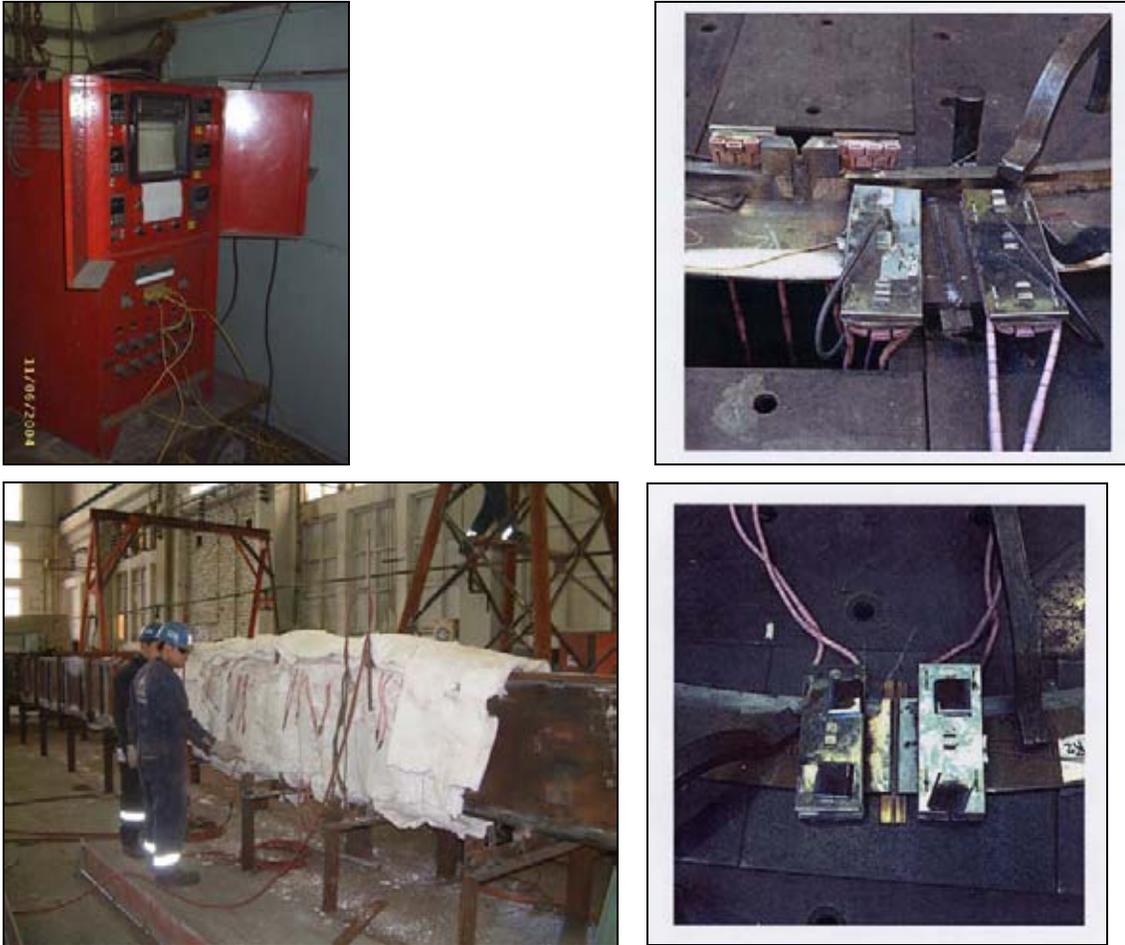


FIGURA 9.

Equipo Cooperheat utilizado para realizar tratamientos térmicos. Se observa técnica de alivio de tensiones en una viga cajón, y elementos de calentamiento en una unión de cuaderna de un submarino. Ref. 12.

**3.10 Disminución del tiempo de soldadura.** Complejos ciclos de calentamiento y enfriamiento tienen lugar durante una soldadura, y el tiempo requerido para la transmisión de calor, es un factor que afecta la deformación. En general, es deseable terminar la soldadura rápidamente, antes de que un gran volumen de metal circundante se caliente y se expanda. El proceso de soldadura utilizado, el tipo y tamaño de electrodo, corriente de soldadura, y velocidad de movimiento, afectan el grado de contracción y expansión del material de aporte.

El uso de electrodo manual con recubrimiento de hierro en polvo o un equipo de soldadura mecanizado reducen el tiempo de soldadura y la cantidad de metal afectado por el calor y, por consiguiente, la contracción. Por ejemplo, depositando un tamaño dado de soldadura en el espesor de la plancha con un proceso que opera a 175 amp, 25 v, y 3 ppm requiere 87.500 joules de energía por pulgada lineal de soldadura. El mismo tamaño de soldadura, producido con un proceso que opera a 310 amp, 35 v, y 8 ppm requiere 81.400 joules por pulgada lineal. La diferencia representa el calor excesivo, el cual se expande más de lo necesario alrededor del metal circundante.

4. **Ecuaciones para calcular deformaciones.** La contracción transversal por soldadura (contracción perpendicular al eje de la unión soldada), es particularmente importante cuando la contracción de soldaduras individuales es acumulativa, como por ejemplo, en la conexión transversal de una viga a un puntal de una gran construcción. A menos que se permita tener contracciones transversales por soldadura, la acumulación de contracciones de distintas uniones de vigas a puntales, puede llegar a ser tan grande, que las dimensiones de la construcción pueden ser modificadas.

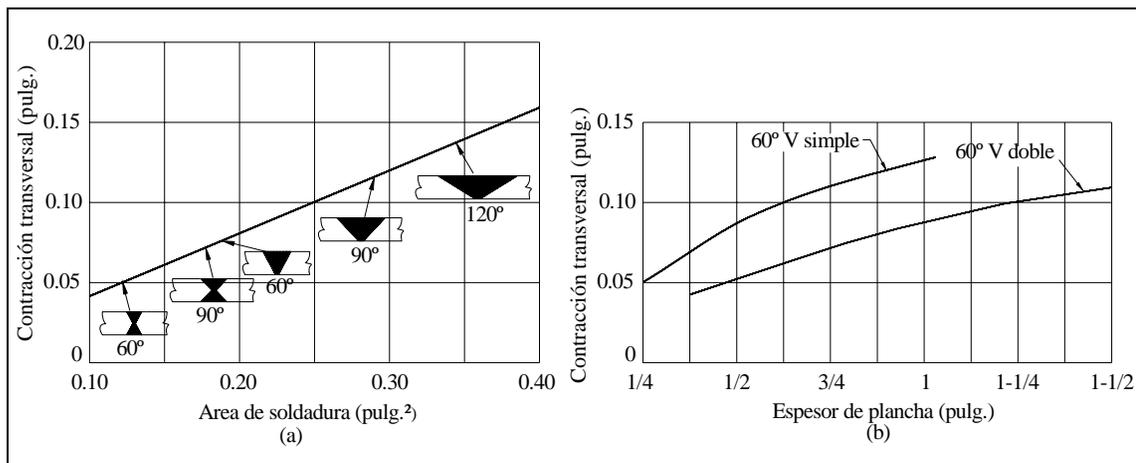


FIGURA 10.

Contracciones transversales en una plancha de 1/2". El tamaño de los ángulos mostrados en este gráfico es solo ilustrativo. Ángulos sobre los 60° son raramente utilizados. Ref. 10.

Para unir un espesor dado, las contracciones transversales aumentan directamente con el área transversal de la soldadura, como muestra la Figura 10a. La contracción transversal en uniones con ángulos de 60° con bisel simple y doble bisel en distintos espesores de plancha es mostrada en la Figura 10b.

Una aproximación a la contracción transversal para otros ángulos o tamaño de unión, puede ser estimada por:

$$\text{Contracción Transversal} = 0.10 A / t \text{ [pulgadas]}$$

donde:

A = área de la sección transversal de la soldadura en pulg².

t = espesor de soldadura en pulgadas.

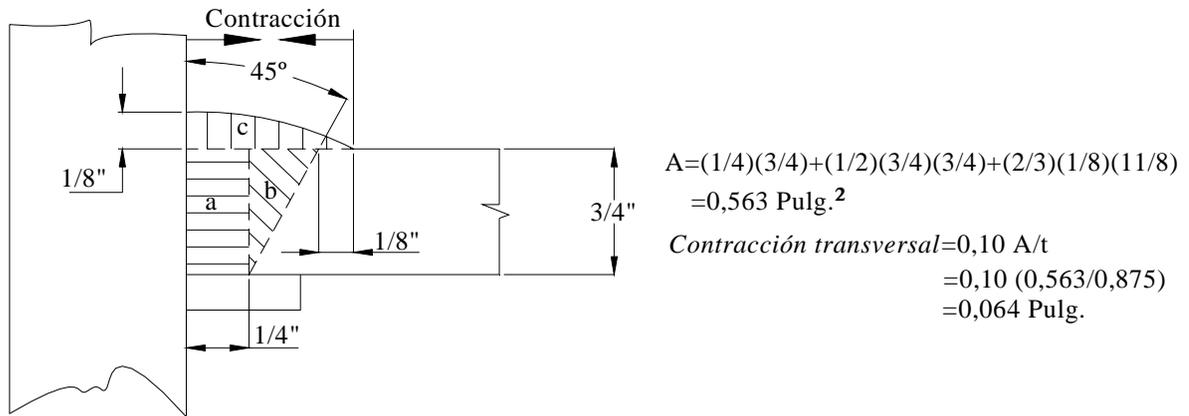


FIGURA 11.  
Ecuación para determinar la contracción transversal a través del área soldada.

Otra manera de explicar esta relación es que las contracciones transversales sean iguales a un décimo del espesor medio del área soldada, como se observa en el ejemplo de la Figura 11. Cuando se utiliza un proceso de penetración completa (tal como el proceso de arco-sumergido), la sección transversal de la zona por completo fundida en la unión (no solo el área del metal depositado) debe ser utilizada en el cálculo.

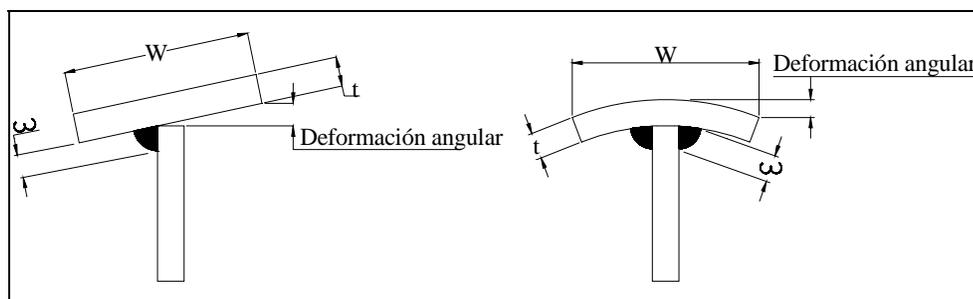


FIGURA 12.  
Parámetros que determinan deformación angular. Ref. 10.

Los parámetros que muestra la Figura 12, interactúan de la siguiente manera: la deformación angular varía directamente con el ancho de la platabanda  $W$  y el tamaño del cordón  $\omega$ , e inversamente con el espesor de la platabanda.

CUADRO 2 Valores de  $\omega^{1.3}$  a utilizar en la ecuación de deformación angular. Ref. 10.

| Tamaño del cordón $\omega$<br>(pulgadas) | Valores de $\omega^{1.3}$ |
|--|---------------------------|
| 3/16                                     | 0,114                     |
| 1/4                                      | 0,165                     |
| 5/16                                     | 0,220                     |
| 3/8                                      | 0,280                     |
| 7/16                                     | 0,342                     |
| 1/2                                      | 0,406                     |
| 9/16                                     | 0,474                     |
| 5/8                                      | 0,543                     |
| 3/4                                      | 0,688                     |
| 7/8                                      | 0,841                     |
| 1  | 1,00                      |

La ecuación es:

$$\text{Deformación Angular} = 0,02 W \omega^{1.3} / t^2 \text{ [pulgadas]}$$

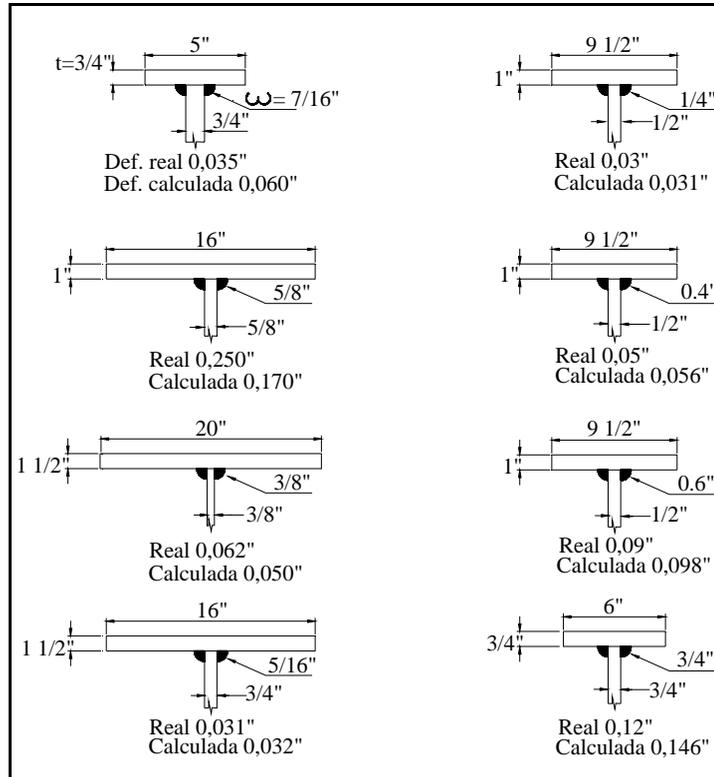


FIGURA 13.

