



UNIONES

1. Introducción:

Las estructuras de acero están compuestas por piezas simples en la cual necesitan vincularse unas con otras a través de un mecanismo para que funcionen en conjunto. Estos mecanismos son las llamadas uniones y son un factor fundamental a tener en cuenta a la hora del dimensionamiento, ya que la gran mayoría de las estructuras fallan en estos lugares singulares.

A la hora de proyectar y dimensionar una estructura debemos tener en cuenta también como será su armado, traslado y montaje de la misma al lugar de emplazamiento, para poder elegir el medio de unión más conveniente.

Cuando se dimensionan estas uniones se debe tener en claro cómo se trasladan las fuerzas de un punto a otro, los momentos que se genera por excentricidad y como afectan a las tensiones de las mismas.

A continuación se describirán los tipos de uniones más comunes y algunos ejemplos prácticos bajo la reglamentación CIRSOC 301

2. Tipos de uniones

Las uniones más comunes se dividen como a continuación se detallan:

- Uniones con bulones:
 - Uniones tipo aplastamiento
 - Uniones con deslizamiento crítico (por fricción)
- Uniones soldadas

Las uniones abulonadas generalmente son realizadas en obras, son de fácil ejecución y control, por lo que no se necesita personal muy calificado.

Las uniones soldadas son comúnmente realizadas en taller, se necesita mano de obra calificada y un control riguroso de la calidad de las mismas.

El cálculo de ambos tipos de uniones se realiza con el Reglamento CIRSOC 301/05

3. Uniones Abulonadas

3.1. Tipo de bulones

Existen varios tipos de bulones que pueden usarse para conectar miembros de acero. Los bulones tienen cabeza, vástago roscado, tuerca y arandela. Las cabezas son Hexagonales al igual que las tuercas y las roscas están normalizadas. Éstos se describen en los siguientes párrafos.

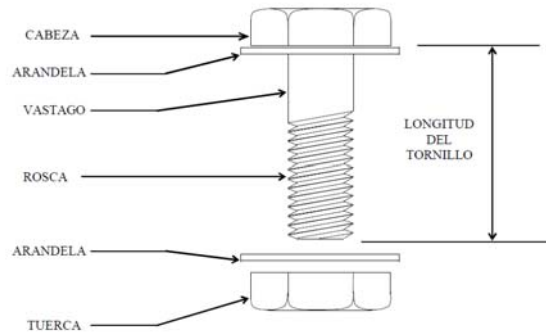


Figura 1: Partes de un bulón

Los pernos sin tornearse también se denominan bulones ordinarios o comunes. La norma ASTM designa a estos bulones como bulones **A307** y se fabrican con aceros al carbono con características de esfuerzos y deformaciones muy parecidas a las del acero A36 o F-34 según la IRAM-IAS. La norma IRAM correspondiente es IRAM 5452. Están disponibles en diámetros que van de 1/2 a 1 1/2 plg en incrementos de 1/8 plg. Se usan principalmente en estructuras ligeras sujetas a cargas estáticas y en miembros secundarios.

Las características resistentes son:

Tensión de Rotura a Tracción: $F_u = 370 \text{ Mpa}$

Tensión de Fluencia: $F_y = 235 \text{ Mpa}$

Los bulones de alta resistencia se hacen a base de acero al carbono mediano tratado térmicamente y aceros aleados y tienen resistencias a la tensión de dos o más veces las de los bulones ordinarios. Existen dos tipos básicos: los bulones A325 (hechos con acero al carbono mediano tratado térmicamente) y los bulones A490 de mayor resistencia (también tratados térmicamente, pero hechos con acero aleado). Los bulones de alta resistencia se usan para todo tipo de estructuras, desde edificios pequeños hasta rascacielos y puentes. Los bulones de alta resistencia se pueden apretar hasta alcanzar esfuerzos muy altos de tensión, de manera que las partes conectadas quedan fuertemente afianzadas entre la tuerca del bulón y su cabeza, lo que permite que las cargas se transfieran principalmente por fricción.

Las características resistentes de los bulones **A325** (IRAM 5453) son:

$F_u \geq 825 \text{ Mpa}$ (diámetros $\leq 1"$); $F_u = 725 \text{ Mpa}$ (diámetros $> 1"$)

$F_y \geq 650 \text{ Mpa}$ (diámetros $\leq 1"$); $F_y = 570 \text{ Mpa}$ (diámetros $> 1"$)

Los diámetros comerciales (en pulgadas) van desde 1/4" hasta 1" o 1 1/2"

Para ser pretensados los diámetros deben ser mayores a 7/16"

También se encuentran con medidas métricas, los cuales se denominan los bulones **A325M ó ISO 8.8** (IRAM 5464) son:

