

## Tema 2

# UNIONES POR SOLDADURA

## 1. GENERALIDADES

Las estructuras se forman mediante conjuntos de chapas o perfiles unidos entre sí con enlaces capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas.

El objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo.

La transmisión de esfuerzos en las uniones se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para pasar el esfuerzo de una pieza a otra se la obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal. En el caso de soldadura a tope, la transmisión es directa.

## 2. DIFERENTES TIPOS DE UNIONES POR SOLDADURA

Se llama **soldadura** a la unión de dos piezas metálicas de igual o parecida composición, de forma que la unión quede rígida y estanca.

Esto se consigue bien por el efecto de fusión que proporciona la aportación de calor, bien por la aportación de otro metal de enlace o por la combinación de ambos efectos.

Existen cerca de cuarenta sistemas de soldar, pero el más importante para las estructuras metálicas es el sistema de soldadura por fusión.

En las soldaduras por fusión el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y al solidificar se produce la unión.

Existen diferentes tipos de soldadura por fusión, pero los más utilizados son dos:

- Soldadura autógena
- Soldadura por arco eléctrico, que es la que se utiliza en estructuras metálicas.

## **2.1. SOLDADURA AUTOGENA**

En la soldadura autógena el calor lo proporciona una llama producida por la combustión de una mezcla de acetileno y oxígeno, en la proporción 1:1, que se hace arder a la salida de una boquilla. La temperatura alcanzada en la llama es de unos 1300° C. El calor producido funde los extremos a unir, con lo que se obtiene, después de la solidificación, un enlace homogéneo.

Aunque este tipo de soldadura todavía se utiliza en los talleres mecánicos, no es correcta su utilización en uniones sometidas a esfuerzos, ya que por efecto de la temperatura se provocan unas tensiones residuales muy elevadas, siendo en general más lenta y cara que la soldadura por arco.

De todas formas, cuando el soplete oxiacetilénico se utiliza en la soldadura de piezas, se le suele completar con un alambre de material de aportación que se funde al mismo tiempo que los bordes de las piezas, formando en conjunto el cordón de soldadura.

El tamaño de la boquilla del soplete es aproximadamente igual que el espesor de las chapas a unir.

## **2.2. SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO**

La soldadura por arco se basa en que si a dos conductores en contacto se les somete a una diferencia de potencial, establecemos entre ambos una corriente.

Si posteriormente se les separa, provocamos una chispa, cuyo efecto es ionizar el gas o el aire que la rodea, permitiendo así el paso de la corriente, a pesar de no estar los conductores en contacto.

Con esto lo que hacemos es crear entre ellos un arco eléctrico por transformación de la energía eléctrica en energía luminosa y calorífica.

El calor provocado por el arco no sólo es intenso, sino que además está muy localizado, lo que resulta ideal para la operación de soldar. Las temperaturas alcanzadas son del orden de 3500°C.

En el circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y de la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o se separan variará la resistencia y la intensidad y, por lo tanto, la energía se transformará en calor, con lo que la soldadura no será uniforme.

Desde el punto de vista práctico quiere decir que para obtener soldaduras uniformes es imprescindible mantener constante la separación de los electrodos durante el proceso del soldeo.

Los procedimientos de soldadura en arco pueden agruparse en tres:

- Con electrodos de carbono.
- Con electrodos de tungsteno en atmósfera de hidrógeno (soldadura al hidrógeno atómico).
- Soldadura con electrodo metálico.

a). **Soldadura con electrodo de carbono.**

No se utiliza en la estructura metálica. El arco salta entre un electrodo de carbón y la pieza a soldar.

Se complementa con metal de aportación.

b). **Soldadura con electrodo de tungsteno.**

El arco salta entre dos electrodos de tungsteno en atmósfera de hidrógeno. El calor del arco disocia las moléculas de hidrógeno, que vuelven a soldarse al contacto con las piezas a soldar, desprendiendo una gran cantidad de calor.

Este calor funde las piezas y permite que se efectúe la soldadura en ausencia del oxígeno y el nitrógeno del aire.

c). **Soldadura con electrodo metálico revestido.**

Es el procedimiento de unión normalmente utilizado en la construcción metálica, pudiendo afirmarse sin titubeos que el gran desarrollo de la construcción metálica actual se debe en gran parte a este sistema.

La unión se consigue al provocar un arco eléctrico entre las piezas a unir y un electrodo que sirve de material de aportación.

El operario establece un contacto inicial entre el electrodo y la pieza a soldar (llamada trabajo), con lo que se inicia un flujo de corriente.

A continuación se retira ligeramente el electrodo y se establece un arco, que funde el electrodo y los bordes de la pieza a unir, formándose el cordón de soldadura.

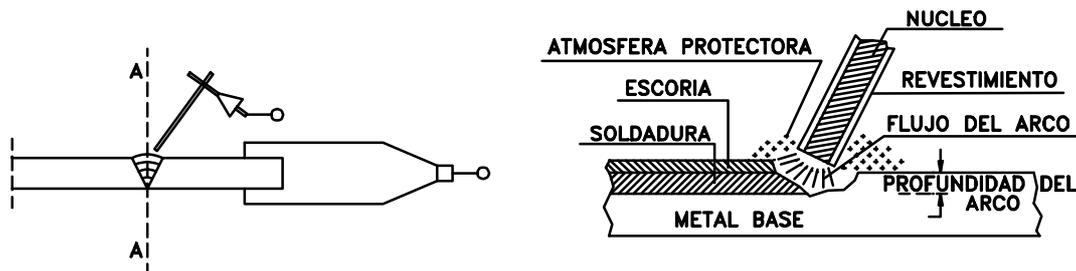


Figura1: Soldadura con electrodo metálico revestido.

La soldadura en arco, tal como hoy se entiende, se inició en Suecia a principios de siglo, cuando Kjellber inventó el electrodo revestido.

Hasta entonces los electrodos se fabricaban con varillas de acero extrasuave simplemente. En estas condiciones, el metal fundido, sin protección alguna, reacciona libremente con el oxígeno y el nitrógeno del aire, convirtiéndose al enfriar en un metal frágil.

La idea de Kjellber consistió en recubrir los electrodos con una pasta de polvo y aglomerante, de forma que al fundir se forme una escoria protectora, que impida el acceso del aire al baño de metal fundido.

El recubrimiento de los electrodos está constituido generalmente por óxidos minerales, carbonatos, silicatos o diversos compuestos orgánicos.

Además del efecto protector del material fundido, el **revestimiento** proporciona las siguientes **ventajas**:

- \* Al ser menos fusible que el metal del electrodo, forma una especie de vaina alrededor del arco, que facilita su dirección y evita la formación de arcos secundarios. También se ioniza mejor el aire que rodea la zona a soldar.
- \* Permite realizar las llamadas soldaduras de gran penetración gracias a que se puede utilizar más intensidad de corriente con ciertos tipos de electrodos, llamados electrodos de gran penetración, aumentando la zona fundida y evitando con esto el que tengamos que preparar los bordes de algunas piezas.
- \* Gracias a la protección de la escoria fundida, el enfriamiento de la soldadura se hace con mayor lentitud, evitando tensiones internas.

Los principales **tipos de revestimiento** de los electrodos son los siguientes:

<b>Tipo de revestimiento</b>	<b>Pocentaje de nitrógeno</b>	<b>Volumen de H por 100 g/cm<sup>3</sup></b>
Acido	0.034	9.0
Básico	0.015	2.5
Celulósico	0.028	15.0
Oxidante	0.035	1.5
Rutilo	0.025	12.0

En la Tabla 1 se puede observar el efecto protector de cada tipo de electrodo. En ella se indica el porcentaje aproximado de nitrógeno absorbido por la soldadura y el volumen de hidrógeno absorbido por 100 gramos de metal depositado.

Así mismo, puede observarse que el revestimiento básico es el que proporciona la mejor protección y, por tanto, dará soldaduras de mayor calidad. En contraposición, el electrodo básico es el más difícil de fundir.

Los diámetros más normales de electrodos son, en milímetros: 2, 2.5, 3.25, 4, 5, 6.3, 8, 10 y 12.