Valores medidos y calculados de deformaciones angulares para ocho diferentes combinaciones de platabanda y alma. Ref. 10.

La relación entre valores medidos y calculados para las deformaciones angulares, como muestra la Figura 13, verifica la validez de la ecuación. En sólo una de las combinaciones ilustradas se acerca al límite permisible por la AWS, 1% del ancho de la platabanda o 6,35 mm (1/4"), el mayor de los valores. En este caso, el exceso de soldadura es obvio.

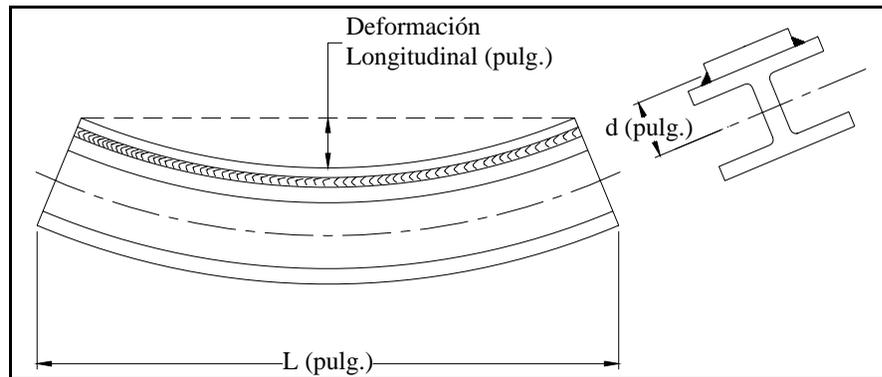


FIGURA 14.  
Área de la sección transversal del metal soldado y distancia entre el centro de gravedad de la soldadura y el eje neutro. Ref. 10.

La flexión longitudinal, o curvado, es el resultado de una fuerza de contracción aplicada a pequeña distancia del eje neutro del conjunto. La magnitud de la deformación depende del momento de contracción y de la resistencia del conjunto a flectar, que es representado por su momento de inercia.

Suponiendo que no existen tensiones iniciales, la siguiente ecuación puede utilizarse para calcular la deformación de un miembro o conjunto, resultado de la soldadura longitudinal:

$$\text{Deformación Longitudinal} = 0,005 A d L^2 / I \text{ [pulgadas]}$$

Donde:

A = Área total de la sección transversal del metal soldado y el metal base fundido en pulg<sup>2</sup>. Puede ser estimada desde el tamaño del cordón  $\varpi$ .

I = Momento de inercia del conjunto en pulg<sup>4</sup>.

L y d = Longitud y distancia identificadas en la Figura 14.

La deformación longitudinal varía directamente con; el área de la sección transversal del metal soldado, la distancia entre el centro de gravedad de la soldadura y el eje neutro y la longitud del miembro al cuadrado; e inversamente con el momento de inercia del miembro.

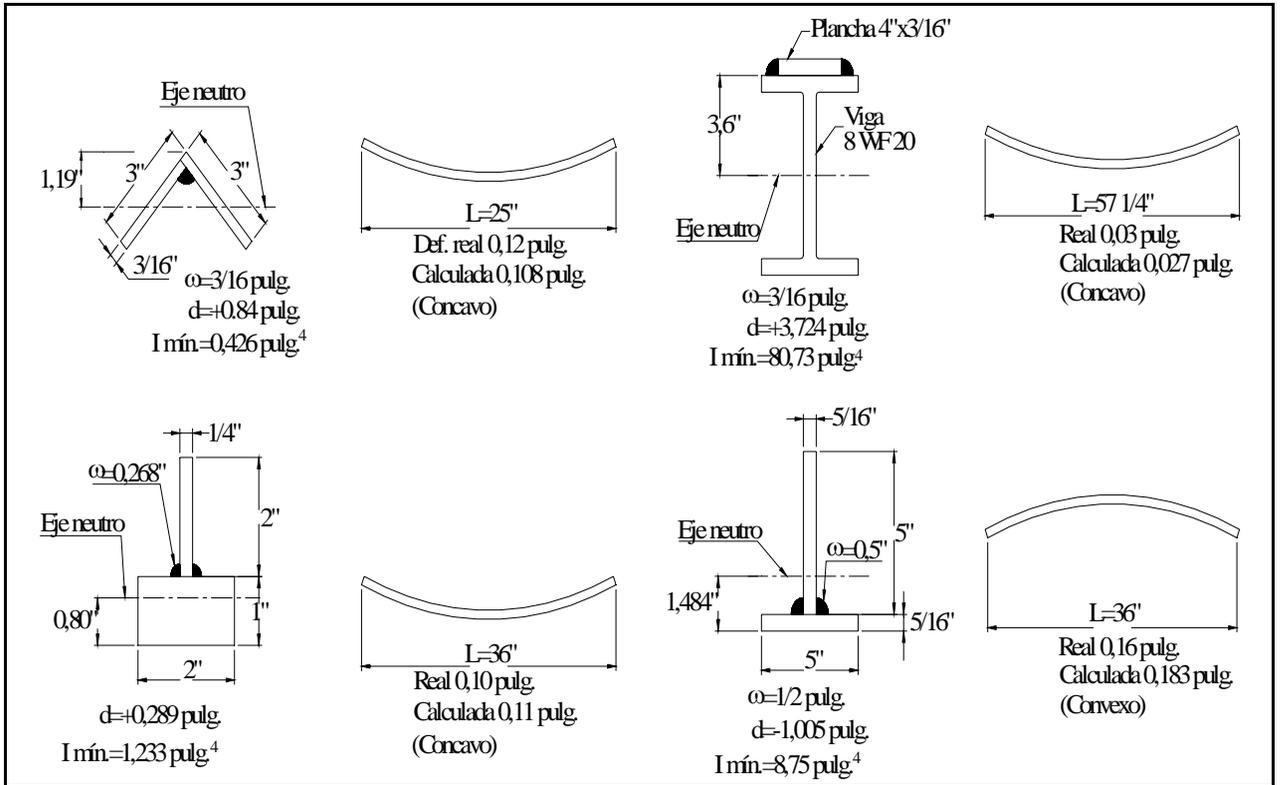


FIGURA 15.

Relación entre valores calculados y medidos de deformación longitudinal para varios tipos de unión. Ref. 10.

## 5. Tipos de control de deformaciones.

### 5.1 Unión en T.

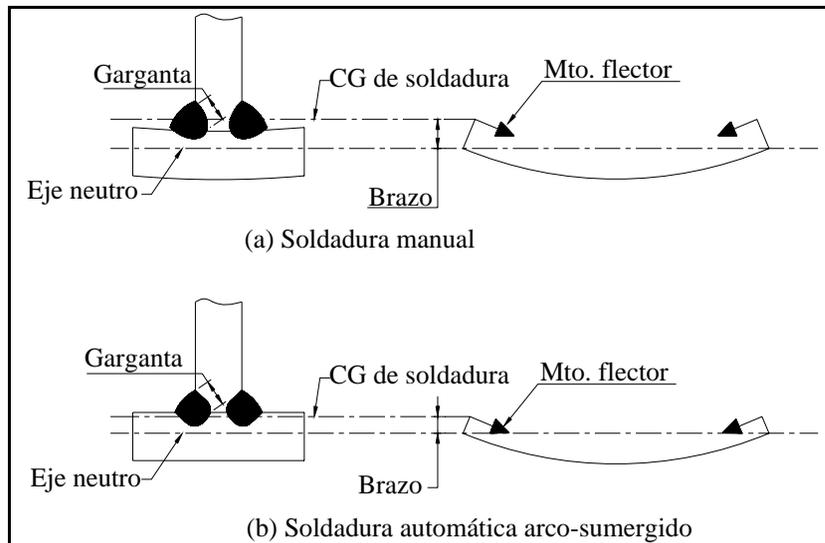


FIGURA 16.

Comparación de la deformación lateral producida en dos tipos de soldaduras. Ref. 10.

Una unión T soldada manualmente, como muestra la Figura 16a, sufre deformación lateral después de ser soldada, pese a haber utilizado un tamaño de filete adecuado. El análisis mostró que el centro de gravedad de los dos cordones de soldadura está sobre el eje neutro. Al cambiar la profundidad de la penetración, en una soldadura automática de arco sumergido, el centro de gravedad de la soldadura fue bajado, como muestra la Figura 16b, reduciendo sustancialmente el momento por contracción. La profundidad, o garganta, de la soldadura es la misma, pero ahora el metal de aporte está más cercano al eje neutro. Además, la alta velocidad de la soldadura automática reduce las deformaciones.

## 5.2 Columna de tres miembros.

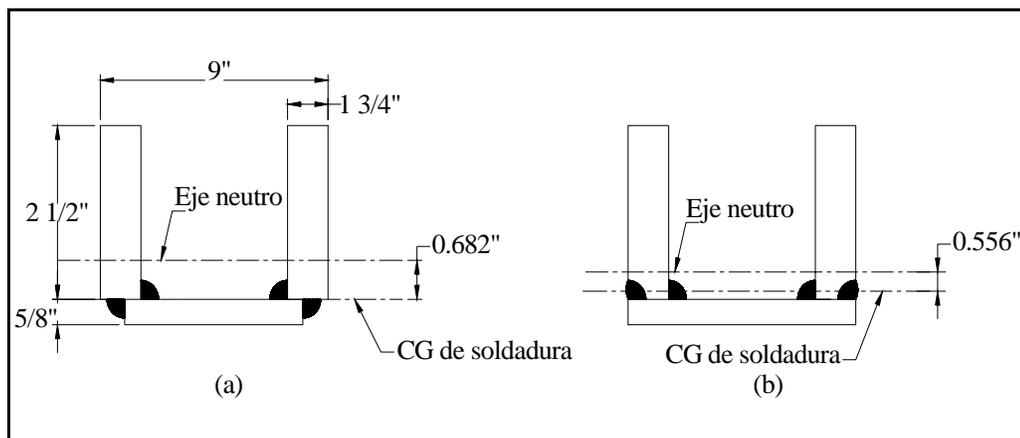


FIGURA 17.  
Efecto de la distancia entre el centro de gravedad de la soldadura el eje neutro de la sección en la deformación longitudinal. Ref. 10.

La soldadura de una columna mostrada en una vista transversal en la Figura 17a esta balanceada y puede ser realizada volteando la columna. Sin embargo, la deformación longitudinal resulta ser excesiva:  $7/16''$  por cada  $100''$  de longitud. Los análisis muestran que la distancia entre el centro de gravedad de la soldadura y el eje neutro de la sección es de  $11/16''$ . Si se pudiera reducir la separación por un cambio en el diseño, pudiesen presentarse menores deformaciones.

Una manera de poner la soldadura mas cerca del eje neutro es mostrada en la Figura 17b. Con este diseño, la distancia es reducida a  $9/16''$ . Cálculos de deformación, muestran que la deformación puede ser reducida a  $5/16''$  por cada  $100''$  de longitud. Si la magnitud de la deformación no es admisible, los miembros de la columna pueden ser pre-curvados sobre  $5/16''$  en la dirección opuesta para que la unión pueda ser plana después de ser soldada.

### 5.3 Sección cuadrada.

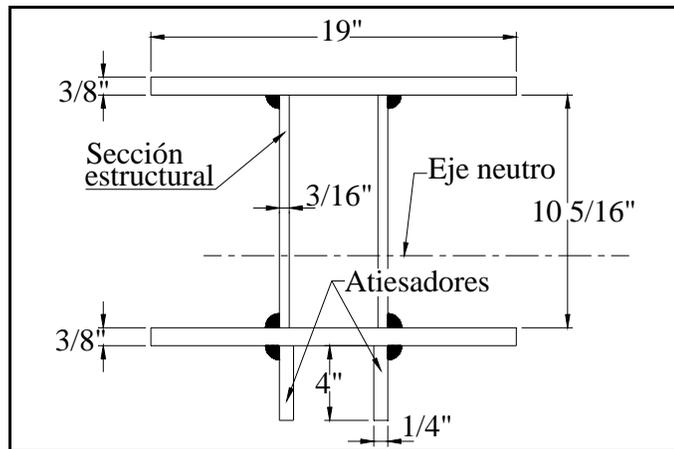


FIGURA 18.

Atiesadores unidos a las piezas a soldar. Ref. 10.

El bajo peso de la sección de una pluma mostrada en la Figura 18 ejemplifica la importancia del método de unión en la reducción de deformaciones. Un método de montaje es el de soldar atiesadores en todas las piezas que serán soldadas posteriormente, produciendo una unidad rígida con fuerzas contrarias para resistir las generadas por la contracción. Estudios indican que el centro de gravedad del metal de aporte puede ser 1 1/8" desde el eje neutro de la sección. En una longitud de 63", la flexión calculada por la ecuación de deformación longitudinal es 1/250 ".

Un segundo método puede ser el soldar primero la sección cuadrada, que no produciría deformaciones debido a la coincidencia exacta del centro de gravedad del metal de aporte con el eje neutro. La deformación se presentaría al soldar las dos planchas de refuerzo de 1/4 ". La distancia entre el centro de gravedad de los refuerzos soldados y el eje neutro es de 4". Calculando la deformación en una longitud de 63", sería de 1/170 ". Por lo tanto, la deformación en el montaje utilizando esta secuencia sería 1,5 veces mayor que la producida en el primer método.