$F_u \geq 800 \text{ Mpa}$ (diámetros $\leq 12 \text{ mm}$); $F_u = 830 \text{ Mpa}$ (diámetros $> 12 \text{ mm}$)

$F_y \geq 0,8 \cdot F_u = 650 \text{ Mpa}$ (diámetros $\leq 12 \text{ mm}$); $F_y = 660 \text{ Mpa}$ (diámetros $> 12 \text{ mm}$)



Los diámetros comerciales (en milímetros) van desde 6 mm hasta 24 mm

Para ser pretensados los diámetros deben ser mayores a 12 mm

Estos dos últimos tipo de bulones son los más comunes utilizados actualmente. Existen también en el mercado con características similares bulones bajo otras normas:

Según SAE: Grado 5 $F_u \geq 840 \text{ Mpa}$

Según DIN: 8G $F_u \geq 800 \text{ Mpa}$

Las características resistentes de los bulones **A490** (IRAM 5455) (Acero aleado) son:

$$F_u \geq 1035 \text{ Mpa}$$

$$F_y \geq 800 \text{ a } 900 \text{ Mpa segun el diametro}$$

Los diámetros comerciales (en pulgadas) van desde 1/2" hasta 1 1/2"

También se encuentran con medidas métricas, los cuales se denominan los bulones **A490M ó ISO 10.9** (IRAM 5464) son:

$$F_u \geq 1040 \text{ Mpa}$$

$$F_y \geq 0,9 \cdot F_u = 900 \text{ Mpa}$$

Existen también en el mercado con características similares bulones bajo otras normas:

Según SAE: Grado 8 $F_u \geq 1050 \text{ Mpa}$

Según DIN: 10K $F_u \geq 1000 \text{ Mpa}$

En el cuadro que se muestra a continuación se muestran las equivalencias entre distintas normas internacionales para identificar el grado de dureza de los pernos.

SAE: Society of Automotive Engineers
DIN: Deutsches Institut für Normung
ISO: International Organization for Standardization
ASTM: American Society for Testing and Materials



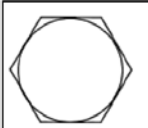



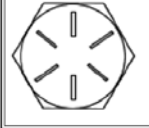


SAE	DIN / ISO	ASTM
 SAE GRADO 2 Acero de Bajo Carbono	 DIN Clase 5.8 Acero de Bajo Carbono	 A 394 Tipo 0
 SAE GRADO 5 Acero de Medio Carbono Tratado Térmicamente	 DIN Clase 8.8 Acero de Medio Carbono Tratado Térmicamente	 A 325 Tipo 1 Acero de Medio Carbono Tratado Térmicamente
 SAE GRADO 8 Acero de Medio Carbono Aleado Tratado Térmicamente	 DIN Clase 10.8 Acero de Medio Carbono Aleado Tratado Térmicamente	 A 495 Tipo 1 Acero de Medio Carbono Aleado Tratado Térmicamente

Figura 2: Equivalencias entre distintas normas internacionales

3.2. Tipo de uniones abulonadas

Con base en las condiciones de la superficie de contacto de una unión, se consideran dos amplias categorías de uniones abulonadas en el reglamento CIRSOC 301/05, las cuales son:

Uniones tipo aplastamiento.

Uniones de deslizamiento crítico. (Tipo fricción)

En las uniones tipo aplastamiento el deslizamiento es aceptable, por lo que existe un esfuerzo de corte en el bulón y un aplastamiento en las chapas de la unión. Se pueden utilizar bulones comunes calibrados o de alta resistencia

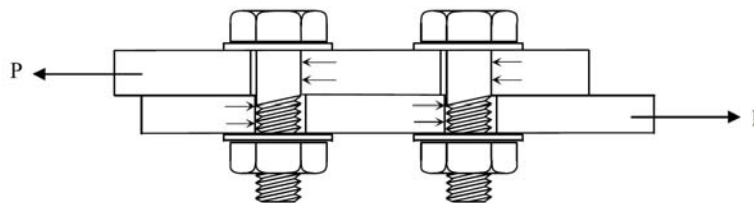


Figura 3: Uniones tipo aplastamiento

Las uniones de deslizamiento crítico son aquellas para las que se han especificado condiciones de la superficie de contacto que, en la presencia del agarre provisto por bulones pretensados, resisten una carga de diseño en el plano de la unión solamente por fricción, sin deslizamiento en las superficies de contacto. Por lo tanto, las uniones al deslizamiento o crítico tienen una baja probabilidad de deslizamiento en cualquier momento durante la vida de la estructura. Se las realiza únicamente con bulones de alta resistencia