La elección del diámetro del electrodo depende del espesor del cordón de soldadura que requiere depositar, siendo la intensidad de corriente necesaria función de este diámetro.

### **3. MANANTIALES DE CORRIENTE**

La corriente a utilizar puede ser continua o alterna. La capacidad de corriente necesaria en la salida para realizar un trabajo depende del espesor del metal que se vaya a soldar y del diámetro del electrodo.

La corriente continua permite una selección más amplia de electrodos y escalas de corriente con arco más estable, por lo que suele preferirse para trabajos en posiciones difíciles y chapas finas.

Con corriente continua, los dos tercios del calor los proporciona el polo positivo y el tercio restante el polo negativo. Los electrodos de fusión difícil, como los electrodos básicos, se funden mejor conectándolos al polo positivo.

La corriente alterna consume menos energía y produce menos salpicaduras. También los transformadores requieren menos mantenimiento que las dinamos. La

corriente alterna se usa donde hay problemas de soplo del arco y en trabajos de soldadura en posición plana con chapas gruesas.

## 4. EL CORDON DE SOLDADURA

El cordón de soldadura tiene tres partes bien diferenciadas (figura 2).

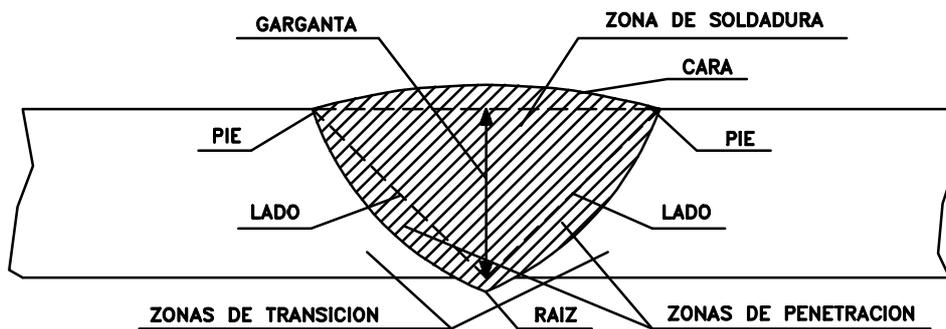


Figura 2: Partes del cordón de soldadura.

a). **Zona de soldadura:** Es la zona central, que está formada fundamentalmente por el metal de aportación.

b). **Zona de penetración.** Es la parte de las piezas que ha sido fundida por los electrodos.

La mayor o menor profundidad de esta zona define la penetración de la soldadura.

Una soldadura de poca penetración es una soldadura generalmente defectuosa.

c). **Zona de transición.** Es la más próxima a la zona de penetración.

Esta zona, aunque no ha sufrido la fusión, sí ha soportado altas temperaturas, que la han proporcionado un tratamiento térmico con posibles consecuencias desfavorables, provocando tensiones internas.

Las **dimensiones fundamentales** que sirven para determinar un cordón de soldadura son la garganta y la longitud.

La **garganta (a)** es la altura del máximo triángulo isósceles cuyos lados iguales están contenidos en las caras de las dos piezas a unir y es inscribible en la sección transversal de la soldadura.

Se llama **longitud eficaz ( $l$ )** a la longitud real de la soldadura menos los cráteres extremos. Se admite que la longitud de cada cráter es igual a la garganta.

$$l_{\text{eficaz}} = l_{\text{geométrica}} - 2 \cdot a$$

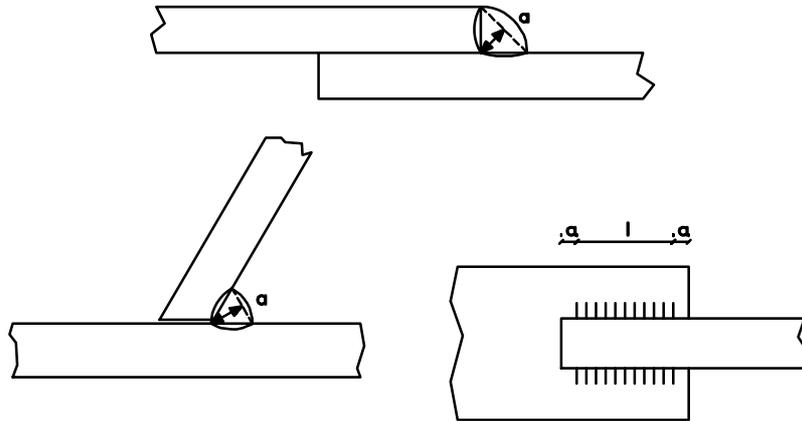


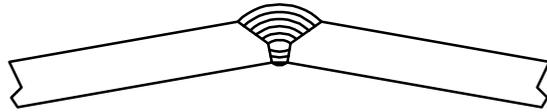
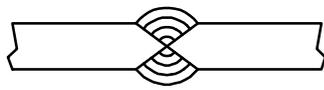
Figura 3: Dimensiones fundamentales de una soldadura.

## 5. CLASIFICACION DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

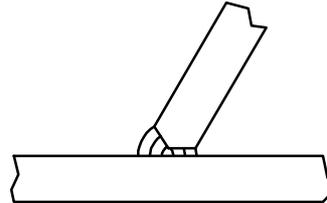
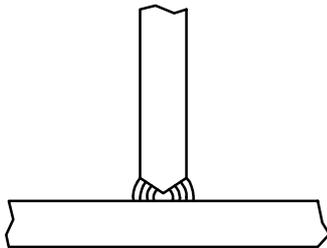
Los cordones de soldadura se pueden clasificar:

- Por la posición geométrica de las piezas a unir.
  - \* Soldaduras a tope (figura 4)
  - \* Soldaduras en ángulo (figura 5)
- Por la posición del cordón de soldadura respecto al esfuerzo (figura 6)
  - \* Cordón frontal
  - \* Cordón lateral
  - \* Cordón oblicuo
- Por la posición del cordón de soldadura durante la operación de soldar (figura 7)
  - \* Cordón plano (se designa con H)
  - \* Cordón horizontal u horizontal en ángulo (se designa por C).
  - \* Cordón vertical (se designa con V)
  - \* Cordón en techo o en techo y en ángulo (se designa con T)

EN PROLONGACION



A TOPE EN T



A TOPE EN L

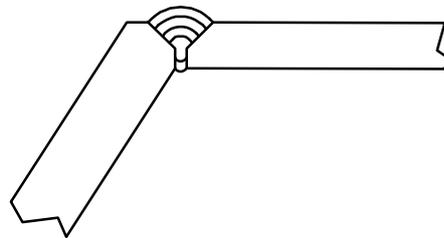
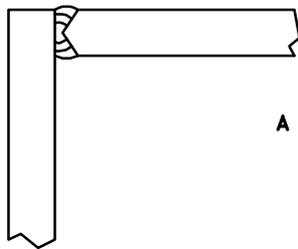
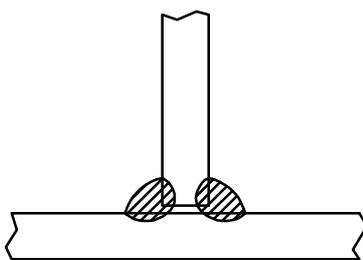
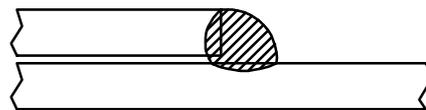


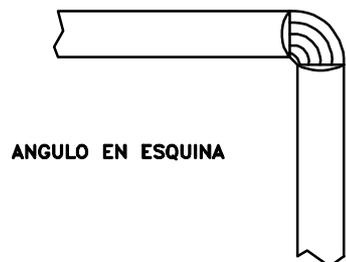
Figura 4: Soldaduras a tope.



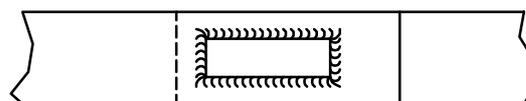
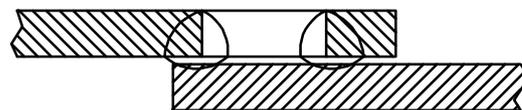
ANGULO EN RINCON



ANGULO EN SOLAPE



ANGULO EN ESQUINA



ANGULO EN RANURA

Figura 5: Soldaduras en ángulo.