#### 5.4 Vigas asimétricas.

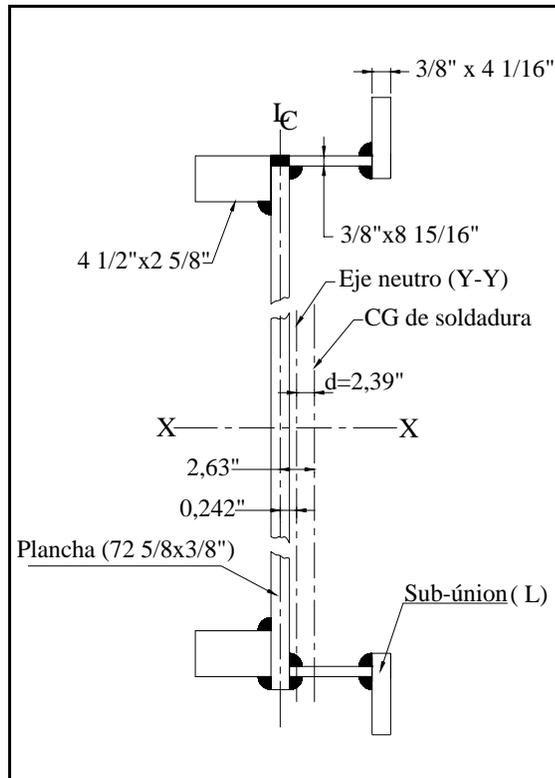


FIGURA 19.  
Soldadura en una viga que cubre una luz de 504" dentro de una estructura. Ref. 10.

En la viga representada en la Figura 19, inspecciones muestran que los cordones están balanceados respecto al eje horizontal (X-X), y además, la sección es simétrica respecto a este, por lo tanto, no debería presentarse deformación vertical como resultado de la soldadura. El eje neutro vertical (Y-Y) es calculado a 0,242" a la derecha de la línea central del alma. La sección es simétrica respecto a este eje vertical, por lo tanto, si la soldadura esta balanceada respecto al alma, se puede presentar una pequeña flexión horizontal.

Sin embargo, la soldadura no esta centrada respecto al eje neutro vertical; cálculos determinan que el centro de gravedad de toda la soldadura esta a 2,63" a la derecha de la línea central del alma. La distancia  $d$  entre el eje neutro y el centro de gravedad de la soldadura es de 2,39", por lo tanto, la flexión horizontal para una longitud de 504", es de 2,39". Esta desviación puede ser corregida utilizando el método de llama-contracción.

Otra posibilidad podría ser el soldar dos partes con forma de L como sub-conjunto. Como unidades independientes, estas pueden tener un eje neutro aproximadamente a 3" desde el centro de gravedad de sus dos cordones de 0,252". Cálculos muestran que la soldadura, en una longitud de 504", puede causar que los extremos se desplacen excesivamente cerca de 5 1/8" a la derecha.

Los sub-conjuntos en forma de L pueden ser divididos en pequeñas partes y ser unidos con soldadura a tope. Como la longitud  $L$  en la ecuación de flexión es un término al cuadrado, cualquier reducción en la longitud disminuye apreciablemente la flexión. Si la sección en forma de L fuese soldada en la mitad de la longitud, el movimiento del extremo puede ser menor que 1,3", una magnitud que es fácil de corregir. Después de soldar la sección en forma de L, esta podría unirse en el extremo de la viga. De esta manera, la mayoría de la soldadura quedaría a lo largo del eje neutro vertical, y no debería presentarse deformación. Se recomienda un proceso de soldadura rápido, evitando múltiples pasadas de soldadura.

### 5.5 Secuencia de soldadura.

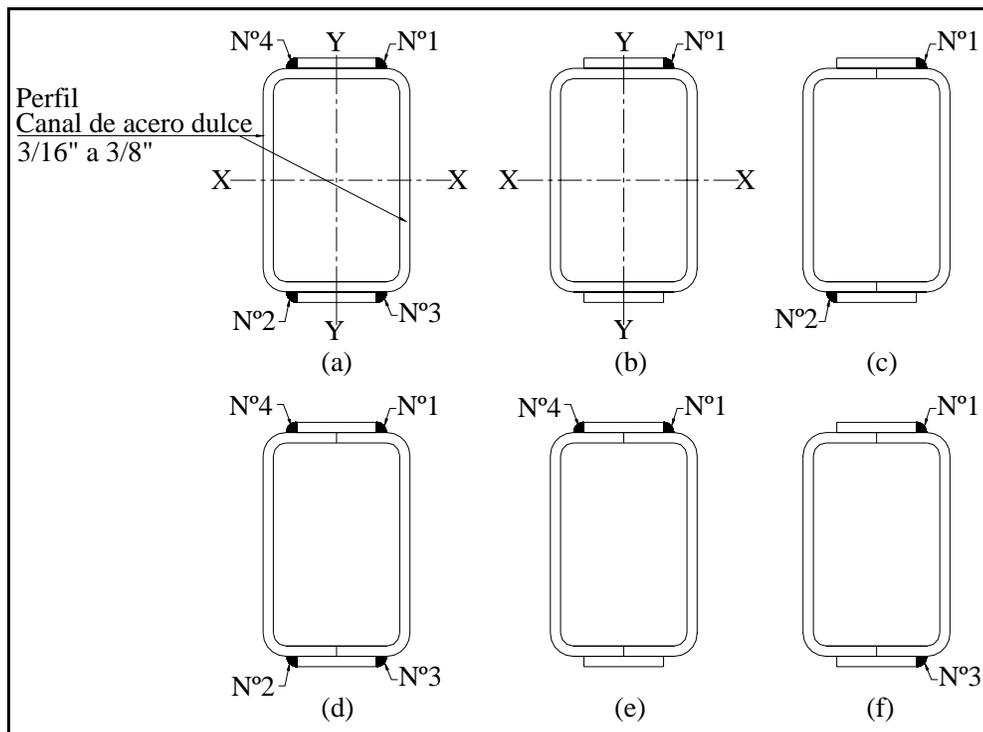


FIGURA 20.

Posibles deformaciones causadas por distintas secuencias de soldaduras. Ref. 10.

Si se quiere soldar estructuras de diferentes longitudes y espesores, de perfiles canal y planchas de acero dulce, como en la secuencia de la Figura 20a, se debe tener en cuenta que las contracciones del metal soldado y la plancha adyacente pueden producir fuerzas de tracción. Si el resultado es una tensión de compresión en el miembro que no excede la resistencia a la fluencia, la secuencia es innecesaria. Cuando la soldadura no es muy grande y la sección es simétrica siendo las soldaduras balanceadas sobre el eje neutro, después de la cuarta soldadura, las tensiones de compresión pueden estar uniformemente repartidas por toda la sección. Sin embargo, surge la interrogante de si es o no excedido el límite de fluencia en compresión.

Después que la primera soldadura es realizada, Figura 20b, el cordón y una de las planchas están en tensión. Fuerzas de compresión existen en el resto de los miembros, por lo que se pueden considerar como una columna excéntricamente cargada. Si la soldadura es bastante grande, las tensiones resultantes pueden exceder el punto de fluencia del miembro y causar deformación permanente. Cuando la soldadura N°2 es realizada, Figura 20c, debe resultar la misma, pero opuesta distribución de tensiones. Sin embargo, si la primera soldadura fue realizada en un estado de permanente rigidez, el segundo cordón no tira al miembro de respaldo a la condición recta.

Si ambas soldaduras son realizadas simultáneamente, resulta una distribución uniforme de tensiones, y no hay movimiento o efecto de flexión. Además, las tensiones son mucho más reducidas, y es menor la posibilidad que pueda ser excedido el punto de fluencia. Finalmente, las dos soldaduras restantes son realizadas simultáneamente, como muestra la Figura 20d. La distribución de tensiones puede ser aun más uniforme y no producir efectos de flexión.

La Figura 20e muestra las soldaduras N°1 y N°4 realizadas al mismo tiempo en un plano horizontal. Puede presentarse leve flexión debido a la probabilidad de ser excedido el punto de fluencia, y las dos soldaduras restantes pueden no ser capaces de enderezar el conjunto.

Si la soldadura es realizada en la dirección transversal, que es mayor, como muestra la Figura 20f, la flexión podría presentarse en el eje Y-Y. Tal miembro tendría mínima utilidad estructural.

Por lo tanto, es necesario acomodar la estructura para poder soldar los dos cordones más cercanos, en forma simultánea, resultando una despreciable flexión sobre el eje X-X.

Si las soldaduras 3 y 4 también son realizadas simultáneamente, se logran las menores deformaciones. Sin embargo, este es un procedimiento que a menudo no es practicable. Un procedimiento más común sería soldar 1,4,2,3 en orden, resultando una leve curvatura.

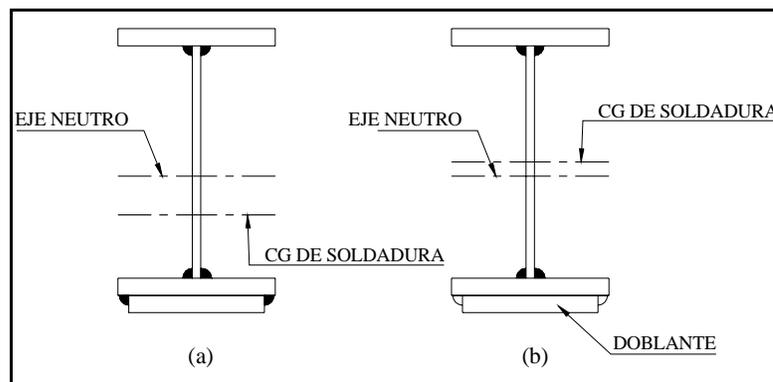


FIGURA 21.

Desplazamiento del centro de gravedad según el número de cordones utilizados en soldaduras de una viga de acero de alta resistencia. Ref. 10.

La viga mostrada en la Figura 21, necesita más área de ala inferior debido a la cubierta de concreto y al momento flector que debe soportar. La resistencia y tensión aceptables para este acero disminuyen con el aumento del espesor. Dos planchas de  $\frac{3}{4}$ " son utilizadas como alas debido a su alta resistencia, que una única plancha de  $1\frac{3}{4}$ " así ahorramos un 16% en acero.

Se podrían colocar restricciones a la viga, y entonces soldar la unión. Sin embargo, existirían cuatro soldaduras de filete en la base de la viga y dos en la parte superior, una condición desbalanceada. En este ejemplo, el centro de gravedad de las seis soldaduras es considerablemente mas bajo que el eje neutro del miembro, provocando que la soldadura desplace los extremos de la viga hacia abajo, produciendo una curvatura.

El método mas adecuado puede ser soldar en primer lugar la plancha de respaldo o doblante a la plancha inferior. Si la deformación ocurre, la resistencia de la sub-unión no tendría problema. Entonces, cuando esta sub-unión y el ala superior son soldadas al alma, solo cuatro filetes de soldadura le producen deformación, y el centro de gravedad de las cuatro soldaduras esta mucho más cerca del eje neutro. La flexión debido a la soldadura puede ser directamente proporcional a la cantidad de metal soldado y a la distancia entre el centro de gravedad de la soldadura y el eje neutro, e inversamente proporcional a la resistencia flectora (momento de inercia) de la unión.

Al modificar la secuencia de soldadura del primer método al segundo, reducimos el número de cordones que influyen en la formación de deformación de 6 a 4. En otras palabras, la soldadura tiene solo dos tercios del efecto de deformación. La distancia  $d$  es reducida aprox. a la mitad. La resistencia a la flexión, por su puesto, permanece constante. Teóricamente, la segunda secuencia produciría solo un tercio de la deformación ( $\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{3}$ ). El centro de gravedad de la soldadura en este caso podría estar cerca del eje neutro, lo que produciría que la deformación pudiera presentarse en la dirección opuesta-extremo superior.

De cualquier modo, se debe recordar que si la deformación en el primer método no es excesiva, pudiera no ser adecuado el cambio de método, el cual podría requerir enderezar la unión del ala inferior con el doblante.



FIGURA 22.  
Uniones soldadas automatizadas. Ref. 12.

### 5.6 Pandeo y Torsión.

Las fuerzas de contracción de la soldadura es una función al cuadrado y la resistencia al pandeo es una función al cubo del espesor del material. Se sabe que el pandeo debido a la soldadura de un panel se incrementa directamente con la disminución del espesor.

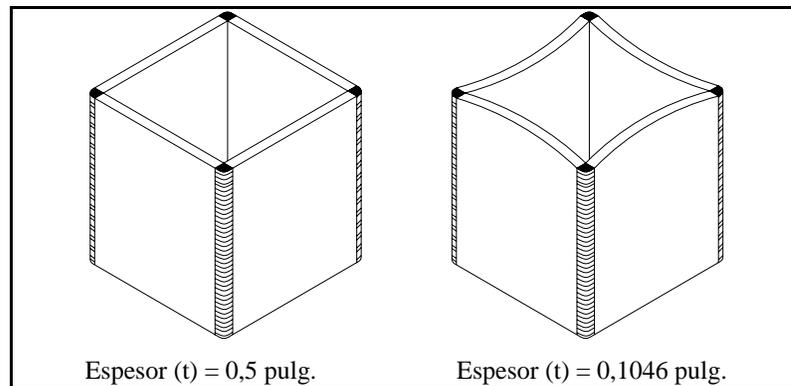


FIGURA 23.  
Deformación por pandeo producida en dos cajas cuadradas de distinto espesor. Ref. 10.

En la Figura 23, una caja está fabricada de planchas de  $\frac{1}{2}$ " y la otra con latón de 0,1046". La soldadura en las esquinas contrae y tiende a liberar el exceso de metal bajo compresión en la porción central del panel, pudiéndose producir deformación por pandeo. El tamaño de la soldadura en las esquinas es para una plancha de  $\frac{1}{2}$ ", lo que indica que las fuerzas de contracción pueden ser mayores que las presentes en el latón de 0,1046". La resistencia al pandeo es también mayor debido al espesor del material (producto de la relación  $t^3$ ). Con los espesores utilizados en este ejemplo, la plancha de acero es aprox. 17 veces más resistente a la flexión (o pandeo), que el latón.

