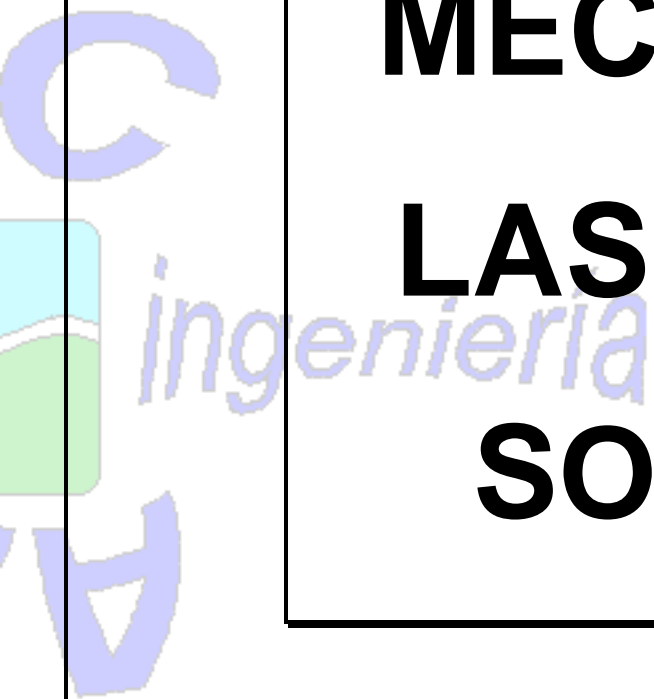


TUTORIAL N° 46

**CÁLCULO
MECÁNICO DE
LAS UNIONES
SOLDADAS**



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción
 - 1.1. Generalidades
 - 1.2. Clasificación de las uniones soldadas
 - 1.3. Cálculo para soldaduras a tope
2. Resistencia de un cordón de soldadura
 - 2.1. Generalidades
 - 2.2. Resistencia de cálculo de las soldaduras en ángulo
 - 2.3. Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope
 - 2.4. Disposiciones constructivas
3. Resolución de uniones típicas sometidas a tracción
 - 3.1. Unión con sólo cordones frontales
 - 3.2. Unión con sólo cordones laterales
 - 3.3. Unión con sólo cordones oblicuos
 - 3.4. Unión con cordones frontales y laterales combinados
4. Resolución de uniones típicas sometidas a flexión
 - 4.1. Unión con sólo cordones frontales longitudinales
 - 4.2. Unión con sólo cordones frontales transversales
 - 4.3. Unión con sólo cordones frontales longitudinales y transversales
5. Solicitaciones de torsión y esfuerzo cortante combinados
 - 5.1. Unión con sólo cordones laterales
 - 5.2. Unión con dos cordones laterales y uno frontal

CÁLCULO MECÁNICO DE LAS UNIONES SOLDADAS

1. Introducción

1.1. Generalidades

El objetivo de este tutorial es exponer los diferentes métodos de cálculo de las uniones soldadas, los distintos criterios existentes y la filosofía que subyace, todo ello orientado a poder calcular la resistencia que presenta un cordón de soldadura a las sollicitaciones a que puedan verse sometidas.

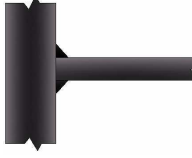


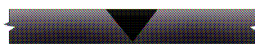
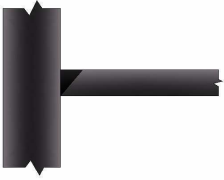

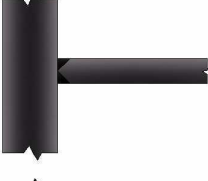

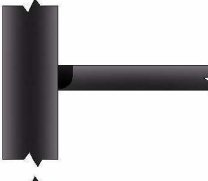

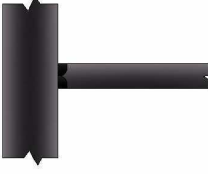

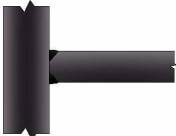
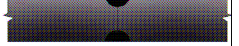
Por lo tanto, es un tutorial eminentemente práctico, muy útil para todo aquel que pretenda diseñar uniones soldadas, y quiera estar seguro de su resistencia al uso.

1.2. Clasificación de las uniones soldadas

Las uniones soldadas se pueden clasificar según la posición relativa de las chapas soldadas en:

- soldaduras en ángulo: en este tipo de configuración no se realiza ningún tipo de preparación en los bordes de las piezas a unir antes de soldar y la penetración del cordón se debe exclusivamente a la fusión que se genera durante el proceso;
- soldaduras a tope: en este tipo antes de soldar se realiza una preparación de bordes en las piezas, con el objeto de favorecer la penetración del cordón (en las piezas de poco espesor no es necesaria). A la vez, en las uniones a tope se puede distinguir:
 - de penetración completa, cuando la fusión y mezcla entre el material base y el de aportación alcanza a todo el espesor de la unión;
 - de penetración parcial, si esta fusión y mezcla no alcanza a todo el espesor.

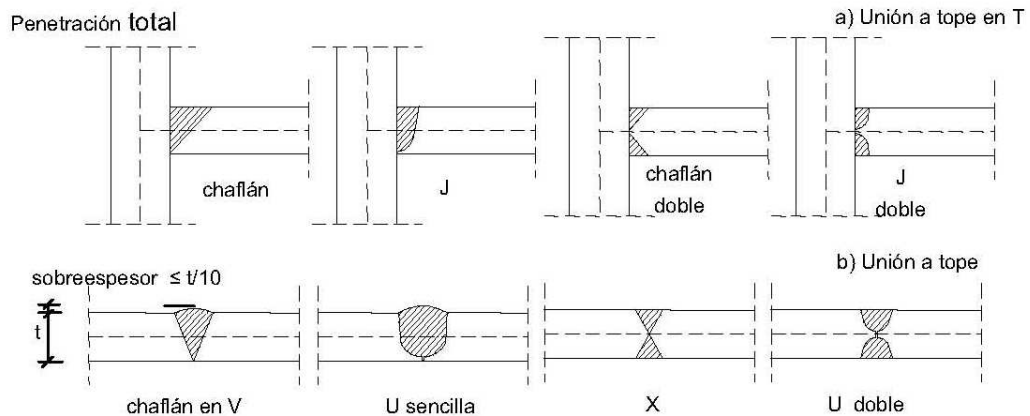
Estos tipos definidos por la geometría de la unión, se pueden combinar de la forma indicada en la tabla siguiente.