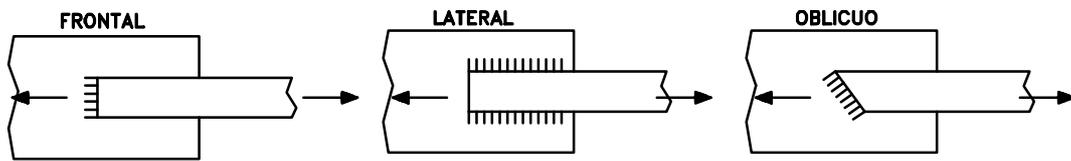


Figura 6: Clasificación de los cordones de soldadura respecto al esfuerzo.

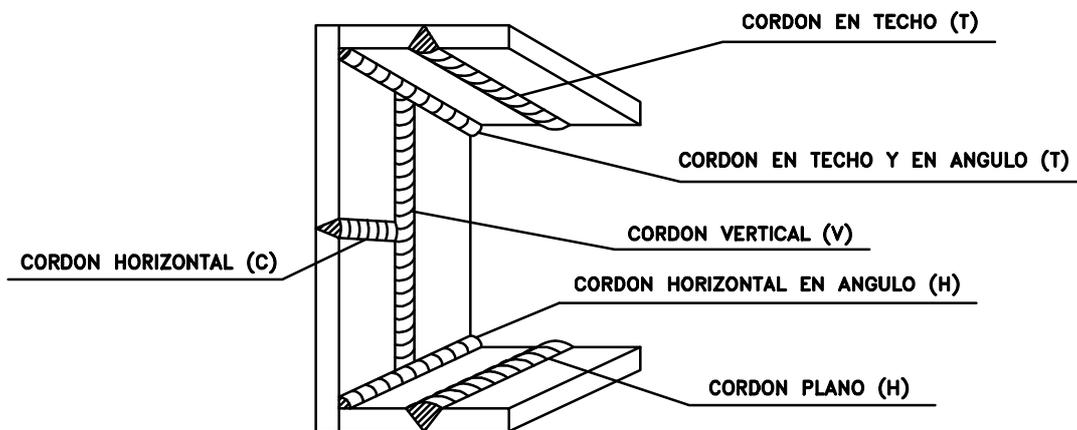


Figura 7: Clasificación de los cordones de soldadura según su posición durante la posición de soldar.

## 6. PRESCRIPCIONES DE NBE EA-95 PARA UNIONES DE FUERZA

### • SOLDADURAS A TOPE

- Deben ser continuas en toda la longitud y de penetración completa.
- Debe sanearse la raíz antes de depositar el primer cordón de la cara posterior o el cordón de cierre.
- Cuando no sea posible el acceso por la cara posterior debe conseguirse penetración completa.
- Cuando se unan piezas de distinta sección debe adelgazarse la mayor con pendientes inferiores al 25%.

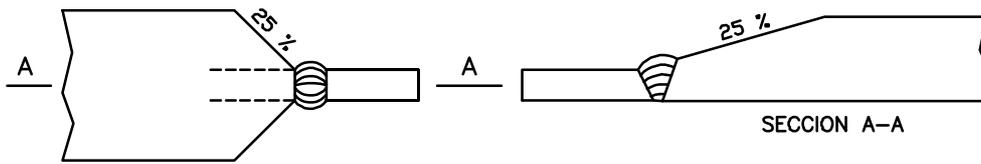


Figura 8. Soldaduras a tope.

### • SOLDADURAS EN ANGULO

- La garganta de una soldadura en ángulo que une dos perfiles de espesores  $e_1 \leq e_2$  no debe sobrepasar el valor máximo de la Tabla 2, que corresponde al valor  $e_1$  y no debe ser menor que el mínimo correspondiente al espesor  $e_2$ , y siempre que este valor mínimo no sea mayor que el valor máximo para  $e_1$ .

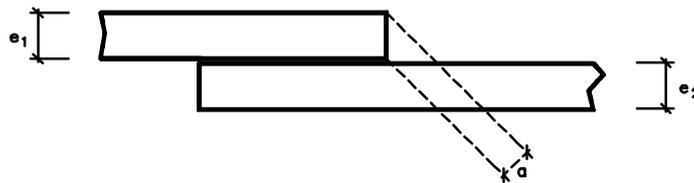


Figura 9: Soldaduras en ángulo.

- La longitud eficaz  $l$  de una soldadura lateral en ángulo con esfuerzo axial debe estar comprendida entre los siguientes valores:

$$\text{Valor mínimo: } l \geq 15 \cdot a$$

$$l \geq b$$

$$\text{Valor máximo: } l \leq 60 \cdot a$$

$$l \leq 12 \cdot b$$

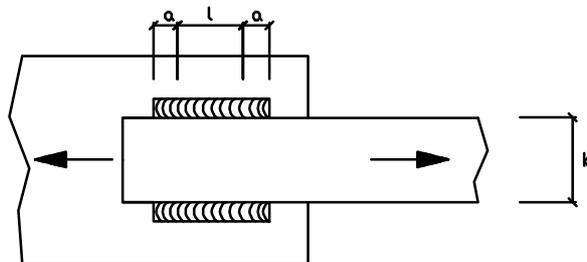


Figura 10: Longitud eficaz de una soldadura lateral.

<b>TABLA 2</b>		
<b>Valores límite de la garganta de una soldadura en ángulo en una unión de fuerza</b>		
<b>Espesor de la pieza (mm)</b>	<b>Garganta a</b>	
	<b>Valor máximo (mm)</b>	<b>Valor mínimo (mm)</b>
4.0- 4.2	2.5	2.5
4.3- 4.9	3	2.5
5.0- 5.6	3.5	2.5
5.7- 6.3	4	2.5
6.4- 7.0	4.5	2.5
7.1- 7.7	5	3
7.8- 8.4	5.5	3
8.5- 9.1	6	3.5
9.2- 9.9	6.5	3.5
10.0-10.6	7	4
10.7-11.3	7.5	4
11.4-12.0	8	4
12.1-12.7	8.5	4.5
12.8-13.4	9	4.5
13.5-14.1	9.5	5
14.2-15.5	10	5
15.6-16.9	11	5.5
17.0-18.3	12	5.5
18.4-19.7	13	6
19.8-21.2	14	6
21.3-22.6	15	6.5
22.7-24.0	16	6.5
24.1-25.4	17	7
25.5-26.8	18	7
26.9-28.2	19	7.5
28.3-31.1	20	7.5
31.2-33.9	22	8
34.0-36.0	24	8

Exceptuando los casos de uniones sometidas a cargas dinámicas, o estructuras expuestas a la intemperie o ambientes agresivos, o temperaturas inferiores a 0°C, o bien en uniones estancas, las uniones longitudinales de dos piezas podrán realizarse mediante soldaduras discontinuas.

Las uniones discontinuas pueden ser correspondientes o alternadas.

En estos casos, los valores límites recomendados por la NBE EA-95 para  $l$  y  $s$  son los siguientes:

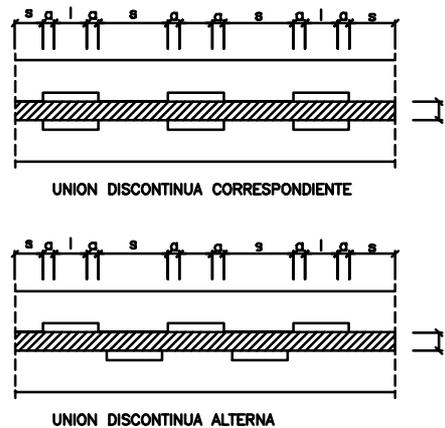


Figura 11: Uniones longitudinales discontinuas.

Valor mínimo:  $l \geq 15 \cdot a$

$l \geq 40 \text{ mm}$

Valor máximo:  $s \leq 15 \cdot e$ . Para barras comprimidas.