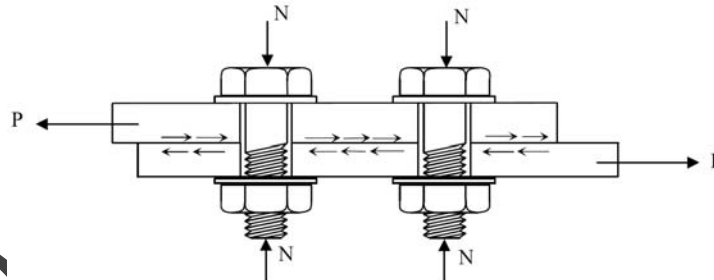


Figura 4: Uniones de deslizamiento crítico

A su vez el CIRSOC 301/05 en la sección J.3.1.(a) contempla tres tipos de uniones con bulones de alta resistencia cuyo uso y ejecución deberán satisfacer los requisitos de la Recomendación CIRSOC 305 - 2007 "Recomendación para Uniones Estructurales con Bulones de Alta Resistencia"

1. Unión con ajuste sin juego: son uniones tipo aplastamiento con bulones apretados con ajuste sin juego.
2. Unión pretensada: son uniones tipo aplastamiento con bulones totalmente pretensados de acuerdo con la Tabla J.3.1.



3. Unión de deslizamiento crítico: son uniones tipo deslizamiento crítico con bulones totalmente pretensados de acuerdo con la Tabla J.3.1 y tratamiento de las superficies de contacto.

Tabla J.3.1. Tracción mínima de los bulones (*), en kN

Bulones milimétricos. Rosca gruesa			Bulones – Rosca UNC			
Diámetro nominal del bulón (mm)	Bulones ISO 8.8 A325M (kN)	Bulones ISO 10.9 A490M (kN)	Diámetro nominal del bulón		Bulones A325 (kN)	Bulones A490 (kN)
			Pulg.	mm.		
12	48	61	7/16	11,11	40	-
14	67	84	1/2	12,70	53	66
16	91	114	9/16	14,28	68	85
18	111	140	5/8	15,87	84	105
20	142	178	3/4	19,05	125	156
22	176	220	7/8	22,22	172	215
24	205	257	1	25,40	226	283
27	267	334	1 1/8	28,57	249	356
30	326	408	1 1/4	31,75	317	453
33	403	504	1 3/8	34,92	377	539
36	475	594	1 1/2	38,10	459	656

(*) Igual a 0,70 de la resistencia mínima a la tracción del bulón, redondeado a la unidad más cercana.

Figura 5: Tabla J.3.1. Extraída del CIRSOC 301/05

Las uniones (1) y (2) tipo aplastamiento se deberán proyectar para trabajar por corte del bulón y aplastamiento de la chapa.

La unión (3) tipo deslizamiento crítico se proyecta para transmitir las fuerzas de corte por rozamiento entre las chapas sin permitir el deslizamiento.

- Se utilizarán uniones pretensadas en los siguientes casos:
 - (a) Uniones sometidas a efectos de fatiga sin inversión del sentido de las cargas
 - (b) Uniones sometidas a vibraciones o efectos dinámicos
 - (c) Uniones tipo aplastamiento con bulones A490 (ISO 10.9; A490M) sometidas a fuerzas de tracción o combinación de tracción y corte
 - (d) Toda unión donde las especificaciones de este Reglamento exijan el pretensado de los bulones.
- Se utilizarán uniones de deslizamiento crítico en los siguientes casos:
 - (a) Uniones en las que el deslizamiento de las superficies de contacto pueda afectar alguna condición de servicio o reducir la resistencia o la estabilidad de la estructura o del elemento estructural (por ejemplo uniones extremas de barras armadas)
 - (b) Uniones sometidas a efectos de fatiga con inversión del sentido de las cargas
 - (c) Uniones con agujeros holgados
 - (d) Uniones con agujeros ovalados cuando su mayor dimensión no es perpendicular a la dirección de la fuerza
 - (e) Cualquier otra unión establecida en los planos de proyecto o donde las especificaciones de esta Reglamento lo exijan.



3.3. Tipo, uso y tamaño de agujeros

Los agujeros normales para los tornillos son circulares y se hacen con un diámetro ligeramente mayor que el tamaño nominal del cuerpo del bulón. Esto da un cierto juego en el agujero, que compensa las pequeñas faltas de alineación de la ubicación del agujero o del ensamble y que ayuda a instalar los bulones en el taller o en el campo. Los agujeros normales también proporcionan cierta flexibilidad para el ajuste del plomeo al montar un marco.

Un agujero holgado proporciona la misma holgura adicional en todas las direcciones, si se compara con un agujero normal, para cumplir con las tolerancias durante el montaje. Este tipo de agujero se podrá utilizar en cualquiera o en todas las chapas de uniones de deslizamiento crítico, pero no podrán ser utilizadas en uniones tipo aplastamiento. Se deberán instalar arandelas endurecidas sobre los agujeros holgados de una chapa externa.