Tipo de soldadura	Tipo de unión		
	Unión a tope	Unión a tope en T	Unión de solape
Soldadura en ángulo			
Soldadura de ojal (o en ranura)			
Soldadura a tope con penetración completa	Sencilla en V 		
	En doble V 		
	Sencilla en U 		
	En doble U 		
Soldadura a tope con penetración parcial	En dobel V 	En chaflán doble 	
	En doble U 		

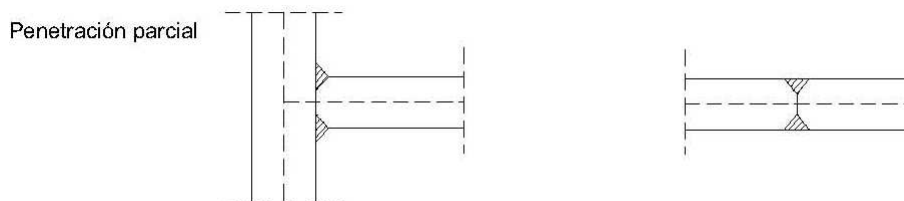
1.3. Cálculo para soldaduras a tope

Para el caso de las soldaduras a tope, el nuevo Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) o la anterior NBE EA-95, especifica que estas soldaduras, si son realizadas correctamente, esto es, ejecutadas continuas en toda su longitud y a penetración total, entonces no requieren cálculo alguno. En este caso la resistencia de cálculo, es decir, lo que aguante ante cualquier sollicitación, va a estar condicionada con la resistencia que tenga la pieza más débil de entre las unidas mediante la soldadura.

Una soldadura a tope se considera que tiene una penetración total si la fusión entre el material base y el de aportación se produce en todo el espesor de la unión. Se adjunta figuras representativas del caso,



Por otro lado, se definirán aquellas soldaduras como de penetración parcial cuando la penetración sea inferior a dicho espesor. En las ilustraciones siguientes se representan a modo de ejemplo este tipo de uniones soldadas,



Como se aprecia, en ambos casos el tipo de unión podrá ser a tope o a tope en T.

2. Resistencia de un cordón de soldadura

2.1. Generalidades

El cálculo de la resistencia de un cordón de soldadura tiene una base experimental y basada en la experiencia obtenida. Es por ello que no existe un criterio único y universal, sino que cada norma o país tiene su propio criterio. No obstante, se puede tomar como referencia cualquiera de las normas de cálculo existentes, que éstas suponen implícita o explícitamente las siguientes bases comunes sobre los que se levantan sus respectivos criterios de cálculo:

1º.- que durante la ejecución de la soldadura que se pretende calcular su resistencia, se han seguido en todo momento las reglas de buena práctica;

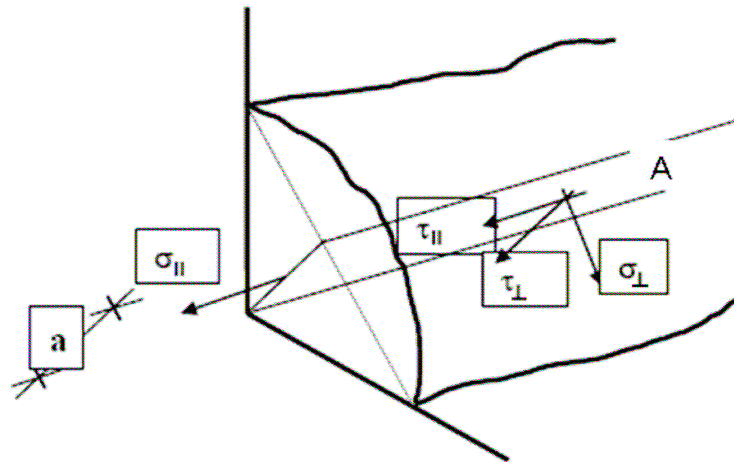
2º.- que las características mecánico-resistentes del metal de aportación son, como mínimo, iguales a las del metal de base;

3º.- que en el diseño del cordón, se ha evitado, mediante la oportuna elección del material y de los detalles constructivos adecuados, el peligro de una rotura frágil.

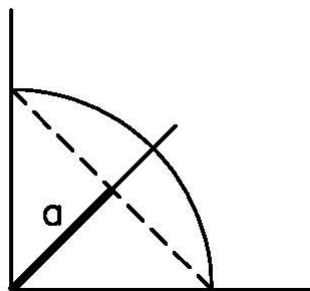
De acuerdo con la segunda de estas hipótesis, las uniones a tope con penetración completa, no necesitan ser calculadas, y es evidente que su capacidad portante saldrá superior o al menos igual que las de las piezas que une (no obstante, en uniones sometidas a cargas dinámicas sí que es preciso comprobarlas).

Por lo tanto, en lo que sigue el cálculo mecánico de las uniones soldadas se centrará para el caso de las uniones en ángulo, y todo el desarrollo teórico que a continuación se expondrá, será de aplicación para este tipo de uniones.

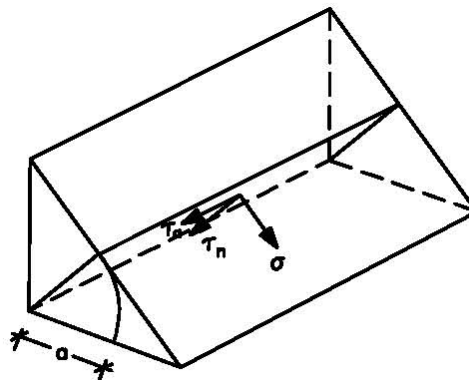
Para comenzar con el estudio de las uniones en ángulo, se va a definir lo que se llama el plano de garganta del cordón de soldadura. En estos cordones en ángulo se define el llamado plano de garganta A (ver figura siguiente que se adjunta), el determinado por la línea intersección de los dos planos a unir y la altura del mayor triángulo isósceles que puede ser inscrito en la sección del cordón. A esta altura se le denomina ancho de garganta o espesor de garganta, o simplemente garganta, a , del cordón. En la siguiente figura también se han representado las tensiones que pueden solicitar un cordón de soldadura en ángulo,



Por lo tanto, el cordón de soldadura se puede asimilar a un triángulo isósceles, como se representa en la figura siguiente, del cual se va a tomar como sección de cálculo la definida por la altura “a” (la garganta del cordón) de dicho triángulo isósceles, por ser la de menor sección.



Asimismo, se va a considerar que las tensiones son constantes a lo largo del plano definido por la altura “a” y cuya superficie es $a \cdot L$, siendo “L” la longitud del cordón de soldadura.



A continuación sobre este plano, se van a definir las componentes de las tensiones que se generan en un cordón de soldadura, a saber que serán: una tensión normal al plano σ , y otras dos componentes sobre el plano de referencia y perpendiculares entre sí, τ_a y τ_n .

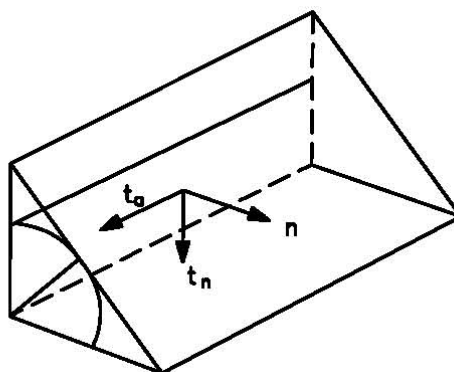
A partir de estas tensiones, ya cada norma monta su expresión de cálculo, obtenida a partir de una base experimental, que proporciona la resistencia última de un cordón de soldadura. Así por ejemplo, la norma NBE EA-95, definía como condición de seguridad de una soldadura en ángulo, que la tensión de comparación, σ_c^* , (obtenida mediante una expresión matemática que a continuación se expone de las tensiones anteriores) sea inferior a la resistencia de cálculo del acero. Es decir, que

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

siendo σ_u la resistencia de cálculo del acero

Siguiendo con el planteamiento llevado hasta ahora, se va a dar un paso más en el desarrollo. Este va a ser el de sustituir las tensiones anteriores por otras que van a ser más intuitivas y fáciles de calcular.