$s \leq 25 \cdot e$ . Para barras a tracción.

$s \leq 300 \text{ mm}$ . En todo caso.

siendo e el espesor mínimo de los perfiles unidos.

## 7. RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCION DE CORDONES.

Durante el soldeo proporcionamos calor que se propaga a lo largo y ancho de las piezas, produciéndose:

a). Un enfriamiento más o menos rápido de las partes de las piezas en las que la temperatura ha superado la del punto crítico del acero.

b). Contracciones de las zonas calentadas al enfriarse posteriormente.

La velocidad de enfriamiento de la pieza tiene un efecto importante sobre la modificación de la estructura cristalina del metal, lo cual se traduce en una modificación de sus características mecánicas y, en especial, en un aumento de su fragilidad.

Las contracciones, si operasen sobre piezas con libertad de movimiento, sólo proporcionarían **deformaciones**, pero como las piezas tendrán ligaduras, nos aparecerán, además, **tensiones internas**, que serán mayores a medida que la producción de calor sea mayor o, lo que es equivalente, a medida que las piezas sean más gruesas.

Las deformaciones que nos aparecen pueden dividirse en **deformaciones lineales** y **deformaciones angulares**.

Podemos eliminar estas deformaciones y tensiones internas si seguimos las siguientes indicaciones:

### Soldaduras de cordones múltiples

Se recomienda en NBE EA-95 que una soldadura de varios cordones se realice depositando éstos en el orden de la figura 12. El último cordón conviene que sea ancho para que la superficie de la soldadura sea lisa.

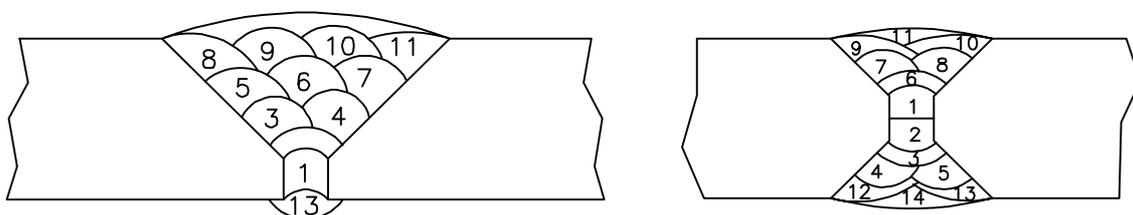


Figura 12: Recomendaciones para la ejecución de soldaduras de cordones múltiples.

### Soldaduras continuas

Cuando la longitud de la soldadura no sea superior a 500 mm se recomienda que cada cordón se empiece por un extremo y se siga hasta el otro sin interrupción en la misma dirección.

Cuando la longitud está comprendida entre 500 y 1000 mm se recomienda empezar por el centro de cada dirección.

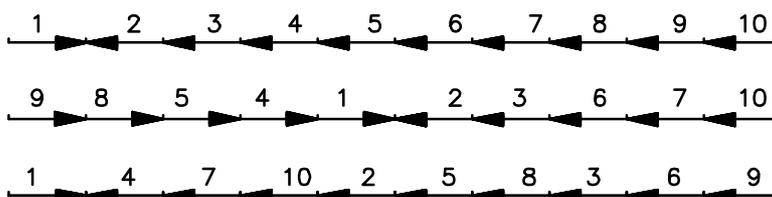


Figura 13: Soluciones para un sólo soldador.

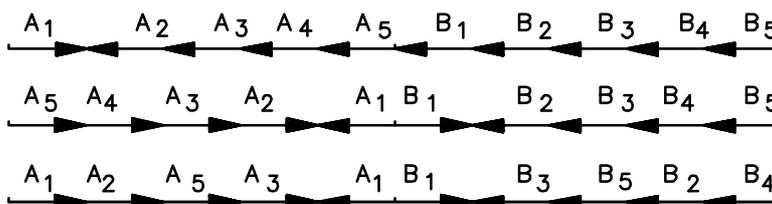


Figura 14: Soluciones para dos soldadores trabajando al tiempo.

Los cordones de soldadura de longitud superior a 1000 mm es conveniente hacerlos en «paso de peregrino», sistema del cual se dan diversas soluciones en las figuras 13 y 14.

### Uniones planas con soldaduras cruzadas

Se recomienda ejecutar en primer lugar las soldaduras transversales (figura 15).

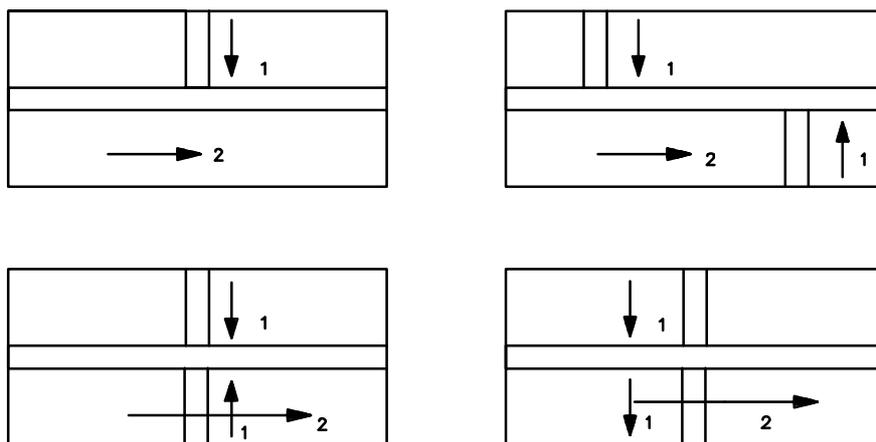
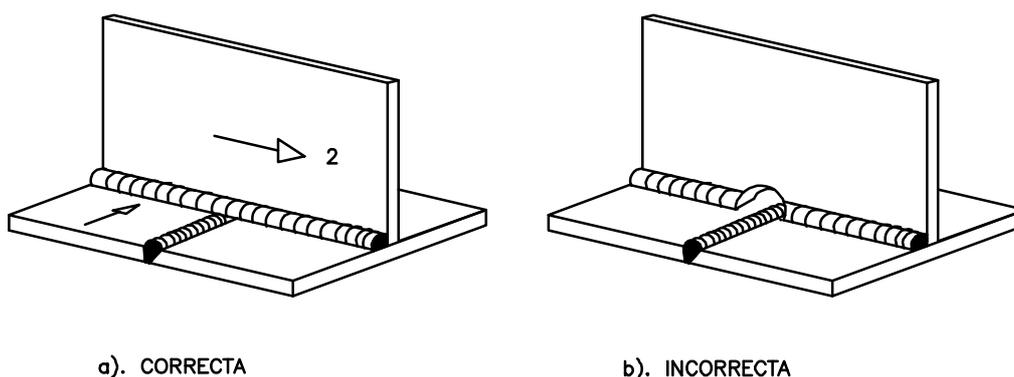


Figura 15: Uniones planas con soldaduras cruzadas.

### Uniones en ángulo con soldaduras cruzadas

Cuando sólo son dos los cordones que se cruzan (figura 16) debe seguirse la disposición a), ya que aunque parece que la disposición b) evita las tracciones biaxiales, el efecto de entalla es más desfavorable que la propia biaxialidad de tracciones.

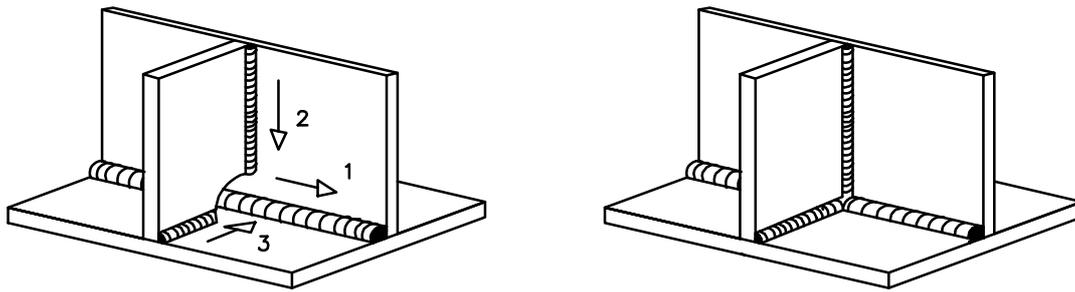


a). CORRECTA

b). INCORRECTA

Figura 16: Uniones en ángulo con soldaduras cruzadas (dos cordones).