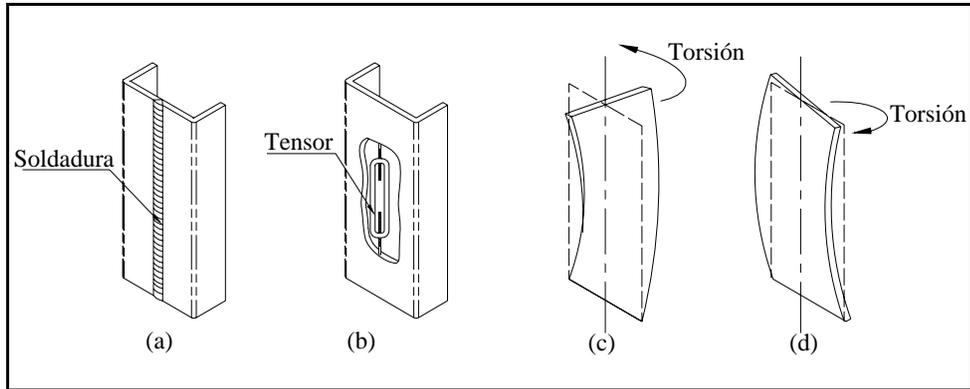


FIGURA 24.  
Efectos de torsión en materiales delgados. Ref. 10.

En materiales delgados la torsión es un problema debido a su baja resistencia a la torsión. Cuando se suelda un miembro en su línea central, como muestra la Figura 24a, el área soldada se tiende a contraer y a disminuir. El efecto es similar a colocar un tensor y posteriormente tensarlo en la posición central, tal como se muestra en la Figura 24b. En éstas condiciones, un plano rectangular es difícil que exista.

Para satisfacer la condición de que un miembro tenga sus bordes más largos que su línea central, el miembro debe ser torcido, como se ve en la Figura 24c, la aplicación de una fuerza opuesta de anti-torsión por parte de la soldadura es despreciable. Una vez que la fuerza es bastante grande como para restablecer el plano original, el material rápidamente sufre una torsión en dirección opuesta, como se ve en la Figura 24d.

La torsión puede ser prevenida o minimizada de varias formas:

- Minimizando las fuerzas de contracción con una buena practica de soldadura; disminuyendo el volumen de metal soldado y soldando a alta velocidad.
- La longitud a soldar debe ser pequeña.
- Aumentando la resistencia a la torsión. La resistencia de una plancha a la torsión es una función al cubo de su espesor, doblando éste, aumentaremos su resistencia por un factor de ocho. Si el diseño lo permite, la resistencia torsional puede ser incrementada a través de la utilización de secciones cuadradas cerradas o diagonales.

La torsión por soldadura puede ser a menudo corregida con una llama-contracción. Los bordes externos son calentados, acortando la longitud de la línea central, y la diferencia en las dimensiones responsables de la torsión es corregida.

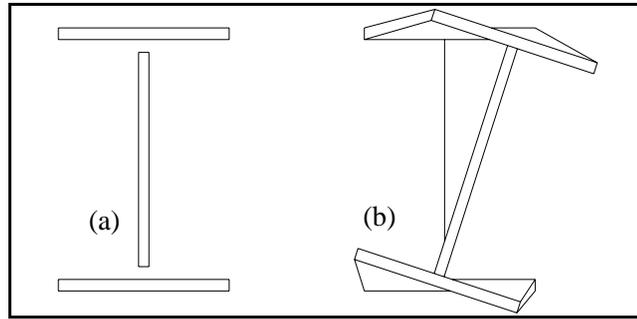


FIGURA 25.Efecto de la longitud de las alas de una viga larga y delgada en la torsión. Ref. 10.

A menudo al soldar vigas largas y delgadas, estas se tuercen. Como se ve en la Figura 25a, la razón de esto es que la viga esta formada de tres partes unidas con soldadura de filete. Si se acorta la longitud central de las alas, mientras la longitud del borde externo permanecer constante, si las alas no tienen una adecuada resistencia torsional, se produce la torsión, como muestra la Figura 25b. La llama-contracción en los bordes externos de las alas es una medida correctiva para esta situación.

### 5.7 Almas horizontales o verticales.

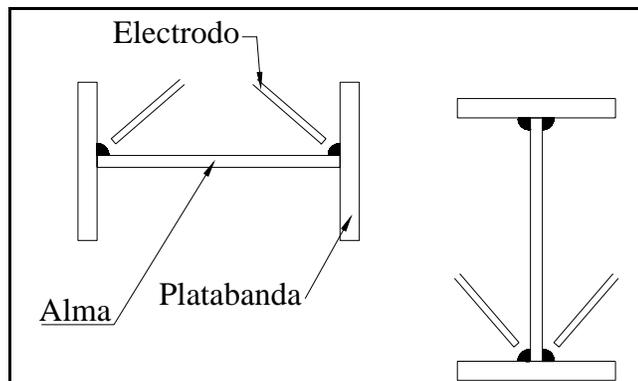


FIGURA 26.  
Efecto de la posición en que el alma es soldada respecto a la deformación. Ref. 10.

Si se posee el equipamiento automático con la capacidad de crear dos filetes de soldadura simultáneamente, las vigas pueden ser soldadas con el alma en posición horizontal o vertical (ver Figura 26). De cualquier modo, la deformación puede ser minimizada en cada caso. Cuando el alma esta horizontal la viga es más flexible, pero los cordones están muy cerca del eje neutro de la viga, por lo que no tiene prácticamente energía para flectarse. Con el alma vertical, las soldaduras están mas alejadas del eje neutro, pero la viga es considerablemente más rígida.

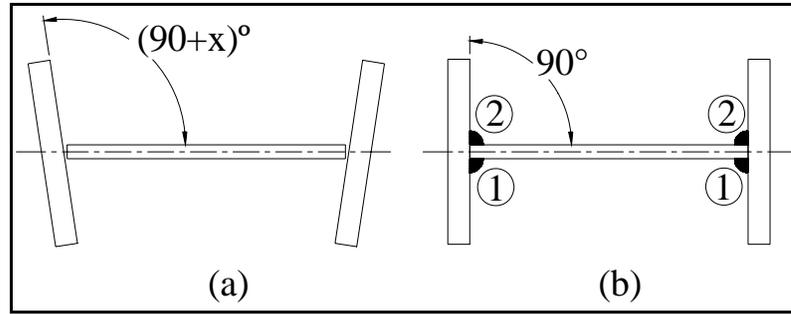


FIGURA 27.  
Ángulos posibles de las alas de vigas soldadas  
con el alma horizontal. Ref. 10.

Como muestra la Figura 27, en vigas soldadas con el alma horizontal, se mantienen las alas inclinadas o giradas en un ángulo menor a  $90^\circ$ . Si la soldadura en el otro lado del alma no está correcta, se tiene la opción de soldar inicialmente con las alas atiesadas en un ángulo mayor a  $90^\circ$ . Sin embargo, solo se puede determinar cuanto se excede el ángulo de  $90^\circ$ , después de contraerse y de completar la soldadura final. Además, se puede asegurar que el procedimiento de soldadura se mantendrá constante.

En general, cuando el equipamiento no está disponible para depositar dos cordones de soldadura simultáneamente, la secuencia para cuatro filetes de soldadura en una viga puede variar sin un efecto considerable en la deformación. En muchos casos, la secuencia se basa en la instalación a utilizar y el método disponible para el movimiento de la viga de una posición a otra. Cuando se requiere un único cordón de soldadura a la vez, la viga es generalmente posicionada en un ángulo entre 30 y 45 grados, permitiendo que la soldadura pueda ser depositada en una posición plana. En este caso es aconsejable que la soldadura sea rápida. La posición plana permite un mejor control de la forma del cordón y permite depositar extensos cordones de soldadura.

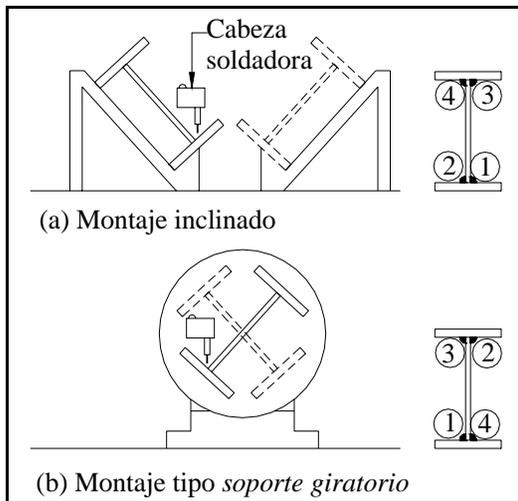


FIGURA 28.

Posición y secuencia para vigas soportadas en montajes inclinados y giratorios. Ref. 10.



Montaje para soldar alma y ala de bao circular de un submarino. Ref. 12.

Al utilizar un montaje inclinado para soportar la viga se requiere una grúa para cambiar de posición después de cada soldadura. La reubicación toma tiempo y, se requiere de la utilización de equipamiento que sirva para varias estaciones de trabajo.

Una disposición típica que utiliza un par de soportes inclinados para soldar una viga, es mostrada en la Figura 28a. Después que se ha realizado la soldadura 1, la grúa simplemente mueve la viga al soporte del frente donde la soldadura 2 es realizada. Después de soldar 2, la grúa rota la viga para soldar 3 y 4.

Una secuencia distinta es llevada a cabo en una instalación del tipo soporte giratorio, mostrada en la Figura 28b. Después de soldar 1, la viga es girada  $180^\circ$  para soldar 2 sin cambiar la posición de la cabeza soldadora. Una vez realizada la soldadura 2, la viga es nuevamente girada, y la cabeza soldadora es reposicionada para soldar 3. Después de soldar 3, la viga es girada y la soldadura 4 es realizada con la cabeza siguiendo la misma línea recta que la soldadura 3.

En ambos casos, la secuencia de soldadura es influenciada por el posicionamiento de la viga, ya que esta maniobra debe tomar el menor tiempo posible.

### 5.8 Columnas esbeltas y livianas.

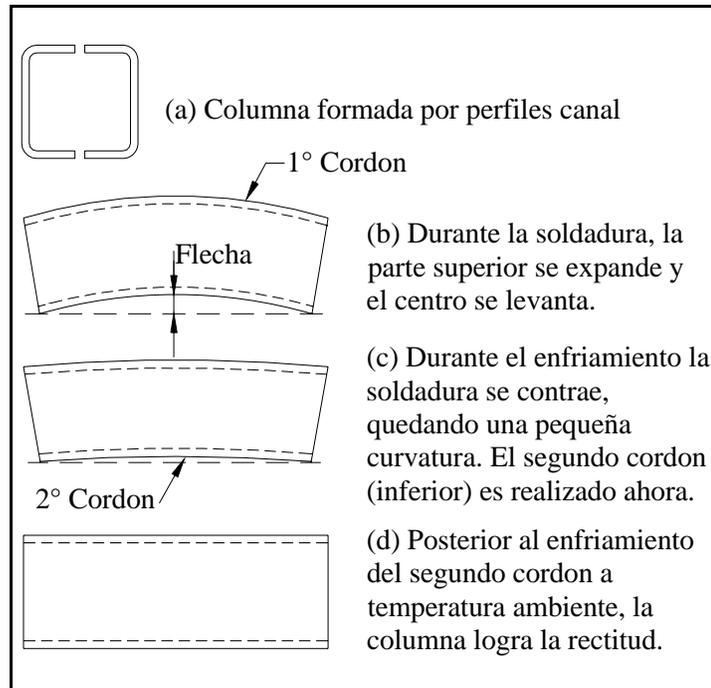


FIGURA 29.  
Fenómenos ocurridos durante la soldadura de una columna esbelta. Ref. 10.

Columnas esbeltas como en la que aparece en la Figura 29a, ya sea para iluminación, señales o otros propósitos de montaje, son comúnmente confeccionadas por la unión soldada de dos perfiles canal livianos. Si la primera soldadura se enfría antes que se realice la segunda soldadura en el lado opuesto, esta puede resultar flectada debido a que la segunda soldadura no es capaz de enderezar la unión. La primera soldadura, en la parte superior del conjunto, inicialmente provoca que el centro de la columna se levante, como en la Figura 29b. Si el miembro es girado rápidamente y se realiza la segunda, esta puede ser inicialmente mas corta que la longitud del conjunto. Después que la columna soldada se ha enfriado, generalmente esta recta.

### 5.9 Control de curvatura.

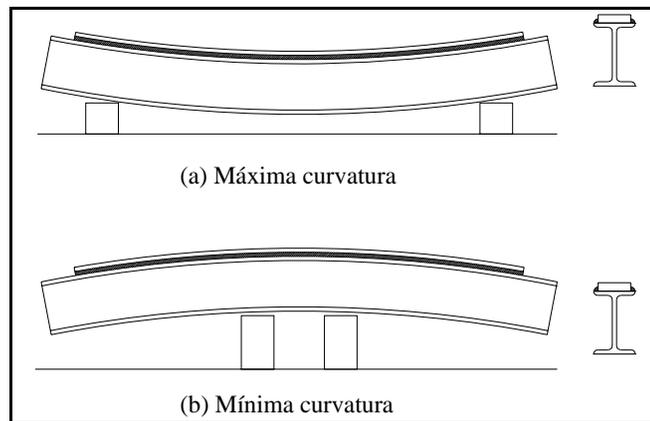


FIGURA 30.  
Efecto de la posición del soporte en la deformación de una viga. Ref. 10.

El efecto de contracción de la soldadura puede ser utilizado beneficiosamente en la fabricación de largas vigas con una determinada curvatura. Los efectos de la contracción y la gravedad pueden ser combinados para controlar la magnitud de la curvatura. La técnica involucra el soporte de la unión para que los dos efectos trabajen en la dirección deseada, ya sea para producir una curvatura, o producir un miembro recto o con mínima curvatura. Así, el soporte próximo a los extremos provoca un hundimiento en el centro, y si está en el centro, permite que los extremos caigan, produciendo una viga relativamente recta.