Así, y como ya se ha visto anteriormente, la tensión de comparación anterior está referida a tensiones que actúan en el plano de garganta de la soldadura. En general, va a resultar más sencillo para el cálculo si se abate la sección de garganta sobre una de las caras del cordón, según la figura siguiente.



Sobre esta cara abatida, se puede definir las tensiones (n, t_n, t_a) según se muestra en la figura anterior.

Ahora sólo falta relacionar ambos grupos de tensiones (σ, τ_n, τ_a) que es la que aparece en la expresión del cálculo de la tensión de comparación, σ_c^* , y (n, t_n, t_a) . Esta relación entre ambos grupos de tensiones unitarias es la siguiente que se expresa:

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

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

$$\tau_a = t_a$$

2.2. Resistencia de cálculo de las soldaduras en ángulo

Como criterio general, todas las normas vigentes admiten que un cordón en ángulo agota su capacidad resistente cuando una determinada función del estado tensional, llamada tensión de comparación, σ_c^* , alcanza el valor de la tensión última del metal de base. Es decir, y traducido en lenguaje matemático, cuando se cumple que,

$$\sigma_c^* = f(\sigma, \tau_a, \tau_n) = \sigma_u$$

Hay que resaltar que σ_c^* no es más que un artificio ideado para facilitar los cálculos; y por consiguiente, no es una tensión real que pueda medirse con un dispositivo experimental.

Después de muchos años de estudio, y dada la complejidad del estado tensional existente en un cordón de soldadura, todavía no ha sido factible llegar a la determinación teórica de dicha función σ_c^* .

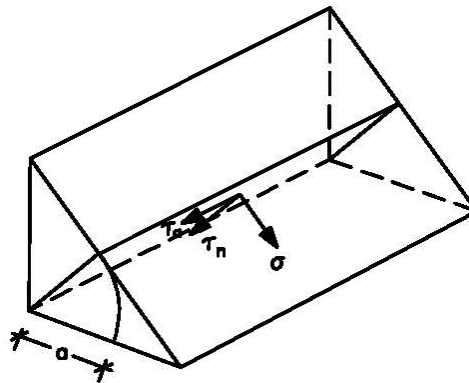
No obstante, y para dar una respuesta válida y a la vez que funcione, tradicionalmente se han admitido como válidas expresiones de la forma siguiente para la tensión de comparación:

$$\sigma_c^* = \beta x \sqrt{k \times (\sigma^2 + \lambda \times (\tau_n^2 + \tau_a^2))}$$

donde los coeficientes β , k , λ se calculan mediante la realización de ensayos experimentales donde los cordones de soldadura son llevados hasta la rotura (de ahí el que no se trabaje en “tensiones admisibles”). A continuación se van a mostrar una serie de expresiones propuestas por las distintas normativas para el cálculo de la resistencia de los cordones de soldadura:

- Método direccional:

Mediante este método, se pasa a descomponer los esfuerzos transmitidos por unidad de longitud en sus componentes tensionales, según se muestra en la figura siguiente, suponiendo que sobre la sección de garganta hay una distribución uniforme de tensiones.



Si se aplica este método de comprobación, la soldadura ejecutada en ángulo será suficiente si, con las tensiones de cálculo, se cumple simultáneamente que,

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \times (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}}$$

$$\sigma \leq 0.9 \times \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

siendo,

f_u , resistencia última a tracción de la pieza más débil de la unión;

σ , la tensión normal perpendicular al plano de la garganta;

τ_n , es la tensión tangencial (en el plano de la garganta) perpendicular al eje del cordón;

τ_a , la tensión tangencial (en el plano de la garganta) paralelo al eje del cordón;

γ_{M2} , es un factor parcial de seguridad, de valor 1.25

β_w , es el coeficiente de correlación, según lo dado en la siguiente tabla

Coeficiente de correlación, β_w		
Acero	f_u , N/mm ²	β_w
S 235	360	0,80
S 275	430	0,85
S 355	510	0,90

- Método de la máxima tensión tangencial

Aplicando este otro criterio, la resistencia de un cordón de soldadura en ángulo es suficiente si la resultante de todas las fuerzas transmitidas por el cordón y por unidad de longitud, esto es, $F_{W,Ed}$, no supera el valor de su resistencia de cálculo, $F_{W,Rd}$, con independencia de la orientación del cordón.

La comprobación de resistencia por unidad de longitud de un cordón en ángulo, por tanto, se realiza de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_{W,Ed} \leq F_{W,Rd} = a^* f_{vw,d}$$

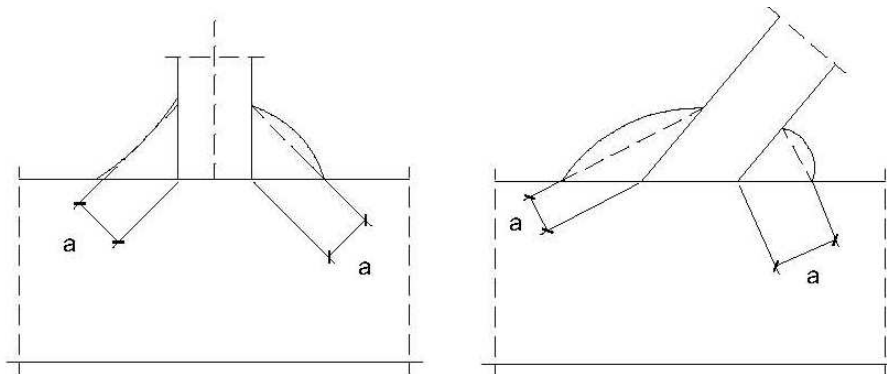
siendo,

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \times \gamma_{M2}}, \text{ según marca el CTE y el EC3;}$$

f_u , es la resistencia última a tracción de la pieza más débil de la unión;

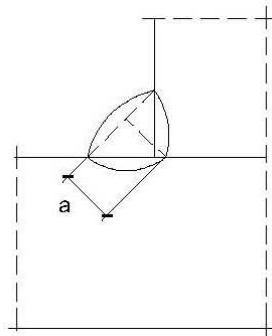
β_w , es el coeficiente de correlación, ya dado en la tabla anterior.