Sin embargo, si se requiere un ajuste sólo en una dirección en particular, se pueden utilizar, agujeros de ovalados cortos o agujeros ovalados largos.

Los agujeros ovalados cortos se podrán utilizar en cualquiera o en todas las chapas de uniones de deslizamiento crítico o del tipo aplastamiento. Los agujeros ovalados cortos se podrán utilizar independientemente de la dirección de la carga en uniones del tipo deslizamiento crítico, pero su longitud mayor deberá ser normal a la dirección de la fuerza en el caso de uniones tipo aplastamiento. Se deberán instalar arandelas sobre los agujeros ovalados cortos en una chapa externa; cuando se usen bulones de alta resistencia, estas arandelas deberán ser endurecidas.

Los agujeros para bulones se punzonan, subpunzonan y escarean, o se taladran. La práctica común es utilizar agujeros punzonados para obras en edificios y puentes comunes para carreteras. Los agujeros se pueden punzonar si el espesor del material es menor o igual al diámetro nominal del bulón más 1/8 de pulg. El punzonamiento hace que la pieza metálica se estire y la extensión del estiramiento depende del espesor del metal y del número de agujeros. El punzonado daña parte del material alrededor del agujero.

El tamaño máximo de los agujeros para remaches y bulones esta dado en la Tabla J.3.3.

Tabla J.3-3
Dimensión Nominal de los Agujeros





Diámetro de los Bulones. (mm)	Dimensiones de los Agujeros (mm)			
	Normales (Diámetro)	Holgados (Diámetro)	Ovalados Cortos (Ancho x Largo)	Ovalados Largos (Ancho x Largo)
				
6	8	9	-	-
7	9	10	-	-
8	10	11	-	-
10	12	13	-	-
12	14	16	14 x 18	14 x 30
14	16	18	16 x 20	16 x 35
16	18	20	18 x 22	18 x 40
20	22	24	22 x 26	22 x 50
22	24	28	24 x 30	24 x 55
24	27	30	27 x 32	27 x 60
27	30	35	30 x 37	30 x 67
>28	d+3	d+8	(d+3) x (d+10)	(d+3)x(2,5 xd)
Diámetro en pulgadas	Dimensiones de los agujeros en pulgadas			
1/4	5/16	3/8	-	-
5/16	3/8	7/16	-	-
3/8	7/16	1/2	-	-
7/16	1/2	9/16	-	-
1/2	9/16	5/8	9/16 x 1 1/16	9/16 x 1 1/4
5/8	1 1/16	13/16	1 1/16 x 7/8	1 1/16 x 1 9/16
3/4	13/16	15/16	13/16 x 1	13/16 x 1 7/8
7/8	15/16	1 1/16	15/16 x 1 1/8	15/16 x 2 3/16
1	1 1/16	1 1/4	1 1/16 x 1 5/16	1 1/16 x 2 1/2
≥ 1 1/8	d+1/16	d+5/16	(d+1/16)x(d+3/8)	(d+1/16)x(2,5xd)

Figura 6: Tabla J.3.3. Extraída del CIRSOC 301/05

3.4. Modos de fallas en uniones abulonadas

Existen dos amplias categorías de fallas en las conexiones abulonadas: la falla de las partes unidas y la falla del bulón. Algunos de los posibles estados límite o modos de falla que pueden controlar la resistencia de una conexión abulonada son:

- Fractura por tracción de los elementos placas unidas.
- Fluencia por tensión de los elementos placa unidos.
- Falla por corte del bulón
- Falla por aplastamiento de los elementos placa unidos.
- Ovalamiento del agujero del bulón.
- Desgarramiento por cortante de los elementos placa unidos.
- Falla por aplastamiento del tomillo.
- Alisamiento de la rosca del bulón o de la tuerca.
- Falla, por tracción del bulón.
- Falla por flexión del bulón.
- Deslizamiento de los elementos placa unidos.