Por ejemplo, si una viga tiene soldada una plancha sobre su ala superior y tiene una cierta curvatura (convexidad), se cree que la contracción de la soldadura no puede proporcionar la suficiente curvatura para enderezar la viga. Con el soporte de la viga próxima a sus extremos durante la soldadura, como en la Figura 30a, la contracción de la soldadura aumenta la curvatura. Ahora, si la viga es apoyada en el centro durante la soldadura, Figura 30b, el efecto de la gravedad puede disminuir la curvatura o flexión. De esta manera reduciremos la curvatura final.

### 5.10 Corrección de deformaciones por flama-contracción.

La corrección de deformaciones por flama-contracción no requiere de alta temperatura, sin embargo, una gran llama es necesaria para una rápida entrega de calor. El éxito de la técnica está en establecer la secuencia en el gradiente de temperatura en la unión. Cuando se aplica el método de la flama-contracción a una plancha, tal como el borde de un panel torcido o el ala de una viga, la flama puede ser desplazada progresivamente a lo largo del metal, o ir seleccionando puntos a ser calentados y dejados enfriar, con observación intermedia del grado de deformación removido alcanzado.

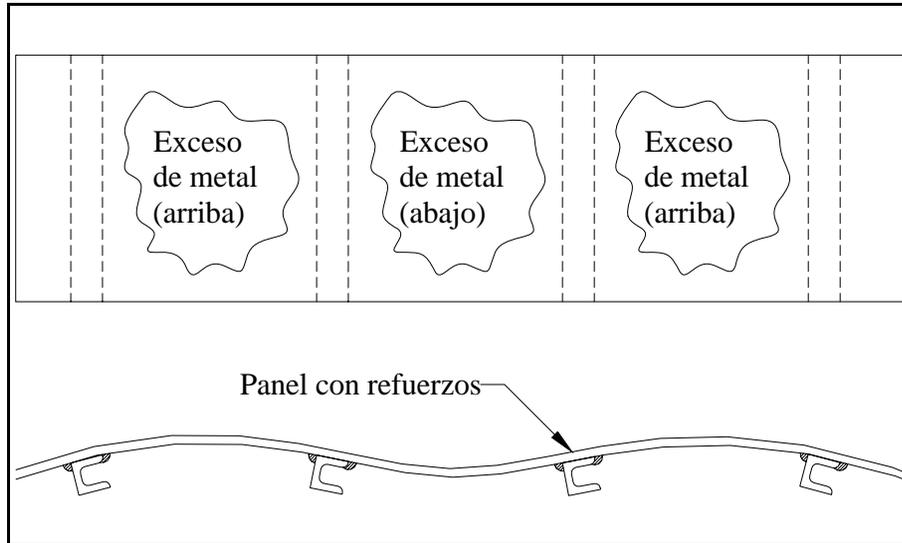


FIGURA 31.  
Panel pandeado por exceso de material en las áreas centrales. Ref. 10.

Si una parte del conjunto se contrae, como se muestra en la Figura 31, este es restringido en su movimiento, en el caso de muchas piezas soldadas, el sobre-calentamiento puede producir tensiones residuales o internas. Es una práctica aconsejable, sin embargo, se debe proceder cautelosamente, dejando periódicamente que el conjunto se enfríe, para que el grado de deformación removido sea medido.

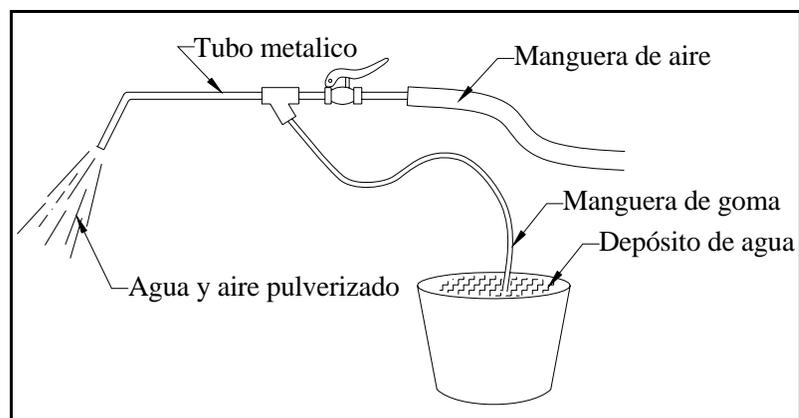


FIGURA 32.  
Partes de un spray atomizado de agua. Ref. 10.

Debido a la velocidad de operación, a menudo se utiliza un spray atomizado de agua para acelerar el enfriamiento. Este puede ser construido al insertar una unión "Y" en la línea de aire de un compresor con su respectiva válvula, una manguera de goma que va entre la unión "Y" y un recipiente de agua (ver Figura 32). Cuando la válvula es abierta, el aire entra en el sistema, creando un spray atomizado. Cuando el spray golpea la plancha caliente, se convierte en vapor, absorbiendo una cantidad considerable de calor.

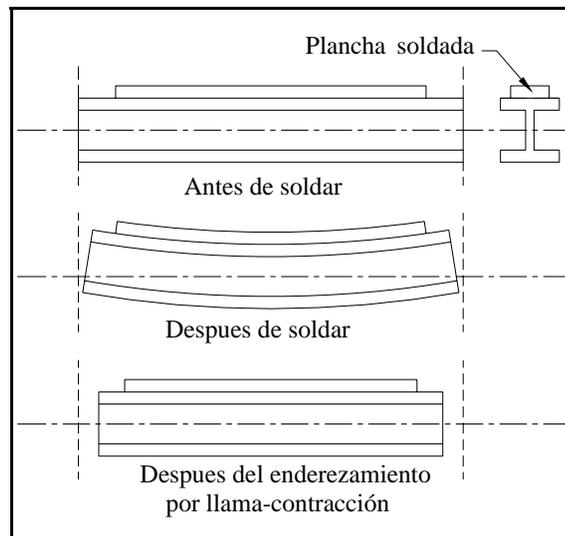


FIGURA 33.

Proceso sufrido por una viga al soldarle una plancha y someterla luego al método de flama-contracción. Ref. 10.

El método de flama-contracción es a menudo aplicado a largas vigas y a columnas que están curvadas por una soldadura. Una viga con un doblante soldado es probable que se curve, como se muestra en la Figura 33, debido a que la soldadura no está balanceada en torno al eje neutro. La soldadura en el doblante produce contracciones que acortan la longitud del ala en la cual se ha soldado. La flama-contracción acorta la otra ala a la misma longitud, enderezando la viga.

La flama-contracción utilizada apropiadamente, puede incrementar la cantidad deseada de curvatura en una viga. Por ejemplo, si la viga con el doblante mostrada en la Figura 33 es volteada, requiere más curvatura que la que produciría la soldadura del doblante, por lo tanto, la llama es aplicada en el lado del doblante. Sin embargo, si el doblante solo es calentado y contraído, este puede tirar contra el ala inferior de la viga, produciendo gran cantidad de tensiones internas de tracción. Una sobre carga accidental en la viga en servicio puede exceder la tensión de fluencia del doblante y causar un estiramiento, perdiéndose la curvatura. Por lo tanto, para disminuir las tensiones de tracción desarrolladas en el doblante, y aumentar la resistencia a carga y mantener la curvatura, se debe aplicar flama-contracción al ala de la viga, a lo largo del doblante.

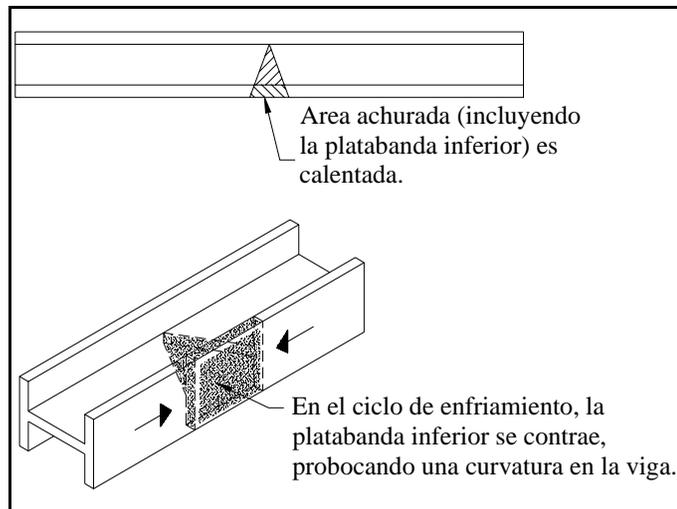


FIGURA 34.

Producción de curvatura en una viga. Ref. 10.

La flama-contracción puede ser utilizada para producir curvaturas en vigas con o sin doblante disminuyendo o no las tensiones internas. Se marca una área en forma de cuña (ver Figura 34) sobre el alma y el ala inferior con un material que pueda resistir altas temperaturas. La flama de uno o más sopletes es aplicada en la región marcada hasta que alcanza el color rojo. Se retira la flama, el área es dejada enfriar, y se mide la curvatura. Áreas similares son marcadas a lo largo de la viga, y el proceso es repetido hasta que la curvatura requerida es obtenida (ver Figura 35).

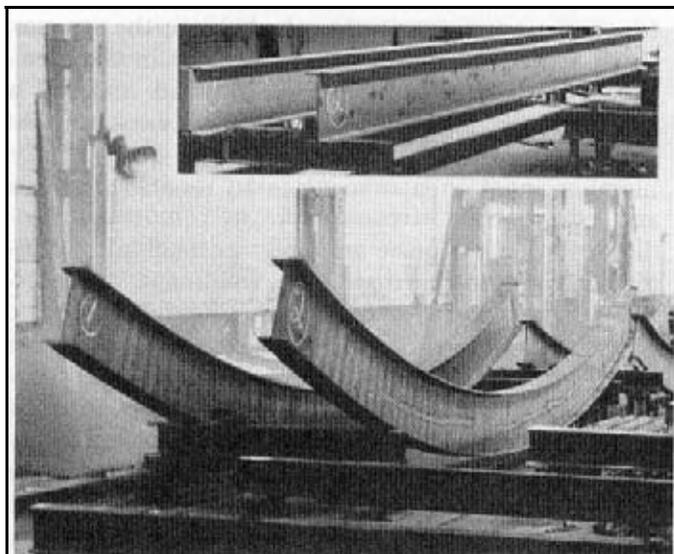


FIGURA 35.

Vigas curvadas por una flama-contracción. Ref. 10.

## 6. Técnicas de taller para el control de deformaciones.

Se han desarrollado varias técnicas en taller para controlar deformaciones por soldadura. Todas ellas hacen mención a los principios ya discutidos relativos a las restricciones, expansión y contracción.

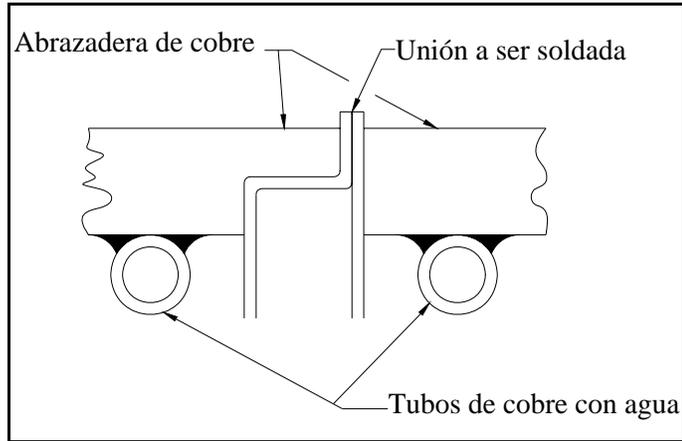


FIGURA 36.  
Utilización de una cañería de agua fría para soldar un latón. Ref. 10.

Por ejemplo, al soldar un latón, una cañería de agua fría (ver Figura 36), es utilizada para extraer el calor de los componentes soldados. Tubos de cobre son soldados a los sujetadores de cobre, circulando agua a través de ellos durante la soldadura. Las restricciones impuestas por los sujetadores ayudan a minimizar las deformaciones.

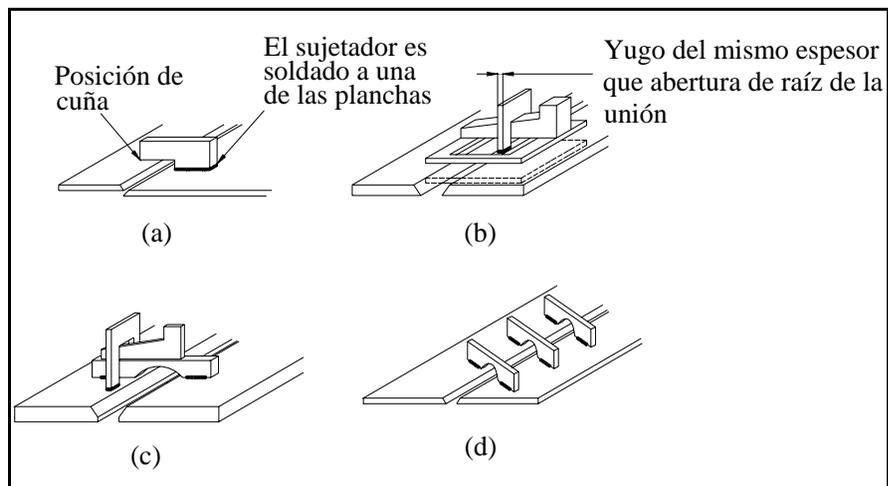


FIGURA 37.  
Técnicas para controlar deformaciones durante la soldadura a tope de planchas. Ref. 10.



FIGURA 38.

Sistemas de fijación utilizados en construcción naval. Ref. 12.

Como se ve en la Figura 37a, el respaldo reforzado es una buena técnica para controlar deformaciones durante la soldadura a tope de planchas. Se sueldan grapas en el borde de una plancha y cuñas son colocadas bajo las grapas, manteniendo los bordes alineados y sujetos durante la soldadura.