Por otro lado, a , es el espesor de garganta de un cordón en ángulo. Como ya se ha dicho, ésta será la mayor de las alturas, medida perpendicularmente a la cara exterior, de los triángulos de entre los que se pueden inscribir entre las superficies de las piezas que hayan alcanzando la fusión y la superficie exterior de la soldadura, de acuerdo a las figuras siguientes,



Se observarán las siguientes limitaciones para la garganta del cordón:

- el espesor de garganta de un cordón de soldadura en ángulo no será menor de 3 mm;
- en el caso de soldadura con penetración profunda, se podrá tomar el espesor de garganta según la figura adjunta, siempre que se demuestre por ensayos que se puede conseguir de forma estable la penetración requerida,



- en el caso en que se realice la soldadura de manera automática con arco sumergido, se podrá considerar, sin necesidad de ensayos, un incremento del 20% del espesor de la garganta, hasta un máximo de 2 mm.

Como longitud del cordón se tomará la nominal. En uniones por solape de longitudes superiores a $150a$, la resistencia de cálculo se reducirá utilizando el coeficiente siguiente,

$$\beta_{LW} = 1,2 - 0,2 \frac{L}{150a} \leq 1,0$$

donde,

L, longitud total del solape en la dirección del esfuerzo.

Esta reducción tiene en cuenta el efecto de la distribución no uniforme de tensiones a lo largo de un cordón de cierta longitud, pero no es de aplicación cuando la citada distribución de tensiones en el cordón se corresponde con la del material base, lo que ocurre, por ejemplo, en el caso de las soldaduras en uniones ala-alma de vigas armadas.

2.3. Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope

Como ya se ha dicho anteriormente, si la soldadura es de penetración total no es necesaria ninguna comprobación. La resistencia de cálculo será igual a la de la más débil de las piezas unidas.

Por otro lado, no se permite emplear un solo cordón de soldadura a tope con penetración parcial para transmitir esfuerzos de tracción perpendiculares a su eje longitudinal.

En uniones a tope con penetración parcial la resistencia de cálculo se determinará como la de los cordones de soldadura en ángulo, teniendo en cuenta lo siguiente:

- el espesor de garganta será la profundidad de la penetración que se pueda conseguir de forma estable, y que se debe determinar mediante evidencia experimental previa;

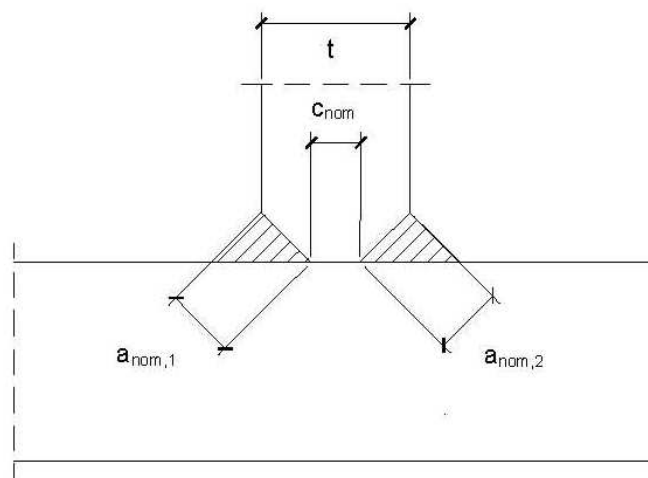
- para el caso de que se tenga preparación de bordes en U, V, J o recto, se tomará como espesor de garganta el canto nominal de la preparación menos 2,0 mm, a menos que se puedan justificar experimentalmente valores superiores.

Si la soldadura es en T se comprobará como una soldadura a tope con penetración total, si se cumple lo siguiente:

$$a_{nom,1} + a_{nom,2} \geq t$$

$$c_{nom} \leq t/5$$

$$c_{nom} \leq 3 \text{ mm}$$



En cualquier otro caso se comprobará como una soldadura en ángulo o en ángulo con penetración si es que se cumplen las condiciones correspondientes.

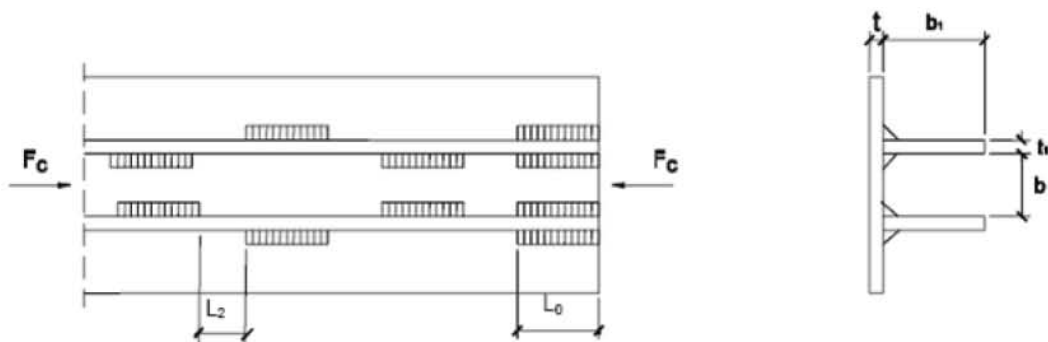
Por otro lado, cuando se trate de perfiles en L o en U unidos por una sola cara, se debe tener en cuenta la excentricidad, o alternativamente, se deberá considerar como sección del perfil el área concéntrica con la resistencia de la unión.

Por último, para el caso de uniones híbridas, trabajando a cortante con distinto tipo de tornillo o formadas por cordones de soldadura y tornillos, cada uno de estos grupos se dimensionará para transmitir la carga total. Sin embargo, se podrán considerar trabajando conjuntamente con la soldadura, los tornillos de alta resistencia diseñados para trabajar sin deslizamiento en estado límite último. En este caso, el apriete final de los tornillos se efectuará una vez realizadas las soldaduras.

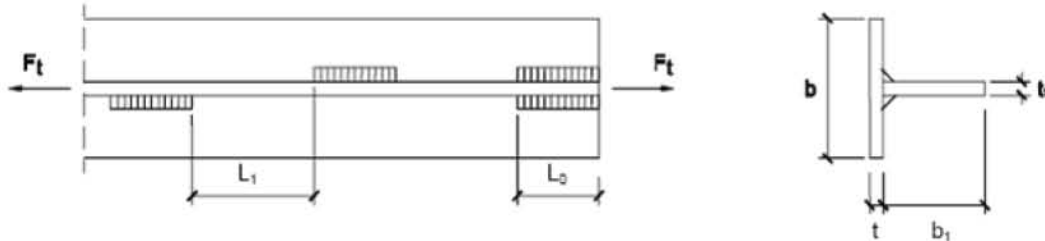
2.4. Disposiciones constructivas

A continuación se resume en una serie de tablas que siguen las disposiciones constructivas de las soldaduras, y aquellos aspectos y requisitos a tener en cuenta en su ejecución para cada caso y según la normativa que se aplique.