Cuando se trata de tres cordones (figura 17), el efecto de tracción triaxial y su consecuente peligro de rotura frágil recomienda que se utilice la configuración a), en lugar de la b), a pesar del efecto de entalla, aunque la mejor solución es evitar la concurrencia de tres cordones en un punto.



a). CORRECTA

b). INCORRECTA

Figura 17: Uniones en ángulo con soldaduras cruzadas (tres cordones).

## 8. CALCULO DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

Normativa: NBE EA-95.

- **Soldaduras a tope**

La norma NBE EA-95 especifica que las soldaduras a tope realizadas correctamente no requieren cálculo alguno.

- **Soldaduras en ángulo**

Se asimila el cordón de soldadura a un triángulo isósceles (figura 18) y se toma como sección de cálculo la definida por la altura  $a$  del triángulo isósceles, por ser la sección menor.

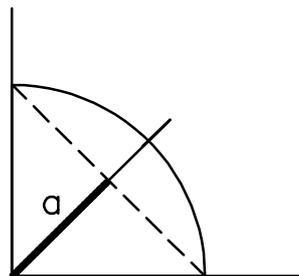


Figura 18: Triángulo isósceles que define el cordón de soldadura.

También se acepta que las tensiones son constantes a lo largo del plano definido por la altura  $a$  (figura 19) y cuya superficie es  $a \cdot l$ , siendo  $l$  la longitud del cordón de soldadura.

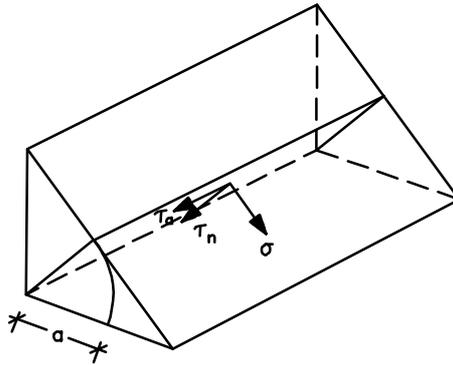


Figura 19: Plano definido por la altura a.

Sobre este plano las componentes de las tensiones serán: una tensión normal  $\sigma$  y dos componentes sobre el plano de referencia, que llamamos  $\tau_a$  y  $\tau_n$ .

Con una base experimental, la norma NBE EA-95 define como condición de seguridad de una soldadura de ángulo la que la tensión de comparación obtenida de las acciones ponderadas sea inferior a la resistencia de cálculo del acero.

$$\sigma_c^* = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u$$

siendo la resistencia de cálculo del acero  $\sigma_u$

$$\sigma_u = \frac{\sigma_E}{\gamma} \quad \text{en donde } \gamma = 1 \quad \text{para aceros garantizados}$$

$$\gamma = 1.1 \quad \text{para aceros no garantizados (laminados en frío)}$$

Aunque la tensión de comparación está referida al plano de garganta de la soldadura, en general resulta más sencillo para el cálculo abatir la sección de garganta sobre una de las caras del cordón (figura 20). La relación entre las tensiones unitarias es la siguiente:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n + t_n)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n - t_n)$$

$$\tau_a = t_a$$

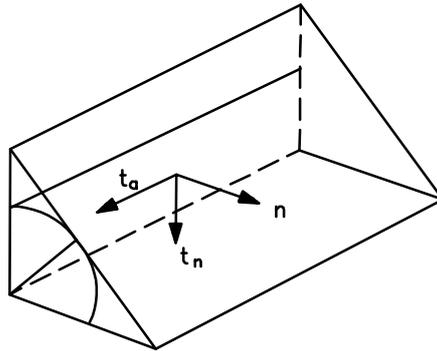


Figura 20: Abatimiento de la sección de garganta.

## 8.1. SOLICITACIONES A TRACCION

### A. UNION CON SOLO CORDONES FRONTALES.

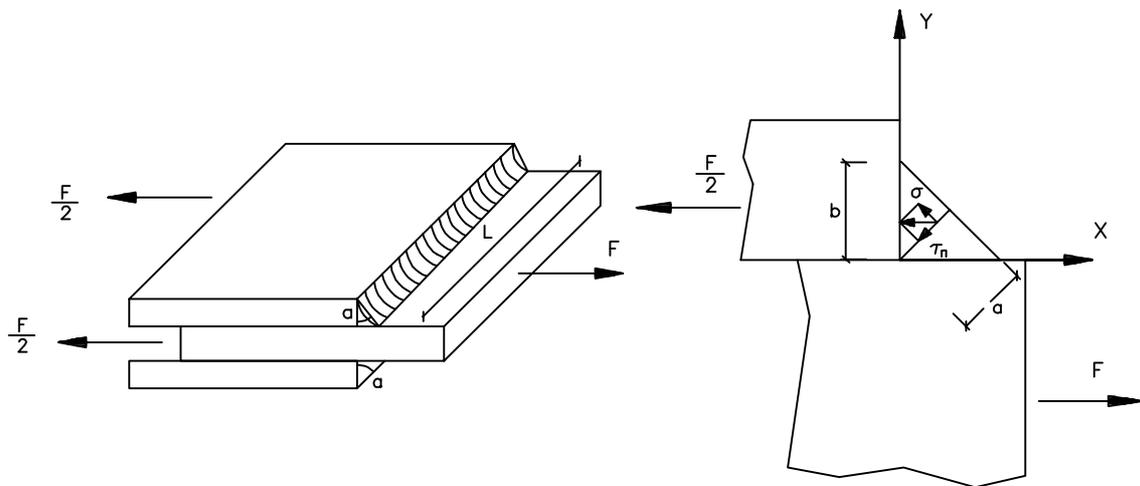


Figura 21: Unión con sólo cordones frontales.

La sección de garganta se considera abatida sobre el plano de uno cualquiera de los lados del cordón. En este plano abatido:

$$n = \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \quad t_n = 0 \quad t_a = 0$$

Las relaciones entre las tensiones del plano abatido y el de la garganta son:

$$\sigma = n \cdot \cos 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a}$$

$$\tau_n = n \cdot \sin 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a}$$

$$\tau_a = t_a = 0$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot \tau_n^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a}\right)^2 + 1.8 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a}\right)^2}$$

$$\sigma_c = \sqrt{1.4} \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} = 1.18 \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \leq \sigma_u$$

o bien

$$\frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \leq 0.85 \cdot \sigma_u$$

### B. UNION CON SOLO CORDONES LATERALES.

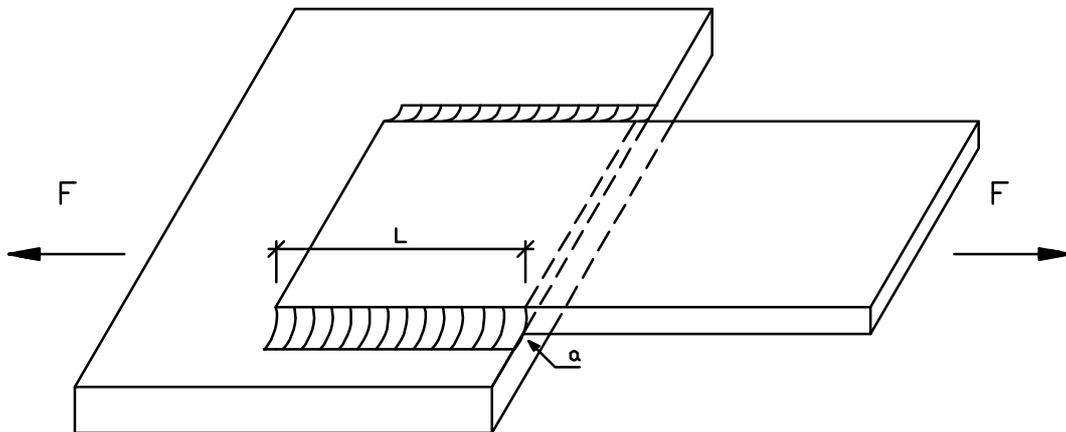


Figura 22: Unión con sólo cordones laterales.