En una variación del método anterior, como muestra la Figura 37b, un yugo es soldado para formar una sección T invertida. El yugo se pasa a través del espacio-raíz de la unión por debajo de la zona de trabajo. Las cuñas de acero, insertadas en la ranura del yugo, mantienen las planchas alineadas. El espesor del yugo puede ser igual a la separación de raíz, sirviendo de esta manera, como separador de los bordes de las planchas.

Un yugo puede utilizarse de manera diferente en planchas de mayor espesor, como muestra la Figura 37c. Aquí, el yugo es soldado en la parte superior de la plancha, una barra es soldada en la segunda plancha, y una cuña es desplazada entre el yugo y la barra. Después de que las planchas son alineadas, la barra es soldada a la otra plancha, y el yugo y la cuña son retirados. Cuando la soldadura es completada, las barras soldadas son removidas.

Si existe la preocupación que los respaldos reforzados puedan atiesar excesivamente la unión en el sentido transversal, contra la contracción de la soldadura, aumentando de esta manera la posibilidad de una grieta en la soldadura, los respaldos pueden ser colocados a  $45^\circ$  en la unión, como se ve en la Figura 37d. Esta disposición permite algún movimiento transversal sin pérdida de restricción en la dirección longitudinal.

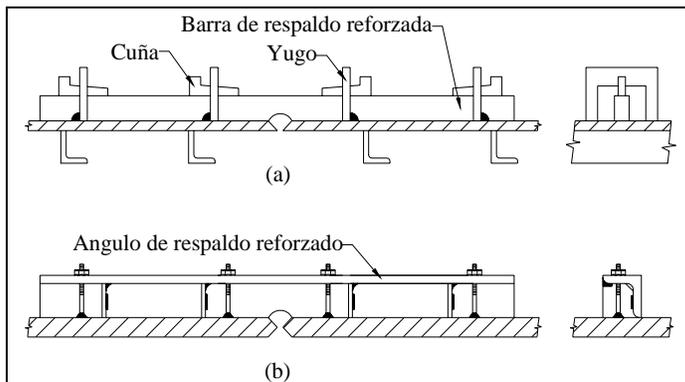


FIGURA 39.

Arreglos que permiten aplicar presión por sobre toda la longitud del material. Ref. 10/12.

La soldadura de materiales muy pesados puede requerir respaldos reforzados que se extienden una distancia considerable a cada lado de la unión. Los arreglos mostrados en la Figura 39 son muy adecuados para este caso.

Excepto en situaciones especiales, el alivio de tensiones por calentamiento no es utilizado para corregir deformaciones. Hay ocasiones, sin embargo, sobretodo cuando las tensiones son aliviadas, donde es necesario prevenir futuras deformaciones que ocurran antes que la unión de las piezas sea finalizada.

Las tensiones residuales de tracción en el área soldada pueden ser del orden de la tensión de fluencia del material. Tensiones de compresión existen en otra área para balancear las tensiones de tracción. Después de desplazarse lo suficiente (deformación) a fin de equilibrar las tensiones, no deberían presentarse futuros grandes desplazamientos en el conjunto. Sin embargo, si el material es tensionado por maquinado, ocurre un nuevo balance de tensiones. Un movimiento del conjunto debe tener lugar entonces al re-balancear las tensiones de tracción y compresión. Este nuevo movimiento, o deformación, gradualmente toma lugar en procesos de maquinado. Para evitar esta deformación, las soldaduras son a veces aliviadas antes de realizar el maquinado.

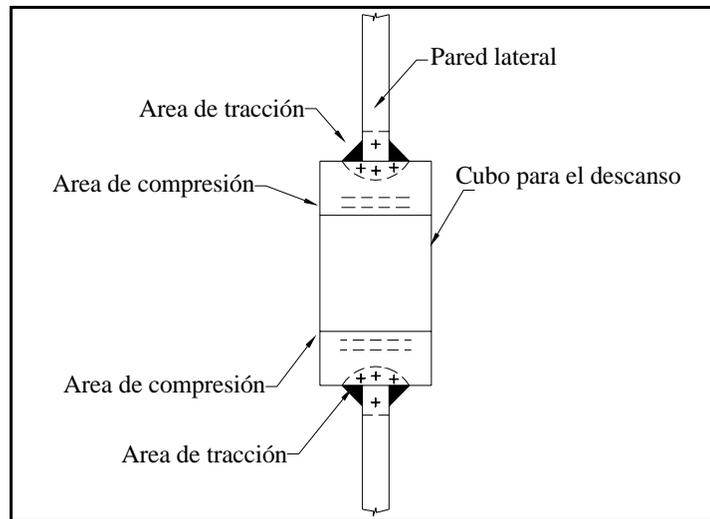


FIGURA 40.

Cubo para un soporte de descanso que requiere alivio de tensiones antes del maquinado. Ref. 10.

Un ejemplo de una soldadura que requiere alivio de tensiones es el caso mostrado en la Figura 40. El cubo es soldado por el contorno a una pared de alojamiento. Los dos grandes cordones perimetrales tienden a contraerse, disminuyendo su diámetro. El diámetro interior del cubo resiste esta deformación produciéndose tensiones de compresión.

Al perforar el cubo antes de soldarlo, se perdería el balanceamiento de las fuerzas de compresión, es decir, que al soldar el cubo este sufriría una mayor deformación producto de los cordones de soldadura. Es por este motivo que se recomienda soldar la pieza, y luego realizar una operación de alivio de tensiones y perforar.

## 7. Lista de chequeo para la disminución de deformaciones.

Como una buena práctica para llevar a cabo un control de las deformaciones, se recomienda verificar la siguiente serie de puntos:

- No realizar una excesiva deposición de soldadura.
- Controlar la separación.
- Utilizar soldadura intermitente, cuando sea posible.
- Utilizar mínimas aberturas de raíz, incluyendo ángulo y reforzamiento.
- Seleccionar una unión que requiera mínima cantidad de metal soldado; por ejemplo, una unión doble -V en lugar de una unión V- simple.
- Cuando sea posible, realizar soldadura alternada en cada lado de la unión.
- Utilizar mínimas pasadas de soldaduras.

- Utilizar procesos que tengan una relación de alta deposición.
- Utilizar métodos de soldadura de alta velocidad – electrodos recubiertos con polvo de hierro o soldadura automatizada.
- Utilizar métodos que tengan penetración profunda y así reducir la cantidad de metal de aporte requerido para la misma resistencia y cantidad de entrada de calor.
- Utilizar posicionadores de soldadura para lograr la máxima cantidad de soldadura en posición plana. La posición plana permite el uso de electrodos de gran diámetro y procesos de soldadura de alta relación de deposición.
- Balancear la soldadura respecto al eje neutro del conjunto.
- Distribuir el calor de la soldadura a través de una planificada secuencia de soldadura y posicionamiento de la estructura soldada.
- Soldar hacia la parte sin restricciones del miembro.
- Utilizar mordazas, accesorios y respaldos reforzados para mantener el ajuste y alineamiento.
- Soldar primero las uniones que se contraen más.
- Soldar primero las secciones más flexibles. Estas pueden ser enderezadas, si es necesario, antes de la unión final.
- Las secuencias de soldadura de sub-unión y unión final, deben realizarse balanceando continuamente la una con la otra, alrededor del eje neutro de la sección.

### III CONCLUSIONES

Habiendo finalizado la *guía práctica para prevenir deformación por soldadura* podemos concluir que:

- La deformación se presenta en tres formas básicas: Contracción longitudinal, Contracción transversal y Distorsión angular: Asociadas a estas deformaciones se presentan la flexión, el pandeo y la torsión.
- La magnitud de la tensión térmica inducida en el material se debe a un cambio volumétrico en el área soldada debido a la solidificación y subsiguiente enfriamiento hasta temperatura ambiental.
- Si las tensiones generadas por la expansión / contracción térmica exceden la resistencia de fluencia del material base, la deformación plástica localizada ocurre en el metal.
- La deformación plástica causa una permanente reducción de las dimensiones de los componentes y distorsión estructural.
- Las propiedades mecánicas del material cambian con la temperatura. Al realizar una unión soldada se genera una zona afectada térmicamente, lo cual cambia en forma permanente sus propiedades mecánicas.

## IV ANEXO

### TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN

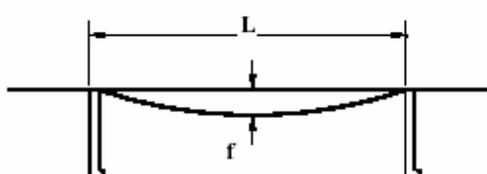
Procedimientos de control para la construcción de estructuras navales, utilizado en forma habitual en Astilleros.

Fuente: IACS, The international association of classification societies and the international association of classification societies limited, 1999.

| <b>PLANCHAJE DEL CASCO</b>  |   |                   |  |
|---|---|-------------------|--|
| <b>SHELL PLATE</b>  |   |                   |  |
| <b>OBSERVACIONES</b>  | <b>Standard (mm.)</b>   | <b>Limit(mm.)</b> |  |
| <b>OBSERVATIONS</b>   |   |                   |  |
| <b>a.1) FONDO Y COSTADO</b><br>(Dentro del 40% de $L_R$ )<br>BOTTOM AND SIDE (INSIDE OF 40% $L$ )                       | f: 4  | f: 8              |  |
| <b>a.2) FONDO Y COSTADO</b><br>(Proa y popa fuera del 40% de a.1)<br>BOTTOM AND SIDE (FORE AND AFT OUTSIDE OF 40% $L$ ) | f: 5  | f: 8              |  |
| <b>b) CUBIERTAS RESISTENTES</b><br>STRENGTH DECKS   |   |                   |  |
| ZONA PARALELA (PARALLEL PART)   | f: 4  | f: 8              |  |
| ZONA A PROA Y POPA (FORE AND AFT PART)  | f: 6  | f: 9              |  |
| ZONAS RECUBIERTAS (COVERED PART)  | f: 7  | f: 9              |  |
| <b>c) CUBIERTAS SECUNDARIAS</b><br>ZONAS DESCUBIERTAS (BARE PART)<br>ZONAS RECUBIERTAS (COVERED PART)                   | f: 6  | f: 8              |  |
|   | f: 7  | f: 9              |  |
| <b>d) DOBLE FONDO</b><br>DOUBLE BOTTOM  | f: 4  | f: 8              |  |
| <b>e) MAMPAROS</b><br>BULKHEADS   | f: 6  | f: 8              |  |
| NOTA:<br>REMARK   | <b>e</b> : ESPESOR DE LA PLANCHA<br>PLATE THICKNESS<br><b>L<sub>R</sub></b> : ESLOA DEL BUQUE SEGÚN REGLAS DE<br>CLASIFICACIÓN A UTILIZAR<br>LENGTH OF THE SHIP ACCORDING TO THE CLASS RULES IN USE |                   |  |

FIGURA 41.

Estándar de fabricación del planchaje del casco, se indican las fechas aceptables y las limites.



**PLANCHAJE DE SUPERESTRUCTURA**  
**PLATING OF SUPERSTRUCTURE**

| OBSERVACIONES<br>OBSERVATIONS                               | TOLERANCIA (mm)<br>TOLERANCE (mm) |       |
|---|-----------------------------------|-------|
|   | STANDARD                          | LIMIT |
| a) CUBIERTAS SIN REVESTIMIENTO<br>BARE DECK                 | ± 4                               | ± 6   |
| b) CUBIERTAS REVESTIDAS<br>COVERED DECK                     | ± 7                               | ± 9   |
| c) MAMPAROS EXTERIORES EXPUESTOS<br>BARE OUTSIDE BULKHEAD   | ± 4                               | ± 6   |
| d) MAMPAROS INTERIORES DESCUBIERTOS<br>BARE INSIDE BULKHEAD | ± 6                               | ± 8   |
| e) MAMPAROS REVESTIDOS<br>COVERED BULKHEAD                  | ± 7                               | ± 9   |

OBSERVACIÓN:  
OBSERVATION:

- L min.: 300
- L max.: 1000

Medidas en mm.  
Measures in mm.

FIGURA 42.

Estándar de fabricación de planchaje de superestructura, se indican las fechas aceptables y los límites.

**ESTRUCTURAS INTERNAS**  
**INTERNAL STRUCTURES**

| OBSERVACIONES<br>OBSERVATIONS   | TOLERANCIAS (mm)<br>TOLERANCES |                          |
|---|--------------------------------|--------------------------|
|   | STANDARD                       | LIMIT                    |
| a) MAMPAROS PRINCIPALES<br>MAIN BULKHEAD  | ± 6                            | ± 8                      |
| b) MIEMBROS INTERIORES (ALAS DE VIGAS ETC.)<br>INTERNAL MEMBERS (WEB OF GIRDER, ETC.)   | ± 5                            | ± 7                      |
| c) PUNTALES (ENTRE CUBIERTAS)<br>PILLAR (BETWEEN DECKS)   | ± 4                            | ± 6                      |
| d) DIAMETRO DE ESTRUCTURAS CILINDRICAS<br>(PUNTALES, MASTILES, POSTES, ETC.)<br>CYLINDRICAL STRUCTURE DIAMETER<br>(PILLARS, MASTS, POSTS, ETC.) | ± D/200 mm<br>max +5mm         | ± D/150 mm<br>max 7.5 mm |
| e) ESCUADRAS (ZONA DEL BORDE LIBRE)<br>BRACKET (PART OF FREE EDGE)  | ± t/2                          | max 8 mm.                |

FIGURA 43 a.

Estándar de fabricación de estructuras internas, se indican desviaciones aceptables y los límites.