- A compresión:



- A tracción:



Espesor de garganta, a			
	EAE	DB SE-AE	EC3
Caso General	$a/3 \text{ mm}$ en chapas de espesor $\leq 10 \text{ mm}$	$a/4 \text{ mm}$	$a/3 \text{ mm}$
	$a/4,5 \text{ mm}$ en chapas de espesor $\leq 20 \text{ mm}$		
	$a/5,6 \text{ mm}$ en chapas de espesor $> 20 \text{ mm}$		
Para piezas de sección tubular	$a/0,7 \times t_{\text{mín}}$		

Terminación			
	EAE	DB SE-AE	EC3
Caso General	Los cordones deben prolongarse en una longitud al menos igual a $3a$	Los cordones deben prolongarse con el mismo espesor de garganta y longitud $2a$	Los cordones deben prolongarse con una longitud igual a $\sqrt{2a}$

Cordones discontinuos			
	EAE	DB SE-AE	EC3
	Se pueden utilizar en ambientes con grado de corrosión C1 ó C2, con cargas estáticas, y siempre con el espesor de garganta requerido sea inferior al recomendado	No es admitido su uso en ambientes corrosivos	No deben utilizarse soldaduras a tope discontinuas. Su uso no está permitido en ambientes corrosivos
Distancias entre extremos de cordones parciales	$L_1 \leq 200 \text{ mm}$ $L_1 \leq 12 \times t_{\min} \text{ (a compresión)}$ $L_1 \leq 16 \times t_{\min} \text{ (a tracción)}$ $L_1 \leq$ una cuarta parte de la distancia entre rigidizadores, cuando la soldadura se usa para conectarlos a una chapa o a una parte de una pieza sometida a compresión o a cortadura	$L_2 \leq 12 \times t, 12 \times t_1, 0,25b, 200 \text{ mm}$ (a compresión) $L_1 \leq 16 \times t, 16 \times t_1, 200 \text{ mm}$ (a tracción)	
Longitud de cada cordón parcial	$L_0 / 5a$ $L_0 / 40 \text{ mm}$	$L_0 / 0,75b_1, 0,75b$	
Cordones parciales en los extremos	En cordones en ángulo discontinuos siempre tienen que existir, y deben tener una longitud $\geq \frac{3}{4} t_{\min}$	Es un detalle obligatorio	En cordones en ángulo discontinuos siempre tienen que existir, y deben tener una longitud $\geq \frac{3}{4} t_{\min}$

Longitud mínima			
	EAE	DB SE-AE	EC3
Caso General	Los cordones en ángulo laterales que transmitan axil, $L_w / 15a$ y $L_w /$ ancho de la pieza a unir		

Longitud efectiva			
	EAE	DB SE-AE	EC3
	La total del cordón si se mantiene el espesor de garganta nominal		
Caso General	$L_{w,ef} / 40 \text{ mm}$ y $L_{w,ef} / 6a$		$L_{w,ef} / 30 \text{ mm}$ y $L_{w,ef} / 6a$

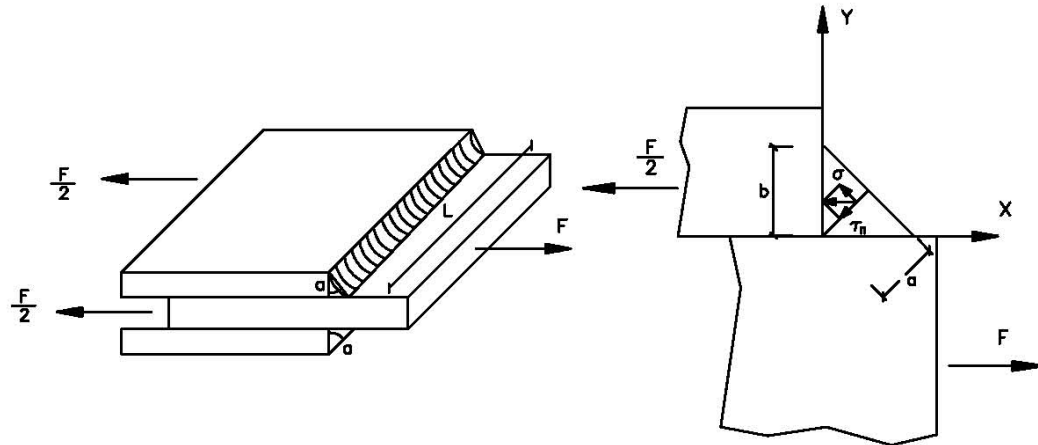
Solapes		
EAE	DB SE-AE	EC3
$Solapes / 5t_{\min}$ $Solapes / 25\text{mm}$ + cordones frontales, si existen esfuerzos axiales		
		Si

Desgarro laminar			
	EAE	DB SE-AE	EC3
Caso General	Se tratarán de evitar uniones en las que la dirección principal de las tensiones de tracción sea transversal a la dirección de laminación de las chapas que se unen		

3. Resolución de uniones típicas sometidas a tracción

3.1. Unión con sólo cordones frontales

Es el primer caso que se va a estudiar, en el que la unión se ejecuta sólo con cordones frontales, según la figura adjunta,



En este caso, si la sección de garganta se abatiese sobre el plano de uno cualquiera de los lados del cordón, entonces, por equilibrio de fuerzas, resultarían las siguientes tensiones,

$$n = \frac{F}{2 \times l \times a};$$

$$t_n = 0;$$

$$t_a = 0;$$

siendo F , la fuerza actuante sobre la unión.

Por otro lado, aplicando las expresiones que relacionan las tensiones del plano abatido (n , t_n , t_a) con las tensiones en el plano de garganta (σ , τ_n , τ_a),

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

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

$$\tau_a = t_a$$

que sustituyendo valores resulta lo siguiente,

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{F}{2 \times l \times a}$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{F}{2 \times l \times a}$$

$$\tau_a = t_a = 0;$$

Por otro lado, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo valores se tendrá finalmente que,

$$\sigma_c^* = 1.18 \times \frac{F}{2 \times l \times a} \leq \sigma_u$$

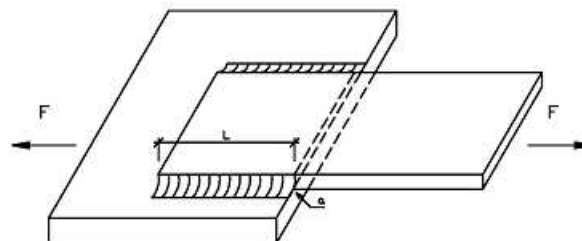
o bien,

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

que sería la expresión a utilizar para comprobar la resistencia de este tipo de uniones soldadas.

3.2. Unión con sólo cordones laterales

En este segundo caso que se va a estudiar, resulta ser una configuración en la que la unión se ejecuta sólo con cordones laterales, según la figura adjunta,



Para establecer el equilibrio de fuerzas, de nuevo se abate la sección de garganta 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.