La sección de garganta se considerará abatida sobre el plano de la superficie de contacto entre las dos piezas. Las dos secciones quedarán así contenidas en el mismo plano y sometidas a la tensión  $t_a$ . Esta tensión puede considerarse como uniforme a lo largo del cordón, siempre que la longitud de ésta no exceda de cincuenta veces el espesor de garganta, ni de doce veces el ancho del perfil unido.

$$n = 0 \quad \tau_n = 0 \quad t_a = \tau_a = \frac{F}{2 \cdot l \cdot a}$$

$$\sigma_c = \sqrt{1.8 \cdot \left( \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \right)^2} = 1.34 \cdot \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \leq \sigma_u$$

o bien

$$\frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \leq 0.75 \cdot \sigma_u$$

### C. UNION CON SOLO CORDONES OBLICUOS.

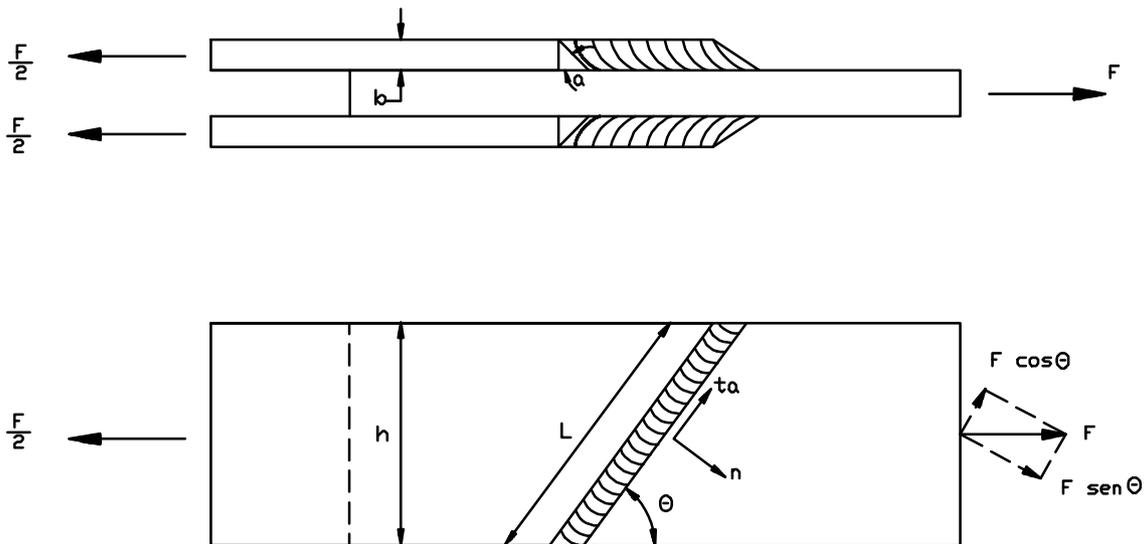


Figura 23: Unión con sólo cordones oblicuos.

La sección de garganta se abatirá sobre el lado del cordón normal a la superficie de contacto entre las dos piezas:

$$n = \frac{F \cdot \text{sen } \theta}{2 \cdot l \cdot a} = \frac{F \cdot \text{sen}^2 \theta}{2 \cdot h \cdot a} \quad \tau_n = 0$$

$$t_a = \frac{F \cdot \text{cos } \theta}{2 \cdot l \cdot a} = \frac{F \cdot \text{cos } \theta \cdot \text{sen } \theta}{2 \cdot h \cdot a}$$

$$\sigma = n \cdot \text{cos } 45^\circ \quad \tau_n = n \cdot \text{sen } 45^\circ \quad \tau_a = t_a$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{F \cdot \text{sen } \theta}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot l \cdot a}\right)^2 + 1.8 \cdot \left[\left(\frac{F \cdot \text{sen } \theta}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot l \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{F \cdot \text{cos } \theta}{2 \cdot l \cdot a}\right)^2\right]}$$

$$\sigma_c = \frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \cdot \sqrt{\frac{\text{sen}^2 \theta}{2} + 1.8 \cdot \left(\frac{\text{sen}^2 \theta}{2} + \text{cos}^2 \theta\right)} = \frac{F}{2 \cdot \beta \cdot a \cdot l} \leq \sigma_u$$

$$\frac{F}{2 \cdot l \cdot a} \leq \beta \cdot \sigma_u$$

Los valores de  $\beta$  están definidos en la Tabla 3:

TABLA 3 Valores de $\beta$	
$\theta$	$\beta$
0	0.75
30	0.77
60	0.81
90	0.85

#### D. UNIONES CON CORDONES FRONTALES Y LATERALES COMBINADOS

En estas uniones existe una interacción entre los cordones frontales y laterales, de forma que la resistencia total de la costura no es igual a la suma de las resistencias de los dos tipos de cordones.

De acuerdo con la experimentación disponible, se pueden recomendar provisionalmente las siguientes reglas de cálculo:

a). Si la longitud de los cordones laterales es mucho mayor que la longitud de los cordones frontales ( $l_2 > 1.5 \cdot h$ ) la deformación que admiten aquéllos es tal que no puede aceptarse ninguna carga para los frontales.

En este caso, el cálculo se efectuará como se indica en el epígrafe 8.2 (*Unión con sólo cordones laterales*) y se debe seguir la regla de buena práctica de no emplear uniones como las de las figuras 24 c y d, ya que el cordón  $C_3$  se fisurará antes de que los cordones  $C_2$  hayan llegado a su capacidad total de resistencia.

b). Si los cordones laterales y frontales son aproximadamente igual en longitud ( $0.5 \cdot h < l_2 \leq 1.5 \cdot l_1$ ) y no existe el cordón  $C_3$  (figuras 24 a y b) se supondrá que la máxima carga admisible de la unión es:

$$F_{\text{máx}} = F_2 + \frac{1}{1 + 2 \cdot \text{sen}^2 \theta} \cdot F_1 = F_2 + K \cdot F_1$$

Siendo:

$$F_2 = 0.75 \cdot \left( \sum l_2 \cdot a_2 \cdot \sigma_u \right)$$

$$F_1 = \beta \cdot l_1 \cdot a_1 \cdot \sigma_u$$

$$K = \frac{1}{1 + 2 \cdot \text{sen}^2 \theta}$$

Se deberá cumplir que:

$$F_1 \leq F_{\text{máx}}$$

Los valores de  $\beta$  están dados en la Tabla 3 y los valores de K en la Tabla 4.

<b>TABLA 4</b>	
<b>Valores de K</b>	
$\theta^\circ$	$K = \frac{1}{1 + 2 \cdot \text{sen}^2 \theta}$
0	1.0
10	0.95
20	0.81
30	0.66
40	0.55
50	0.46
60	0.40
70	0.36
80	0.34
90	0.33

c). Si los cordones laterales y frontales son aproximadamente iguales en longitud ( $0.5 \cdot h < l_2 \leq 1.5 \cdot l_1$ ) y existe el cordón  $C_3$  (figuras 24 c y d) se supondrá que la máxima carga admisible en la unión es:

$$F_{\text{máx}} = \frac{1}{3} \cdot F_2 + F_3$$

Siendo:

$$F_2 = 0.75 \cdot \left( \sum l_2 \cdot a_2 \cdot \sigma_u \right)$$

$$F_3 = \beta \cdot l_3 \cdot a_3 \cdot \sigma_u$$

Los valores de  $\beta$  vienen dados en la Tabla 3.