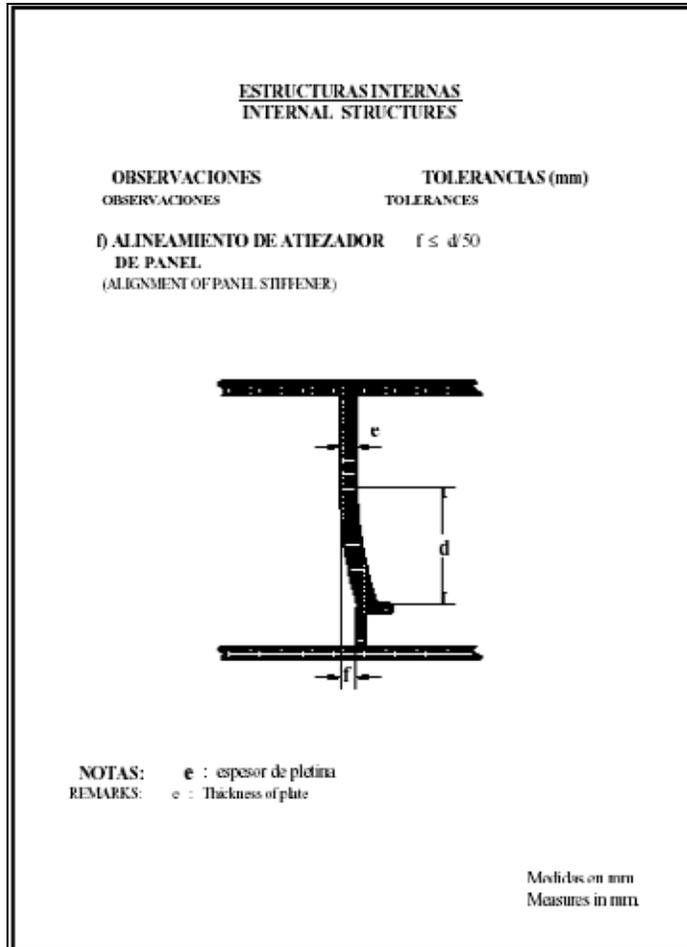


FIGURA 43 b.  
Estándar de fabricación de estructuras internas, se indican desviaciones aceptables y los límites.

| NOMBRE<br>NAME  | ESLORA TOTAL<br>LENGTH OVERALL | TOLERANCIA<br>TOLERANCE (mm) |
|---|--------------------------------|------------------------------|
| Quilla Plana<br>Flat Keel (Fig 1)   | $L_T \leq 100$ m               | $\pm 25$                     |
| Quilla Plana<br>Flat Keel   | $L_T > 100$ m                  | $\pm 50$                     |
| Mamparos<br>Transversales<br>Adyacente<br>Transversal adjacent<br>bulkheads (Fig 2) | -----                          | $\pm 15$                     |
| Levantamiento del<br>cuerpo de proa<br>Cocking-up of fore<br>body (Fig 3)           |                                | $\pm 30$                     |
| Levantamiento del<br>cuerpo de popa<br>Cocking-up of aft body<br>(Fig 4)            |                                | $\pm 20$                     |
| Alzamiento del fondo<br>en la sección media<br>Rise of floor amidships<br>(Fig 5)   |                                | $\pm 15$                     |

PARA FIGURAS 1 A 5, VER HOJA 2/2.

FIGURA 44 a.  
Estándar de fabricación, se indica el grado de deformación o desviación aceptable para distintas zonas del buque.

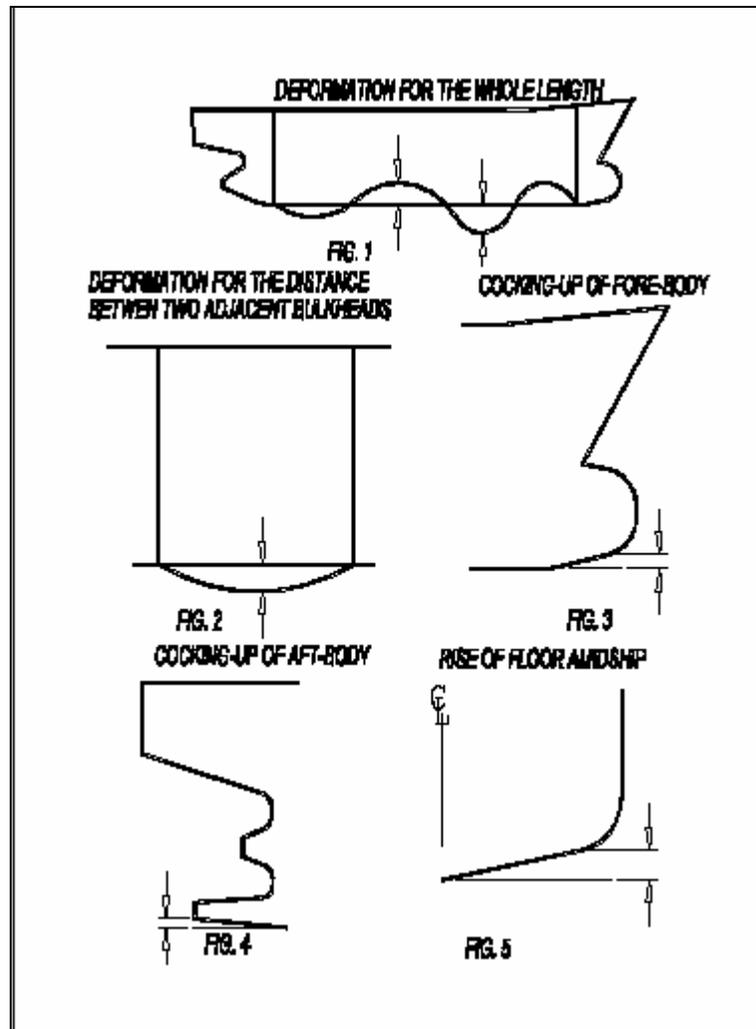


FIGURA 44 b.

Estándar de fabricación, se indica el grado de deformación o desviación aceptable para distintas zonas del buque.

### HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS.

Para el control de procesos de soldadura existen hoy en día una gran cantidad de elementos que pueden ser utilizados. Entre los más utilizados en la industria tenemos las estaciones totales, sensores de desplazamiento LVDT, strainage, termocuplas, cámaras térmicas y software de elementos finitos. Es importante destacar las herramientas informáticas de simulación, estas tienen cada día más importancia debido a que se puede determinar en una etapa inicial del proyecto las futuras deformaciones.

**Estación total:** Instrumento óptico utilizado para realizar control dimensional de la estructura mientras se lleva a cabo la soldadura, y en la etapa de control dimensional final.

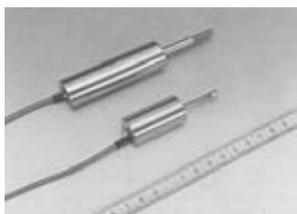


Se denomina estación total a un instrumento topográfico electro-óptico de la gama más moderna, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica.

Algunas de las características que incorpora son una pantalla alfanumérica de cristal líquido (LCD), leds de avisos, iluminación independiente de la luz solar, calculadora, distanciómetro, trackeador (seguidor de trayectoria) y la posibilidad de guardar información en

formato electrónico, lo cual permite utilizarla posteriormente en computadoras personales. Genéricamente se los denomina estaciones totales porque tienen la capacidad de medir ángulos, distancias y niveles, lo cual requería previamente de diversos instrumentos. Estos teodolitos electro-ópticos, impensados hace unos años, son una realidad técnica accesible desde el punto de vista económico. Su precio en el mercado (desde U\$S 6.000 hasta U\$S 20.000) los hace asequibles y están reemplazando rápidamente a los instrumentos ópticos. La precisión angular es de 1" (variable según la marca y el modelo); el distanciómetro permite medir distancias del orden del kilómetro con una precisión de milímetros, y tienen funciones que les permiten exportar sus datos directamente a programas "CAD" (programas de "diseño asistido" para trazados geométricos o gráficos).

### **Sensores LVDT:**

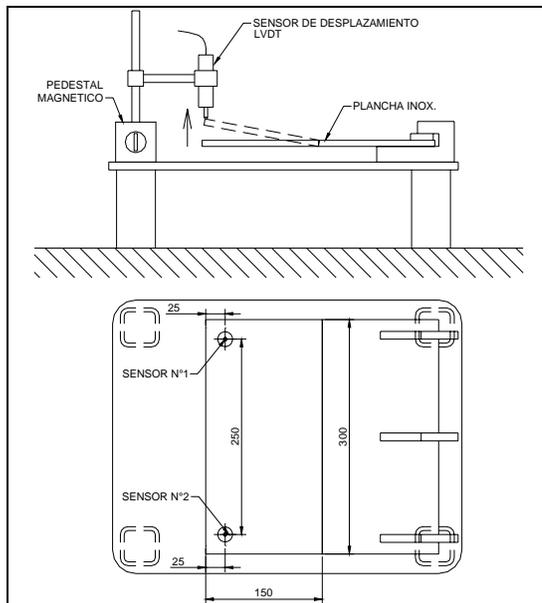


Se utilizan para medir los desplazamientos que se producen mientras se realiza la unión soldada, son de gran ayuda cuando en una determinada unión no se puede sobrepasar un determinado valor de desplazamiento. Además, como se registra la curva de desplazamiento que se está presentando en el punto medido, el

soldador puede ir corrigiendo de manera inmediata la desviación.

El LVDT (Transformador diferencial linealmente variable) es uno de los tipos más comunes de transductor de desplazamiento; consta de tres bobinas; una de excitación y dos de captación, y un núcleo móvil de hierro-níquel. El LVDT se activa mediante una onda senoidal, y la amplitud y la fase de la señal de salida serán directamente proporcionales a la posición del núcleo con respecto a las bobinas captadoras. Se necesita un detector de fase para demodular esta señal de salida.

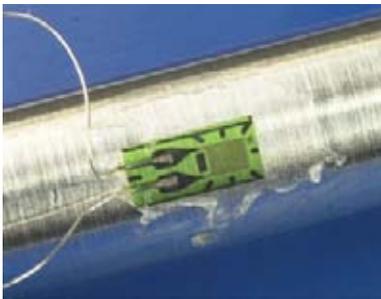
Las versiones con alimentación d.c. de estos LVDT incluyen toda la electrónica asociada (es decir, el oscilador de excitación y el detector de fase) para formar un sencillo sistema de medida. Sin embargo, debido al pequeño tamaño de los transductores y la necesaria reducción de la electrónica integrada, las prestaciones de los a.c. (que no llevan electrónica integrada) con sistemas electrónicos independientes serán superiores.



Esquema de posicionamiento de sensores en probetas para analizar deformaciones.

Fotografía con la posición de los sensores LVDT instalados en una probeta.

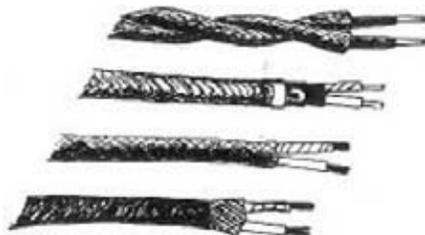
### Strain gauge ( o galga de tensión):



Mientras que hay varios métodos de medir la tensión, el más común es con un strain gauge, un dispositivo que su resistencia eléctrica varía en proporción con la cantidad de tensión aplicada en el dispositivo.

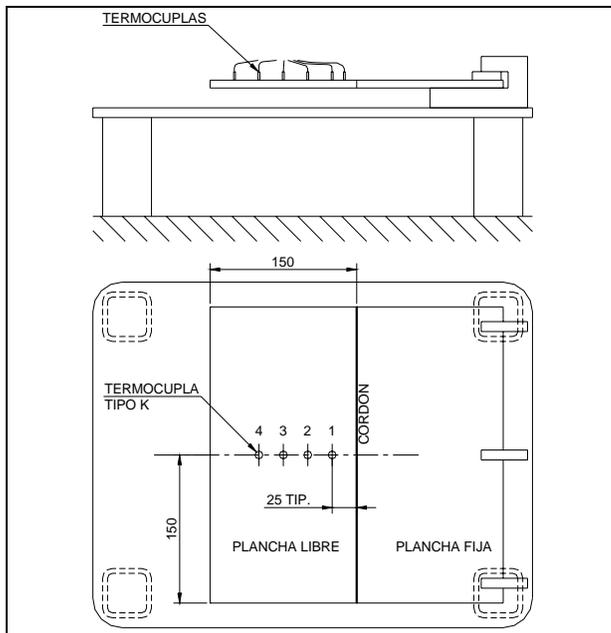
El strain gauge permite medir las tensiones residuales que se producen en uniones soldadas. Utilizando la técnica de relajación de tensiones, las tensiones son determinadas por la medición de las tensiones elásticas liberadas.

### Termocuplas:



Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.

Las termocuplas pueden ser ubicados en forma estratégica en la pieza a soldar, midiendo la temperatura en forma instantánea, logrando un control del proceso de soldadura.



Posición de las termocuplas en la probeta para analizar distribución de temperaturas.