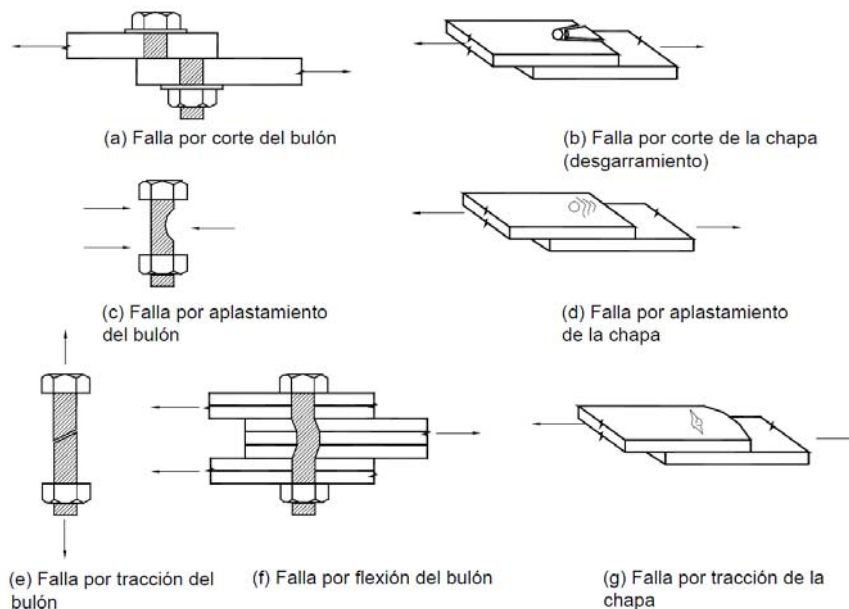


Figura 7: Modo de fallas en las uniones abulonadas

En la figura 7 se ilustran algunos tipos elementales de falla mediante la consideración de una unión traslapada con un solo bulón.

En la conexión traslapada, la falla por corte del bulón necesita que el mismo sea cortado de una vez, en la sección en la que las caras de las dos placas están en contacto una con la otra, como se muestra en la figura 7.a.

En la conexión traslapada, se dice que el bulón está en cortante simple. En una unión a tope, la falla por cortante de los tomillos implica tirar la placa principal fuera de las cubre-placas; esto no puede ocurrir sin el cortante de los bulones en las dos secciones en las que las caras de las cubre

placas se encuentran en contacto con la placa principal. En las uniones a tope, se dice que el bulón está en cortante doble como se muestra en la figura 7.f.

La falla por aplastamiento de los elementos placa unidos, en los agujeros de los bulones se debe con frecuencia al apilamiento del material de la placa detrás del bulón, como se muestra en la figura 7.d y debido al ovalamiento (arrugamiento) del agujero del bulón resultante y el consecuente movimiento relativo entre las placas. En el caso de un tornillo de extremo con una pequeña holgura, existe una tendencia en el bloque de metal, comprendido entre el agujero y el borde de la placa, a desgarrarse a lo largo de las dos líneas horizontales tangenciales a los lados del agujero del tornillo (Figura 7.b).

A este estado límite se le conoce como desgarramiento por cortante de la placa. Es probable que éste ocurra si el agujero se localiza muy cerca del borde del miembro. Esta falla puede evitarse si se alarga lo suficiente la distancia al borde

3.5. Separación mínima

La máxima resistencia última nominal al aplastamiento, R_n , de un agujero para bulón o remache requiere que la distancia entre el centro del primer pasador y el borde de la chapa en la dirección de la fuerza, no sea menor que $1,5 \cdot d$, donde d es el diámetro del bulón o remache.

Por una razón similar, la distancia medida en la línea de la fuerza, desde el centro de cualquier bulón o remache al borde más próximo de un agujero adyacente, no será menor que $3 \cdot d$, para asegurar la máxima resistencia de diseño al aplastamiento. El análisis de los resultados de numerosos ensayos indica que la resistencia crítica por aplastamiento es directamente proporcional a la distancia definida anteriormente, hasta un valor de $3 \cdot d$, por encima del cual no se logra ningún aumento en la resistencia. Los espacios libres requeridos para que entren las llaves para apretar las tuercas son los que determinan el espaciamiento mínimo que debe mantenerse entre los tornillos y otras partes que se proyectan fuera de la placa a atornillar

La distancia mínima s entre los centros de los agujeros normales u holgados será 3 veces el diámetro nominal del bulón. Para agujeros ovalados, la distancia mínima s entre centros de circunferencias extremas adyacentes será 3 veces el diámetro nominal del bulón

$$s_{\min} \geq 3 \cdot d$$

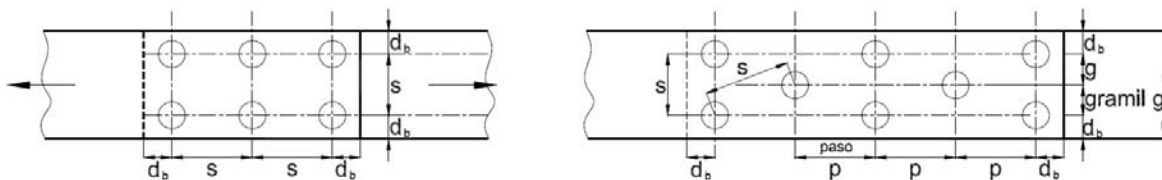


Figura J.3.1. Separación entre centros de agujeros.