Para este caso, por equilibrio de fuerzas, resultarían las siguientes tensiones en el plano abatido,

$$n=0;$$

$$t_n=0;$$

$$t_a=\tau_a=\frac{F}{2 \times l \times a};$$

Las tensiones en el plano de garganta (σ, τ_n, τ_a), van a resultar como siguen,

$$\sigma=0;$$

$$\tau_n=0;$$

$$\tau_a=\frac{F}{2 \times l \times a};$$

Por otro lado, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo valores se tiene que,

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

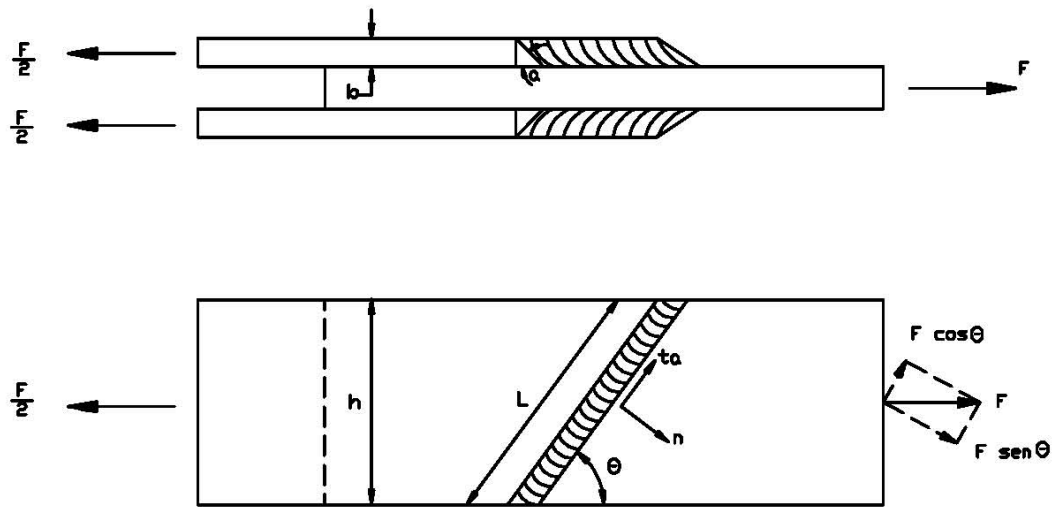
o bien,

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

que sería la expresión a utilizar para comprobar la resistencia para esta configuración de unión.

3.3. Unión con sólo cordones oblicuos

El caso que a continuación es como el que se muestra en la figura siguiente,



Para este caso se realizará el abatimiento de la sección de la garganta sobre el lado del cordón normal a la superficie de contacto entre las dos piezas. Para este caso, por equilibrio de fuerzas, resultarían las siguientes tensiones en el plano abatido,

$$n = \frac{F \times \text{sen} \theta}{2 \times l \times a} = \frac{F \times \text{sen}^2 \theta}{2 \times h \times a}$$

$$t_n = 0;$$

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

siendo F , la fuerza actuante sobre la unión.

Por otro lado, aplicando las expresiones que relacionan las tensiones del plano abatido (n , t_n , t_a) con las tensiones en el plano de garganta (σ , τ_n , τ_a), estas últimas van a resultar como siguen,

$$\sigma = n \times \text{cos} 45^\circ$$

$$\tau_n = n \times \text{sen} 45^\circ$$

$$\tau_a = t_a$$

Por otro lado, como ya se sabe, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo valores anteriores se y operando se va a obtener finalmente que,

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

es decir, que la expresión que proporciona la resistencia del cordón es la siguiente,

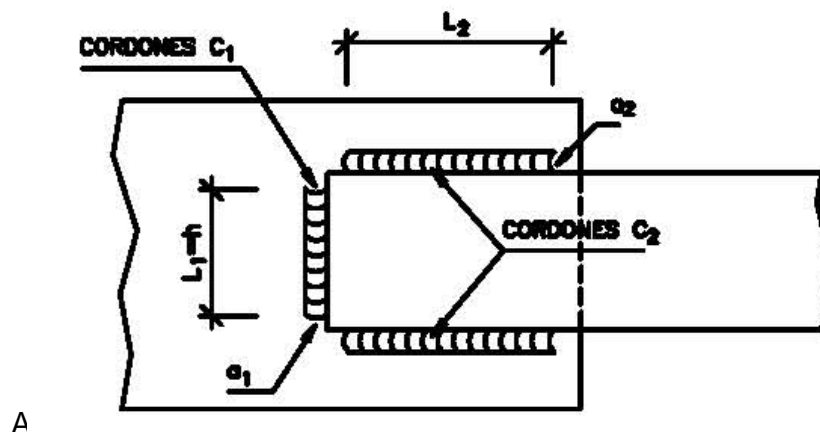
$$F \leq \beta \times 2 \times l \times a \times \sigma_u$$

donde, β , es un coeficiente que toma los valores definidos en la siguiente tabla en función del ángulo, θ , o de inclinación del cordón,

Valores de β	
θ	β
0	0.75
30	0.77
60	0.81
90	0.85

3.4. Unión con cordones frontales y laterales combinados

En este caso, la resistencia final de la unión no es igual a la suma de las resistencias de cada cordón, y experimentalmente se han obtenido que la contribución de cada cordón a la resistencia final de la unión va a depender de la relación geométrica de entre todos los cordones.

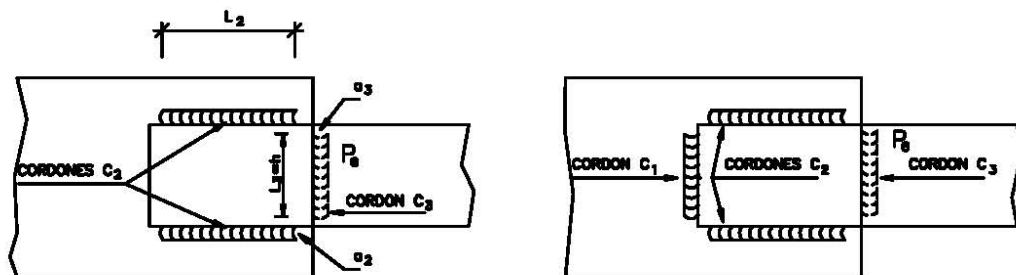


ites casos:

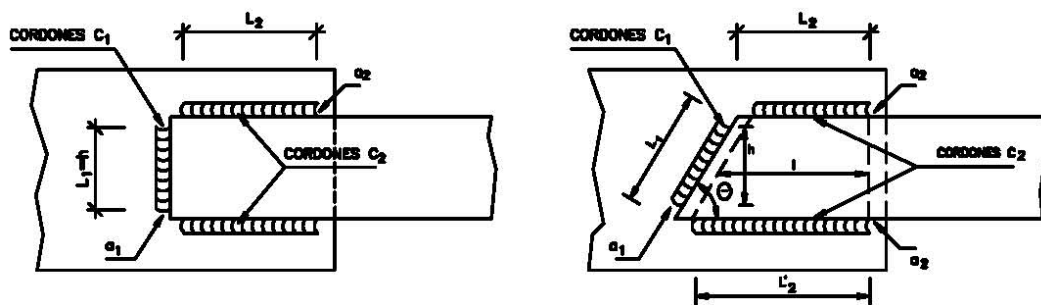
Caso I) Si la longitud de los cordones laterales es mucho mayor que la longitud de los cordones frontales ($L_2 > 1.5 \times h$, siendo L_2 la longitud de los cordones laterales, y h el espesor de la chapa unida).