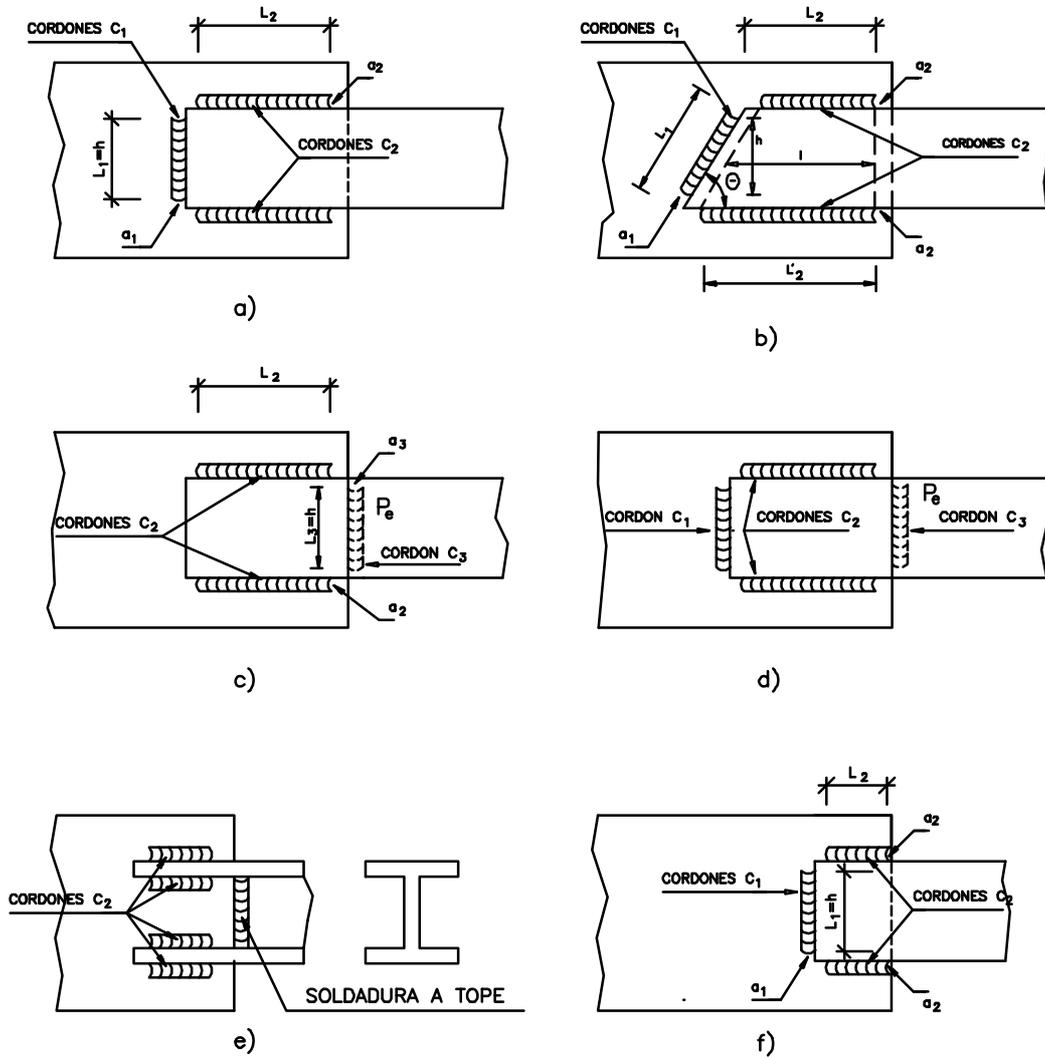


Figura 24: Unión con cordones frontales y laterales combinados.

d). Si la longitud de los cordones laterales es mucho menor que la de los cordones frontales ( $l_2 \leq 0.5 \cdot l_1$ ) (figura 24 f) se supondrá que la máxima carga admisible en la unión es:

$$F_{\text{máx}} = \frac{1}{3} \cdot F_2 + F_1$$

$$F_2 = 0.75 \cdot \left( \sum l_2 \cdot a_2 \cdot \sigma_u \right)$$

$$F_1 = \beta \cdot l_1 \cdot a_1 \cdot \sigma_u$$

## 8.2. SOLICITACIONES A FLEXION

### A. UNION CON SOLO CORDONES FRONTALES LONGITUDINALES

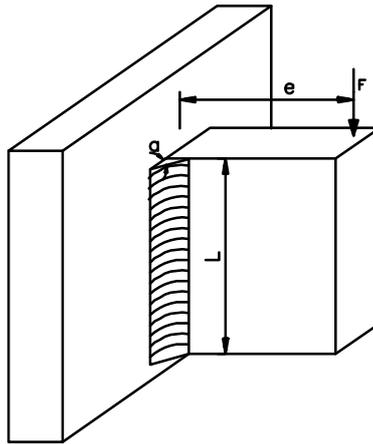


Figura 25: Unión con sólo cordones frontales longitudinales.

La tensión máxima producida por el momento flector puede calcularse abatiendo la sección de garganta sobre el plano del lado del cordón paralelo al eje de momento:

$$n = \frac{M}{W} = \frac{F}{2} \cdot e \cdot \frac{6}{a \cdot L^2} \quad t_n = 0$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n = \tau_n = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F \cdot e}{a \cdot L^2}$$

La tensión tangencial originada por el esfuerzo cortante puede suponerse uniforme:

$$t_a = \tau_a = \frac{F}{2 \cdot a \cdot L}$$

Combinando las tensiones obtenidas se obtendrá:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u$$

Si  $e \gg L$ , es decir, si el momento flector es grande comparado con el esfuerzo cortante, puede utilizarse la fórmula simplificada:

$$\sigma_c = 3.55 \cdot \frac{F \cdot e}{a \cdot L^2} \leq \sigma_u$$

## B. UNION CON SOLO CORDONES FRONTALES TRANSVERSALES

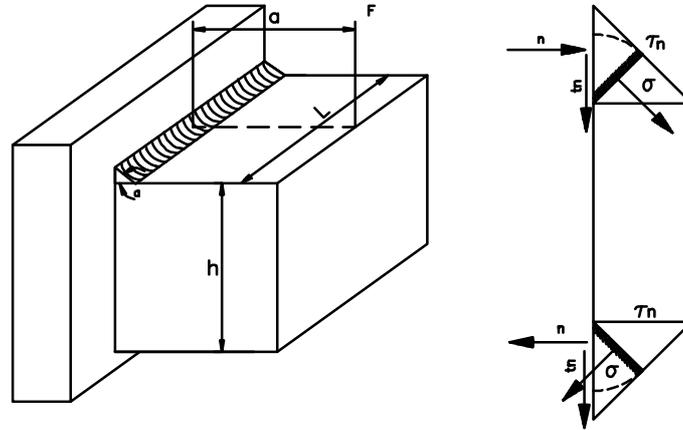


Figura 26: Unión con sólo cordones frontales transversales.

Considerando primero sólo el momento flector, la tensión máxima puede calcularse abatiendo la sección de garganta sobre el plano de unión de las piezas.

$$n = \frac{F \cdot e}{W}$$

En la mayor parte de los casos prácticos,  $h$  será grande con respecto a  $a$ , y se puede tomar:

$$W = \frac{I}{h} = \frac{a \cdot L \cdot h^2}{h} = a \cdot L \cdot h$$

$$n = \frac{F \cdot e}{a \cdot L \cdot h} \quad t_n = \frac{F}{2 \cdot L \cdot a} \quad t_a = 0$$

$$\sigma_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n + t_n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{a \cdot L \cdot h} \cdot \left( e + \frac{h}{2} \right)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n - t_n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F}{a \cdot L \cdot h} \cdot \left( e - \frac{h}{2} \right)$$

$$\tau_a = 0$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u$$

### C. UNION CON CORDONES FRONTALES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

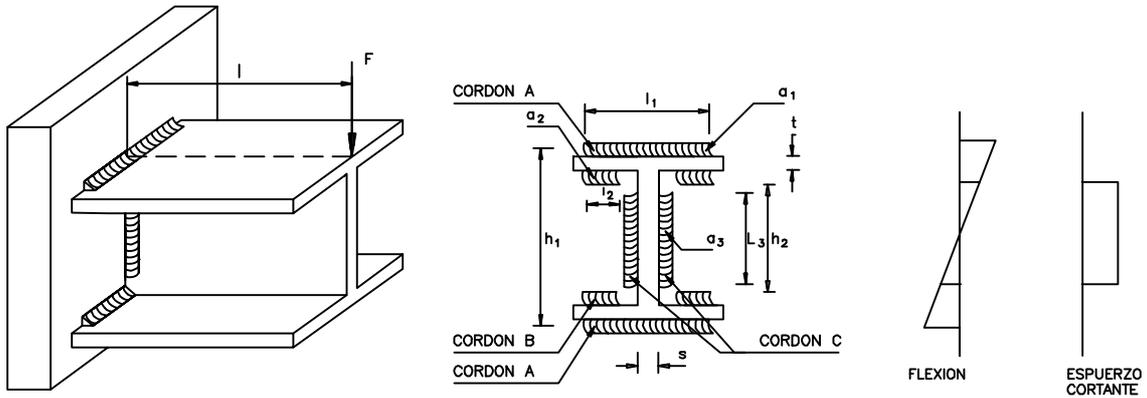


Figura 27: Unión con cordones frontales longitudinales y transversales.