Figura 8: Separación mínima entre bulones y distancia mínima al borde. Extraída del CIRSOC 301/05

3.6. Distancia mínima al borde



La tensión crítica al aplastamiento es función de la resistencia a tracción del material, de la separación de los medios de unión y de la distancia desde el borde de la parte unida al centro del medio de unión más cercano.

La separación y/o distancia al borde puede ser incrementada para alcanzar la resistencia al aplastamiento requerida, o la fuerza de aplastamiento puede ser reducida para satisfacer una limitación en la separación y/o en la distancia al borde.

Es posible que los agujeros para bulones se punzonen tan cerca uno del otro que el metal entre ellos se dañe, de tal manera que su resistencia se vea reducida a niveles inaceptables. También puede ocurrir la falla del borde al colocar un agujero para bulon tan cerca del extremo del miembro que se forme una protuberancia local cuando se troquela el agujero.

Los bordes laminados, cortados con máquinas de flama, aserrados, o aplanados son relativamente uniformes. Los bordes cizallados o cortados en forma manual con flama son algo rugosos y, por lo tanto, se tienen que considerar tolerancias adicionales para asegurar que se obtenga la distancia mínima básica.

La distancia d_b desde el centro de un agujero normal a un borde de un elemento unido será mayor o igual que el valor aplicable indicado en la Tabla J.3.4

Tabla J.3.4. Distancia mínima al borde, (a) (mm) (Centro del agujero normal (b) al borde de la parte conectada)

Diámetro nominal del bulón o remache (mm)	A bordes cizallados, matrizados o punzonados	A bordes de chapas, perfiles o barras laminadas, o a bordes cortados a soplete (c)
ISO - A325/A490		
6 6,35 (1/4")	12	10
7	14	11
8 7,96 (5/16")	15	12
10 9,52 (3/8")	18	14
12 11,11 (7/16")	22	16
14 12,7 (1/2")	25	18
16 15,9 (5/8")	28	22
20 19,05 (3/4")	34	26
22 22,22 (7/8")	38 (d)	28
24 25,4 (1")	42 (d)	30
27	48	34
30 28,58(1 1/8")	52	38
> 30 > 28,58(>1 1/8")	1.75 x diámetro	1.25 x diámetro
(a) Se permite utilizar una distancia al borde menor siempre que se satisfagan las expresiones de la Sección J.3.10.		
(b) Para agujeros holgados u ovalados, ver la Tabla J.3.6.		
(c) Se permite reducir todas las distancias de esta columna en 3 mm cuando el agujero esté en un punto en donde la tensión no excede de 25% de la resistencia de diseño máxima del elemento.		
(d) Se permite que la distancia sea 32 mm en el extremo de los ángulos de unión de vigas y chapas extremas de corte.		

Figura 9: Tabla J.3.4. Extraída del CIRSOC 301/05

3.7. Máximas separaciones y distancia del borde

Cuando los tornillos se colocan demasiado separados, los elementos unidos podrían no estar en contacto estrecho entre los bulones, dejando un espacio para que se acumule el agua y el polvo. El resultado es que podrían oxidarse; ya que el acero corroído en su totalidad ocupa siete veces el volumen del acero sin corrosión, se podrían desarrollar altos esfuerzos locales y/o las placas podrían pandearse.

La distancia máxima desde el centro de cualquier remache o bulón al borde más próximo de las partes en contacto, será igual que 12 veces el espesor de la parte unida en consideración, pero no excederá de 150 mm. La separación longitudinal entre los bulones o remaches que vinculan elementos en contacto continuo como dos chapas, o una chapa y un perfil se establecerá de la siguiente forma:

- a) Para barras pintadas o no pintadas sin peligro de corrosión, la separación no deberá superar 24 veces el espesor de la chapa más fina ni 300 mm.

$$s_{\max} \leq 24 \cdot t$$

$$s_{\max} \leq 300 \text{ mm}$$

- b) Para barras no pintadas de acero resistente a la corrosión sometidas a la corrosión atmosférica, la separación no deberá superar 14 veces el espesor de la chapa más fina ni 180 mm

$$s_{\max} \leq 14 \cdot t$$

$$s_{\max} \leq 180 \text{ mm}$$

3.8. Repartición de la fuerza entre bulones. Largo del bulón

Se supone en general que la fuerza actuante en la unión tipo aplastamiento, normal a los ejes de los bulones, se reparte por igual entre todos los bulones