En esta situación los cordones frontales no absorben carga, y la unión se calcula sólo trabajando los cordones laterales. Este caso se calcula como se expuso en el apartado 3.2

Como consejo de buena práctica en la ejecución de este tipo de uniones se recomienda no ejecutar las uniones como se muestran en las siguientes figuras, dado que el cordón con denominación C3 llegará a la rotura mucho antes que los cordones laterales C2 hayan podido desarrollar toda su resistencia.



Caso II) Situación en la que los cordones frontales y laterales cumplen que son aproximadamente igual en longitud ($0.5 \times h < l_2 \leq 1.5 \times h$) y no existe el cordón frontal C3 como se muestra en las figuras siguientes,



Para este caso la carga máxima admisible de la unión viene dada por la expresión siguiente:

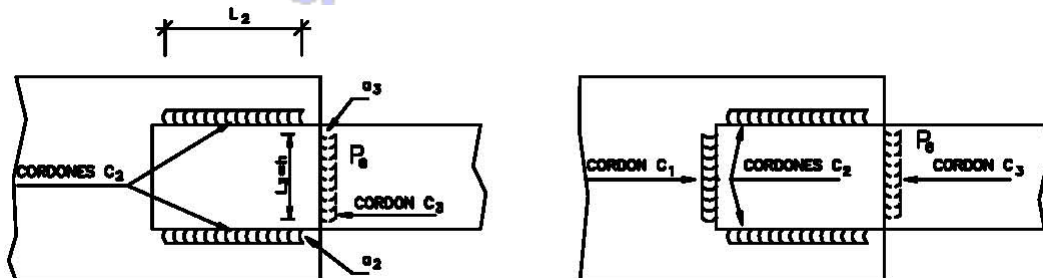
$$F_{\text{máx}} = 0.75 \times (\sum l_2 \times a_2 \times \sigma_u) + k \times \beta \times l_1 \times a_1 \times \sigma_u$$

$$\text{Siendo } k = \frac{1}{1 + 2 \sin^2 \theta}$$

Los valores que toma β están dados en la tabla del apartado anterior 3.3, mientras que en la siguiente tabla se adjunta los valores de K.

Valores de K	
θ°	$k = \frac{1}{1 + 2 \operatorname{sen}^2 \theta}$
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

Caso III) Situación en la que los cordones frontales y laterales cumplen que son aproximadamente igual en longitud ($0.5 \times h < l_2 \leq 1.5 \times l_1$) y existe el cordón frontal C3 como se muestra en las figuras siguientes,



Para esta situación la máxima carga admisible de la unión es,

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

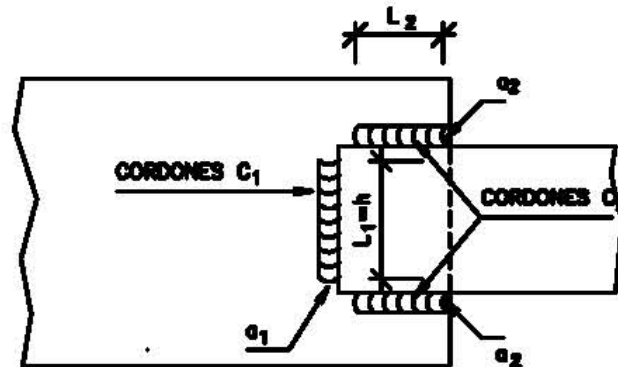
siendo,

$$F_2 = 0.75 \times (\sum l_2 \times a_2 \times \sigma_u)$$

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

Los valores que toma β están dados en la tabla anterior (apartado 3.3).

Caso IV) Situación en la que los cordones laterales es mucho menor que la de los cordones frontales ($l_2 \leq 0.5 \times l_1$).



En este caso, la máxima carga admisible de la unión viene dada por la siguiente expresión,

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

siendo,

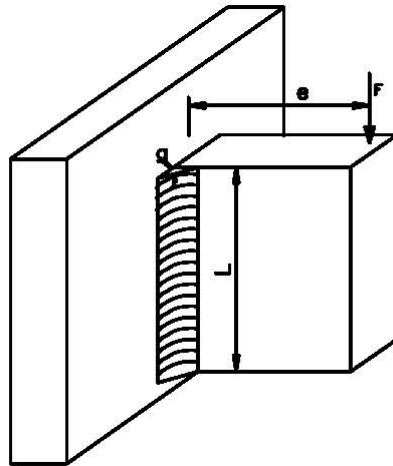
$$F_2 = 0.75 \times (\sum l_2 \times a_2 \times \sigma_u)$$

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

4. Resolución de uniones típicas sometidas a flexión

4.1. Unión con sólo cordones frontales longitudinales

La siguiente figura muestra una configuración típica donde las uniones están sometidas a flexión,



Para este caso se realizará el abatimiento de la sección de la garganta sobre el lado del lado del cordón paralelo al eje del momento flector actuante. Por equilibrio de fuerzas y momentos, resultarían las siguientes tensiones en el plano abatido,

$$n = \frac{M}{W} = \frac{F}{2} \times e \times \frac{6}{a \times L^2}$$

$$t_n = 0;$$

$$t_a = \frac{F}{2 \times l \times a}$$

Las tensiones en el plano de garganta (σ, τ_n, τ_a), van a resultar como siguen,

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

$$\tau_n = n \times \text{sen} 45^\circ$$

$$\tau_a = t_a = \frac{F}{2 \times l \times a}$$

Por otro lado, como ya se sabe, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

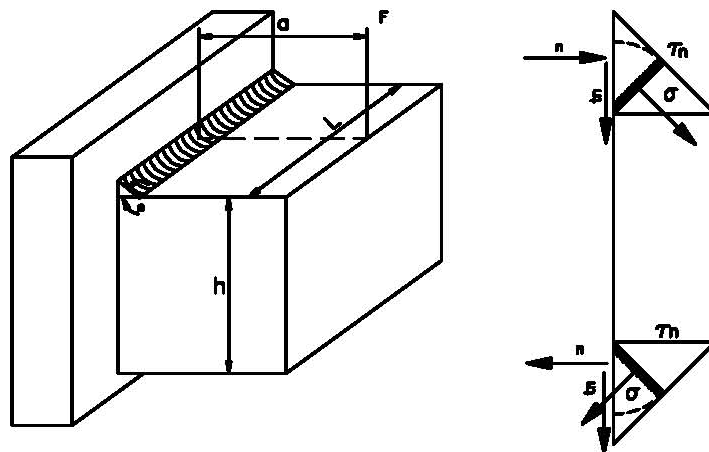
que sustituyendo los valores anteriores se obtendrá el valor de la sollicitación máxima admisible.