Se considera que el esfuerzo cortante actúa únicamente sobre los cordones que unen el alma y que puede considerarse como distribuido uniformemente en su sección de garganta:

$$t_a = \tau_a = \frac{F}{2 \cdot a_3 \cdot L_3} \leq \sigma_u$$

Las tensiones debidas al momento flector se calculan teniendo en cuenta el área total de la sección de garganta del cordón, abatida sobre el plano de la junta, y por tanto:

$$n = \frac{M}{W} \quad \sigma_n = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n$$

Para los cordones exteriores sólo se considera el momento flector:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_n^2 + 1.8 \cdot \tau_n^2} = \sqrt{\frac{2.8 \cdot n^2}{2}} = 1.18 \cdot n = 1.18 \cdot \frac{M}{W} \leq \sigma_u$$

$$W = a_1 \cdot L_1 \cdot h_1 + 2 \cdot L_2 \cdot a_2 \cdot h_2$$

### 8.3. SOLICITACIONES DE TORSION Y ESFUERZO CORTANTE COMBINADOS

#### A. UNION CON SOLO CORDONES LATERALES

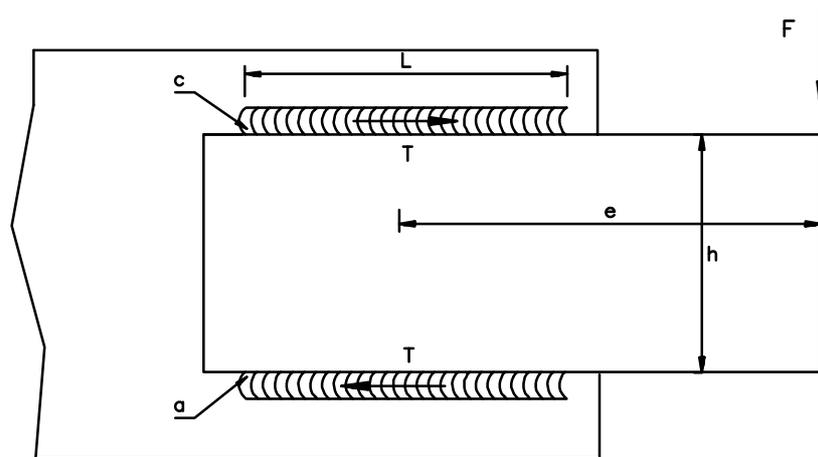


Figura 28: Unión con sólo cordones laterales.

El momento torsor  $M_T = F \cdot e$  se descompone en un par de fuerzas  $T$  que actúan sobre los cordones:

$$M_T = F \cdot e = T \cdot \left( h + 2 \cdot \frac{a}{2} \right) = T \cdot (h + a)$$

Estas fuerzas producen en los dos cordones la tensión tangencial longitudinal:

$$t_a = \tau_a = \frac{T}{a \cdot L} = \frac{M_T}{a \cdot (h + a) \cdot L}$$

$$t_n = \frac{F}{2 \cdot L \cdot a} \quad \sigma = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot t_n$$

que se puede considerar como uniforme distribuida a lo largo de los cordones.

Resulta:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u$$

**B. UNION CON DOS CORDONES LATERALES Y UNO FRONTAL**

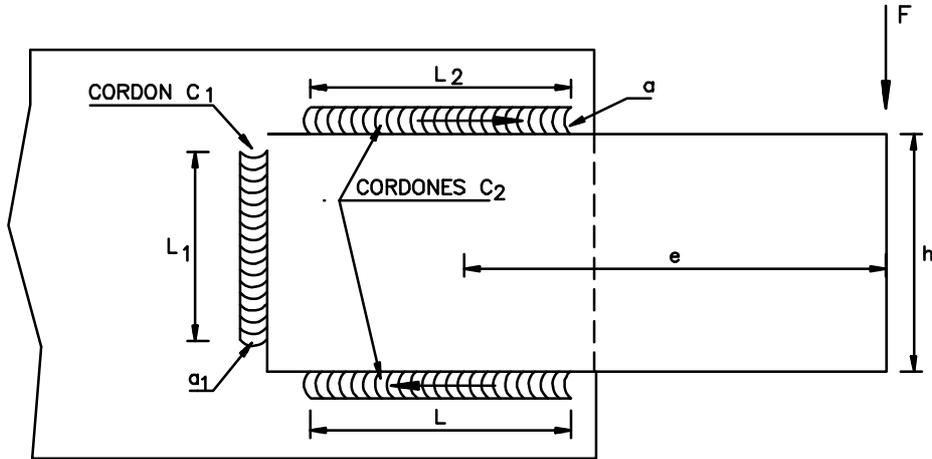


Figura 29: Unión con dos cordones laterales y uno frontal.

El momento torsor que agotaría el cordón  $a_2$  sería:

$$M_L = 0.75 \cdot \sigma_u \cdot L_2 \cdot a_2 \cdot (h + a_2)$$

El momento torsor que agotaría el cordón  $a_1$  sería:

$$n = \frac{M_e}{W} = \frac{M \cdot 6}{a_1 \cdot L_1^2}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right)^2 + 1.8 \cdot \left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{1.4} \cdot n \leq \sigma_u$$

$$n = \frac{\sigma_u}{\sqrt{1.4}} \quad \frac{\sigma_u}{\sqrt{1.4}} = \frac{6 \cdot M_c}{a_1 \cdot L_1^2}$$

$$M_e = \frac{\sigma_u \cdot a_1 \cdot L_1^2}{6 \cdot \sqrt{1.4}} = 0.14 \cdot \sigma_u \cdot a_1 \cdot L_1^2$$

El momento torsor se descompone proporcionalmente a estos dos, para saber cuanto soporta cada cordón:

$$M_T = F \cdot e$$

$$M_1 + M_2 = M_T$$

$$\frac{M_T}{M_L + M_e} = \frac{M_2}{M_L}$$

$$\frac{M_T}{M_L + M_e} = \frac{M_1}{M_e}$$

El esfuerzo cortante se considera absorbido por el cordón 2.

La soldadura 1 se calcula a flexión, tal y como se describe en el apartado 8.2 A *Unión con sólo cordones frontales longitudinales*, pero con un único cordón.

La soldadura 2 se calcula como se describe en el apartado 8.3 A *Unión con sólo cordones laterales*.

## 8.4. UNIÓN DEL ALMA CON LAS PLATABANDAS

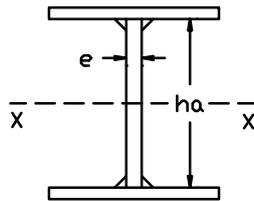


Figura 30: Unión del alma con platabandas.

Debe cumplirse:

$$\frac{F \cdot S}{2 \cdot a \cdot I_x} \leq 0.75 \cdot \sigma_u$$

Siendo:

F Esfuerzo cortante en la sección.

S Momento estático de la platabanda respecto al eje X

$I_x$  Momento de inercia de la sección completa respecto al eje X

Puede, del lado de la seguridad, utilizarse la fórmula simplificada siguiente:

$$\frac{F}{2 \cdot a \cdot h_a} \leq 0.75 \cdot \sigma_u$$