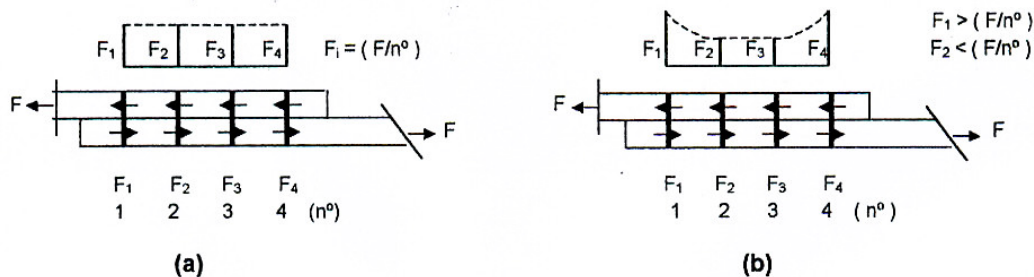


Figura 10: Repartición de esfuerzos sobre bulones

Para que esta hipótesis de distribución sea cierta las chapas deben ser perfectamente rígidas y los bulones perfectamente elásticos, lo que no es real. Por ello al compatibilizarse las deformaciones de los bulones y de las chapas unidas, resultan más cargados los bulones extremos que los centrales (Figura 10). Sin embargo, al alcanzar los bulones extremos la fluencia se deforman sin tomar más carga y se produce una redistribución plástica de modo que, finalmente, la fuerza se reparte aproximadamente por igual entre todas las filas. Pero si la distancia entre filas extremas es muy grande o existen muchas filas, los bulones extremos fallan antes de que produzca la redistribución total. El comportamiento de las uniones abulonadas largas ha quedado demostrado en ensayos.

El CIRSOC 301 considera el problema disminuyendo para todos los tipos de bulones las resistencias nominales al corte F_v y F'_v dadas más adelante en un 20% cuando la distancia entre



ejes de bulones extremos supera los 1300 mm. (Observación (e) de la Tabla J.3-2). **La práctica recomienda además no superar las 6 filas de bulones en una unión.**

La longitud del bulón debe elegirse en función del espesor del paquete a unir. Dado que para los bulones A325 y A490 (y los tipo ISO aproximadamente equivalentes) la resistencia al corte disminuye cuando la rosca está incluida en el plano de corte es conveniente elegir una longitud del vástago que asegure que la rosca no penetre o que dicha penetración no supere los 2 mm o el 30 % del espesor de la chapa. El espesor de la arandela sirve para asegurar que la tuerca pueda ser correctamente ajustada en la zona roscada.

En los bulones A307 un espesor grande del paquete a unir puede producir la falla prematura por flexión del bulón. Por ello se especifica que cuando el espesor del paquete a unir supera 5 diámetros la resistencia de diseño al corte será disminuida en un 1% por cada 2mm de espesor adicional a 5 diámetros.

En los bulones A325 y A490 (o tipo ISO equivalentes) este efecto no se produce por su mayor resistencia. Ensayos (Bendigo y otros; 1963) han mostrado que uniones de 8 o 9 diámetros de espesor se han comportado en forma similar en su resistencia al corte, que uniones con menores espesores.

Es conveniente colocar un mínimo de dos bulones por unión para evitar que eventuales defectos de un único bulón consuman los márgenes de seguridad y se produzca la falla de aquélla.

3.9. Calculo de uniones tipo aplastamiento

A continuación se exponen los procedimientos para el cálculo y verificación de uniones tipo aplastamiento. El CIRSOC 301/05. Se deberá verificar para el estado último correspondiente que

- a) La resistencia de diseño (R_d) de cada elemento estructural, de sus uniones, o de la estructura en su conjunto, debe ser igual o mayor que la resistencia requerida (R_u).
- b) La resistencia de diseño ($R_d = \phi \cdot R_n$), para cada estado límite último aplicable, es igual al producto de la resistencia nominal R_n por el factor de resistencia ϕ .
- c) La resistencia requerida (efectos de las acciones) de la estructura, de sus elementos estructurales y de sus uniones, se debe determinar de acuerdo mediante análisis estructural para la combinación de acciones mayoradas crítica según lo establecido en la Sección A.4.2.

En general las dimensiones (ancho, espesor) de los elementos a unir están determinadas a partir del proyecto de las barras que se unen. Para el proyecto de estas uniones se puede seguir el siguiente camino:

- 1) Definición del tipo de unión (tipo aplastamiento, tipo deslizamiento crítico) y de la clase de dimensionado a realizar (en estado último o en servicio).
- 2) Selección del diámetro y longitud del bulón.
En general el diámetro del bulón está en función del espesor de las chapas a unir y de las disponibilidades de espacio.
Se puede tomar como un límite superior del diámetro $d = 5.t - 0,2$ (con d y t en cm.) t es el espesor más chico de las chapas a unir.

También como referencia conviene que $d \geq (\Sigma t) / 5$ siendo (Σt) el espesor del paquete a unir.

Un criterio complementario es buscar que la resistencia a corte (Sección 2.2.4.2.(B)) sea igual a la resistencia por aplastamiento (Sección 2.2.4.3).