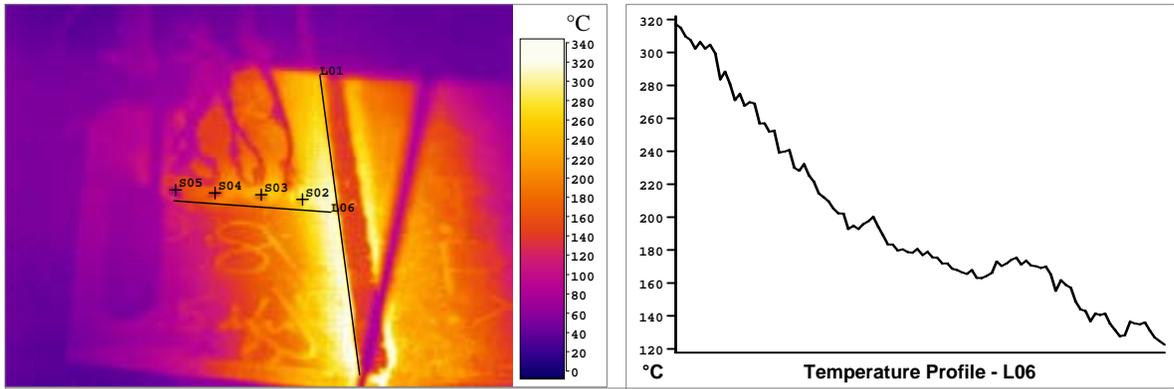
Fotografía que muestra ubicación de termocuplas en la probeta

### Cámaras infrarrojas / térmicas:



Existen muchas aplicaciones de visión que requieren soluciones más allá del espectro visible, debido a las características de emisión de los objetos o de la aplicación a evaluar. Dentro de estos tipos de aplicaciones se encuentran todas aquellas que deben resolverse dentro del infrarrojo lejano más allá de los 2 $\mu$ m. Las cámaras térmicas son capaces de determinar la temperatura de los cuerpos a partir de su radiación infrarroja. Existen dos longitudes de onda por excelencia donde trabajan las cámaras térmicas de 2 a 5  $\mu$ m y de 7 a 12  $\mu$ m. La energía infrarroja proveniente de un objeto es enfocada por el conjunto de lentes sobre un detector de infrarrojos. El detector envía la información a la electrónica del sensor para procesar la imagen. La electrónica convierte los datos provenientes del detector en una imagen que puede ser vista en el visor integrado, en un monitor de vídeo estándar o en una pantalla LCD.

Estas cámaras pueden ser utilizadas para visualizar en tiempo real la distribución del flujo térmico que se produce en una unión soldada.

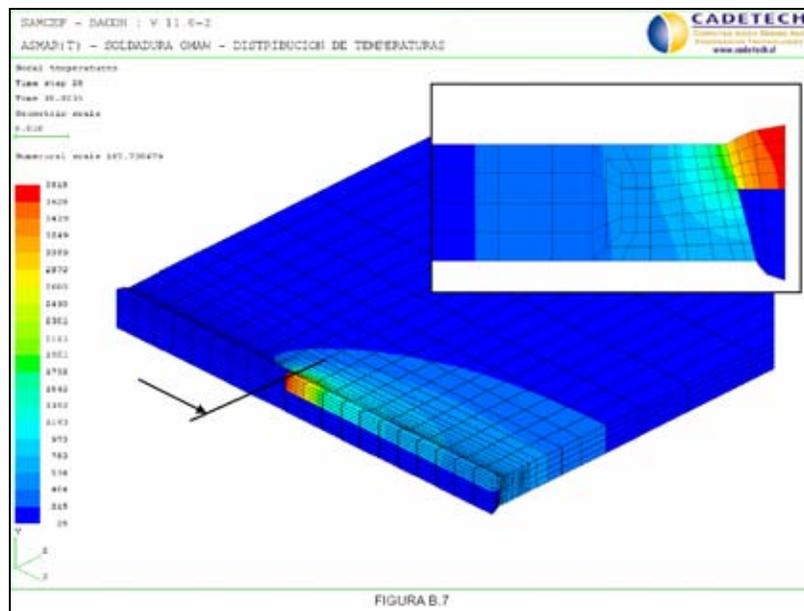


**Result Table Probeta P8**

| ITEM        | TYPE  | AVG TEMP | MAX TEMP | MIN TEMP | EMISS | Tamb |
|-------------|-------|----------|----------|----------|-------|------|
| Whole Image | Image | 121      | 345      | 17.8     | 0.85  | 20   |
| S02         | Spot  | 262      | 297      | 235      | 0.85  | 20   |
| S03         | Spot  | 198      | 240      | 162      | 0.85  | 20   |
| S04         | Spot  | 144      | 182      | 118      | 0.85  | 20   |
| S05         | Spot  | 96.3     | 126      | 79.3     | 0.85  | 20   |
| L01         | Line  | 271      | 325      | 188      | 0.85  | 20   |
| L06         | Line  | 197      | 317      | 123      | 0.85  | 20   |

Distribución de temperatura en un instante dado en una unión a tope. Imagen visualizada en cámara térmica.

**Software de simulación:** Programas comerciales de elementos finitos capaces de realizar simulaciones de uniones soldadas. En estas podemos ver el comportamiento de las partes a unir, es decir, el grado de deformación alcanzado, distribución de temperatura en el tiempo, tensiones internas, flujo de calor, etc. Entre los software comerciales podemos mencionar : ANSYS, ABAQUS y SAMCEF.



Simulación de unión soldada.

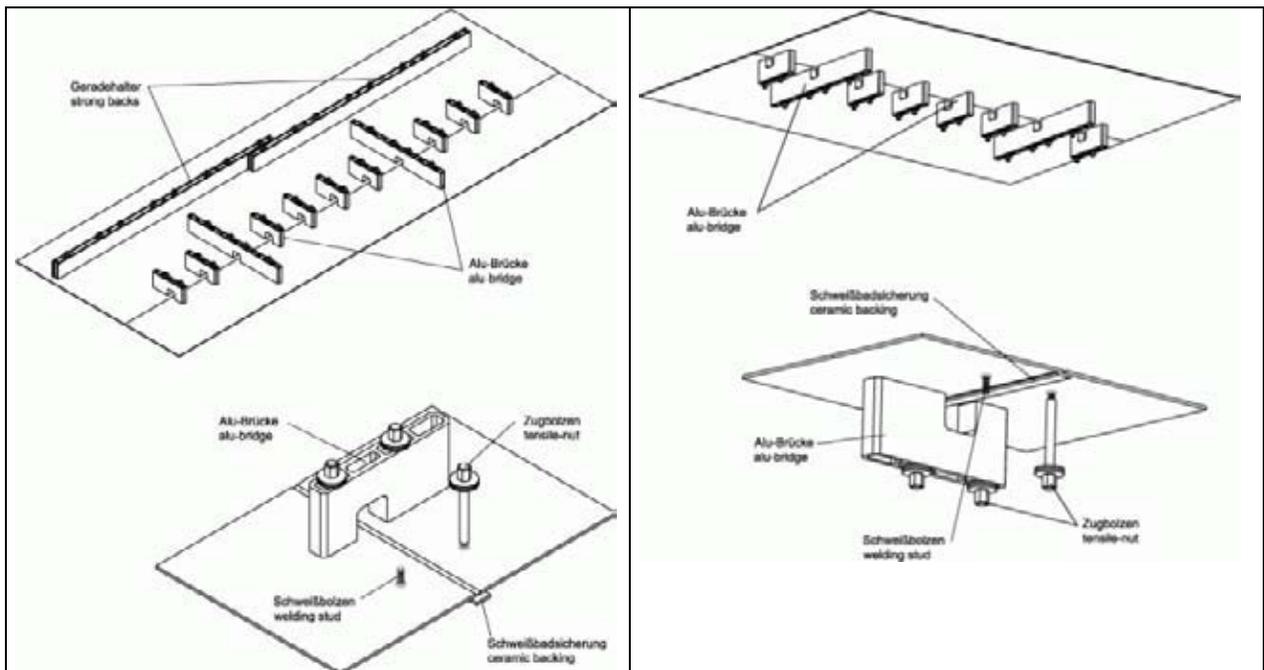
Se muestra distribución de temperatura en un instante dado, unión a tope

## SISTEMAS DE ALINEAMIENTO

### High Speed Fastening Systems With stud welding

[www.hilbig-gmbh.de](http://www.hilbig-gmbh.de)

[info@hilbig-gmbh.de](mailto:info@hilbig-gmbh.de)



## PROPIEDADES MECANICAS Y TERMICAS

Cuadro con valores de propiedades mecánicas y térmicas de cuatro diferentes materiales, base para el CUADRO 1 del punto 2.5. Ref. 11.

| Material | Relacion de Poisson | Modulo de Elasticidad | Tension de Fluencia | Coefficiente de Expansion Térmica      | Conductividad Termica |
|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|-----------------------|
|          |                     | Gpa                   | Mpa                 | $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ | W/m-K                 |

|             |           |             |            |            |           |           |
|-------------|-----------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Acero Dulce | AISI 1020 | 0.29        | 205        | 350        | 11.7      | 51.9      |
|             | ASTM A131 | -----       | -----      | 235        | -----     | -----     |
|             | AISI 1030 | 0.29        | 205        | 345        | 11.7      | 51.9      |
|             | AISI 1017 | 0.29        | 205        | 340        | -----     | 51.9      |
|             | AISI 1015 | 0.29        | 205        | 325        | 11.9      | 51.9      |
|             | AISI 1012 | 0.29        | 205        | 310        | -----     | 49.8      |
|             | AISI 1010 | 0.29        | 205        | 305        | 12.2      | 49.8      |
|             | AISI 1006 | 0.29        | 205        | 285        | 12.6      | -----     |
|             | AISI 1005 | 0.29        | 200        | -----      | 12.6      | -----     |
|             | Promedio  | <b>0.29</b> | <b>204</b> | <b>312</b> | <b>12</b> | <b>51</b> |

|                  |          |             |            |            |           |           |
|------------------|----------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Acero Inoxidable | AIS 202  | -----       | 207        | -----      | -----     | 16.3      |
|                  | AISI 302 | 0.25        | 193        | 275        | 17.2      | 16.2      |
|                  | AISI 303 | 0.25        | 193        | 240        | 17.2      | 16.2      |
|                  | AISI 305 | -----       | 193        | 260        | 17.3      | 16.3      |
|                  | AISI 308 | -----       | 195        | 240        | 17.3      | 15.2      |
|                  | AISI 309 | 0.3         | 200        | 310        | -----     | 15.6      |
|                  | AISI 310 | -----       | 200        | 310        | 15.8      | 14.2      |
|                  | AISI 314 | -----       | 200        | 345        | 15.1      | -----     |
|                  | AISI 317 | -----       | 195        | 275        | 16        | 16.3      |
|                  | AISI 321 | -----       | 193        | 240        | 16.7      | 16.1      |
|                  | AISI 316 | -----       | 193        | 290        | 16        | 16.3      |
|                  | AISI 304 | 0.29        | 193        | 215        | 17.3      | 16.2      |
|                  | Promedio | <b>0.27</b> | <b>196</b> | <b>273</b> | <b>17</b> | <b>16</b> |

|          |             |             |           |            |           |            |
|----------|-------------|-------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Aluminio | Al 1100-O   | 0.33        | 68.9      | 34.5       | 23.6      | 222        |
|          | Al 7005-O   | 0.33        | 72        | 80         | 23.6      | 166        |
|          | AL 8001-O   | 0.33        | 70        | 40         | 24        | -----      |
|          | Al 6005-T1  | 0.33        | 69        | 105        | 23.4      | 180        |
|          | Al 5005-H12 | 0.33        | 68.9      | 131        | 23.8      | 200        |
|          | Al 1100-H12 | 0.33        | 68.9      | 103        | 23.6      | 220        |
|          | Al 1060-O   | 0.33        | 68.9      | 27.6       | 23.6      | 234        |
|          | Al 1050-H14 | 0.33        | 69        | 103        | 23.6      | 227        |
|          | Al 4032-T6  | 0.34        | 78.6      | 317        | 19.4      | 138        |
|          | Promedio    | <b>0.33</b> | <b>70</b> | <b>105</b> | <b>23</b> | <b>198</b> |

|       |            |             |            |           |           |            |
|-------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|
| Cobre | UNS C18400 | 0.3         | 130        | 97        | 17.6      | 324        |
|       | UNS C15735 | -----       | 123        | -----     | -----     | 339        |
|       | UNS C15720 | -----       | 113        | -----     | -----     | 353        |
|       | UNS C14300 | 0.3         | 115        | 76        | 17        | 377        |
|       | UNS C12100 | -----       | -----      | 69        | -----     | -----      |
|       | UNS C11300 | 0.307       | 115        | 75        | 17.7      | 388        |
|       | UNS C11000 | 0.33        | -----      | 69        | 17        | 388        |
|       | UNS C10200 | 0.31        | 117        | 49        | 17        | 383        |
|       | UNS C10100 | 0.31        | 115        | 69        | 17        | 383        |
|       | Promedio   | <b>0.31</b> | <b>118</b> | <b>72</b> | <b>17</b> | <b>367</b> |

## V BIBLIOGRAFIA

1. ASTILLEROS Y MAESTRANZAS DE LA ARMADA, ASMAR (T). Manuales de procedimiento para soldaduras.
2. INDURA. Sistema y materiales de soldadura. Editorial Indura.
3. PENDER, J. Soldadura. Editorial McGraw – Hill.
4. OMER W. BLODGETT. Design of welded structures. Part seven. The James F. Lincoln arc welding foundation.
5. K. MASUBUCHI. Residual stresses and distortion. Welding Handbook. Seventh edition. Volume one.
6. FRANK P. INCROPERA Y DAVID P. DEWITT. Cuarta Edición. Fundamentos de transferencia de calor. Editorial Prentice Hall.
7. THE WELDING INSTITUTE, Second edition. Control of distortion in welded fabrications.
8. JOURNAL OF SHIP PRODUCTION, February 1994, volume 10, number 1. Study of accuracy control of hull structure.
9. Y. DONG, J. K. HONG, C. L. TSAI Y P. DONG. Finite element modeling of residual stresses in austenitic stainless steel pipe girth welds. Welding research supplement. Paginas 442-s a 449-s, October 1997.
10. WELDMENT DISTORTION, The procedure handbook of arc welding. The lincoln electric company, twelfth edition 1973, section 3, page 3.1-1 / 3.1-19.
11. MATWEB, The online materials database. <http://www.matweb.com>.
12. ASTILLEROS Y MAESTRANZAS DE LA ARMADA, ASMAR (T), Depto. Fotográfico.