Por otro lado, si se tiene que $e \gg L$, es decir, si el momento flector es grande comparado con el esfuerzo cortante, puede utilizarse la fórmula simplificada siguiente, para el cálculo de la resistencia del cordón:

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

4.2. Unión con sólo cordones frontales transversales

La siguiente figura muestra una configuración típica donde las uniones están sometidas a flexión según esta nueva geometría,



Para este caso se realizará el abatimiento de la sección de la garganta sobre el plano de unión de las piezas. Por equilibrio de fuerzas y momentos, resultarían las siguientes tensiones en el plano abatido,

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

Por otro lado, para la mayor parte de los casos prácticos, h será grande con respecto de a , y se puede simplificar lo siguiente,

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

Por lo tanto, resultan las siguientes tensiones en el plano abatido,

$$n = \frac{F \times e}{a \times L \times h}$$

$$t_n = \frac{F}{2 \times a \times L}$$

$$t_a = 0;$$

Y las tensiones en el plano de garganta (σ, τ_n, τ_a), van a resultar como siguen,

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

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

$$\tau_a = t_a = 0;$$

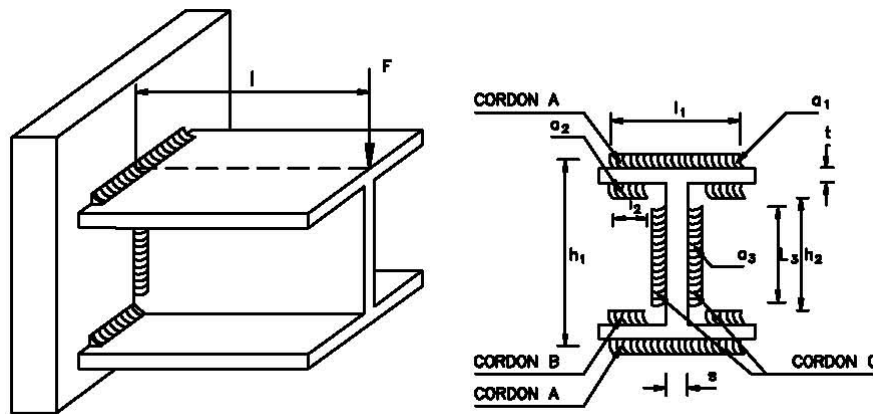
Por otro lado, como ya se sabe, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo los valores anteriores se obtendrá el valor de la sollicitación máxima admisible.

4.3. Unión con sólo cordones frontales longitudinales y transversales

La siguiente figura muestra una configuración típica de este tipo, donde la unión sólo trabaja con cordones frontales,



Para esta configuración se considera que el esfuerzo cortante actúa únicamente sobre los cordones que unen el alma y que además puede considerarse que se distribuye uniformemente a lo largo de la sección de garganta:

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

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, las tensiones valdrán:

$$n = \frac{M}{W}$$

$$\sigma = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \times n$$

Por otro lado, como ya se sabe, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo los valores anteriores se obtendrá el valor de la sollicitación máxima admisible.

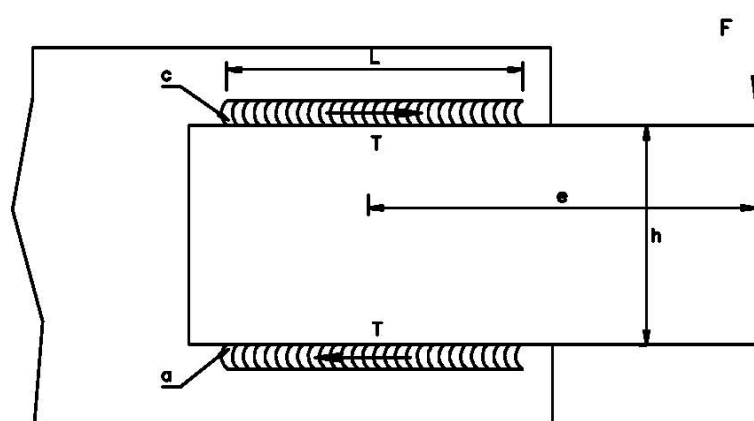
$$\sigma_c^* = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \times (\tau_n^2 + \tau_a^2)} = \sqrt{\frac{2.8 \times n^2}{2}} = 1.18 \times n = 1.18 \times \frac{M}{W} \leq \sigma_u$$

$$\text{siendo } W = a_1 \times L_1 \times h_1 = 2 \times a_2 \times L_2 \times h_2$$

5. Solicitaciones de torsión y esfuerzo cortante combinados

5.1. Unión con sólo cordones laterales

La siguiente figura muestra una configuración típica donde las uniones están sometidas a torsión y cortante combinados,



El momento torsor $M_T = Fxe$ se puede descomponer en un par de fuerzas T que actúan sobre los cordones, según la siguiente expresión:

$$M_T = Fxe = T \times (h + 2 \times \frac{a}{2}) = T \times (h + a)$$

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

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

$$t_n = \frac{F}{2 \times a \times L}$$

$$\sigma = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \times t_n$$

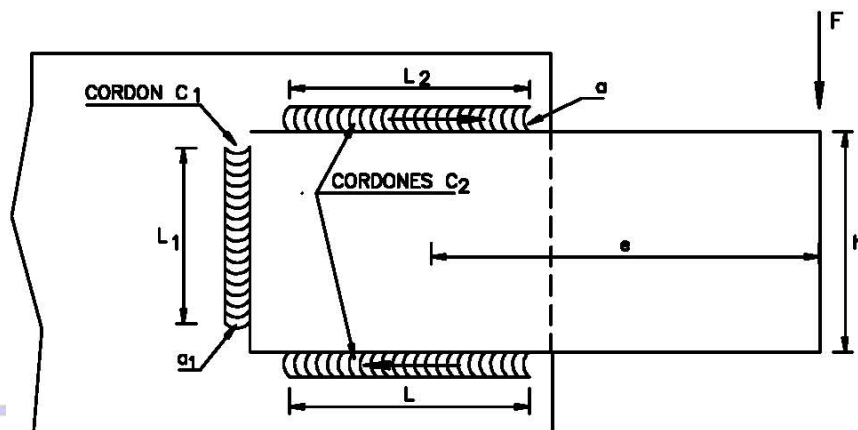
Por otro lado, como ya se sabe, la tensión de comparación, σ_c^* , viene dada por la expresión,

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

que sustituyendo los valores anteriores se obtendrá el valor de la sollicitación máxima admisible.

5.2. Unión con dos cordones laterales y uno frontal

La siguiente figura muestra una configuración típica para este tipo de estudio,



El momento torsor que agotaría el cordón a_2 sería:

$$M_T = 0.75 \times \sigma_u \times l_2 \times a_2 \times (h + a_2)$$

Por otro lado, 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, según las expresiones siguientes:

$$M_T = Fxe$$

$$M_1 + M_2 = M_T$$

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

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

Por otro lado, 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 4.1 *Unión con sólo cordones frontales longitudinales*, pero con un único cordón.

La soldadura 2 se calcula como se describe en el apartado 5.1 *Unión con sólo cordones laterales*.