La longitud del bulón se determina en función del espesor del paquete a unir y tratando que la parte roscada quede fuera de los planos de corte.

- 3) Determinación de la resistencia de diseño del bulón según el tipo y el número de secciones de corte o fricción.
- 4) Determinación del número de bulones necesarios. Se divide la fuerza requerida, última o de servicio según corresponda, por la resistencia de diseño de un bulón.
- 5) Distribución de los bulones. Se debe lograr que el centro de gravedad de los bulones coincida con la recta de acción de la fuerza requerida y que se satisfagan las distancias mínimas entre centros de bulones y a los bordes, y no superar las 6 filas de bulones.
- 6) Las barras traccionadas se deberán verificar para los estados límites influidos por la presencia de agujeros. (Rotura en sección neta y rotura de bloque de corte)

3.9.1. Resistencia de diseño a la tracción o al corte

La resistencia de diseño a la tracción o al corte de los bulones de alta resistencia y de elementos roscados será:

$$R_d = \phi \cdot F_n \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

ϕ = el factor de resistencia indicado en la Tabla J.3.2.

F_n = La resistencia nominal a la tracción F_t , o al corte F_v , indicadas en la Tabla J.3.2., en MPa.

A_b = El área nominal del cuerpo no roscado del bulón o de la parte roscada (para varillas recalcadas, ver la nota (c) al pie de la Tabla J.3.2.)., en cm^2 .

Se pueden dar dos casos con respecto a la rosca, que la misma, este excluida en el plano de corte y en la que este incluida en el mismo

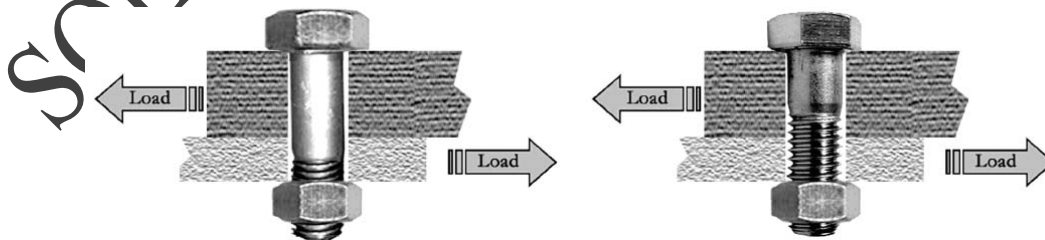


Figura 11: Planos de corte en union abulonada

Tabla J.3.2. Resistencia de Diseño de Bulones

Descripción de los bulones	Resistencia a la tracción		Resistencia al corte en uniones del tipo aplastamiento	
	Factor de resistencia ϕ	Resistencia nominal, F_t (MPa)	Factor de resistencia ϕ	Resistencia nominal, F_v (MPa)
Bulones comunes Tipos A307, ISO 4.6	0,75	260 (a)	0,75	140 (b,e)
Bulones A325, A325M ó ISO 8.8 cuando la rosca no está excluida de los planos de corte		620 (d)		330 (e)
Bulones A325, A325M ó ISO 8.8 con la rosca excluida de los planos de corte		620 (d)		415 (e)
Bulones A490, A490M ó ISO 10.9 cuando la rosca no está excluida de los planos de corte		778 (d)		414 (e)
Bulones A490, A490M ó ISO 10.9 con la rosca excluida de los planos de corte		778 (d)		517 (e)
Partes roscadas que cumplen con los requerimientos de la Sección A.3, y la rosca no está excluida de los planos de corte		0,75 F_u (a,c)		0,40 F_u
Partes roscadas que cumplen con los requerimientos de la Sección A.3, y la rosca está excluida de los planos de corte		0,75 F_u (a,c)		0,50 F_u (a,c)
<p>(a) Cargas estáticas solamente.</p> <p>(b) Se permite la rosca en los planos de corte.</p> <p>(c) La resistencia nominal a la tracción de la parte roscada de una varilla recalada, basada en el área de la sección en el diámetro mayor de la rosca A_0, será mayor que el área nominal del cuerpo A_0 de la varilla antes del recalado multiplicada por F_y.</p> <p>(d) Para bulones A325, A325M, ISO 8.8 y A490, A490M, ISO 10.9 solicitados a tracción con fatiga, ver la Sección A-K.3.</p> <p>(e) Cuando se empleen uniones del tipo de aplastamiento para empalmar barras traccionadas con bulones separados en dirección paralela a la fuerza, a más de 1300 mm, los valores tabulados deben ser reducidos en un 20 %.</p>				

Figura 12: Tabla J.3.2. Extraída del CIRSOC 301/05

La fuerza aplicada será la suma de la fuerza requerida resultante de las acciones mayorada y de cualquier tracción resultante del efecto de la acción de palanca producida por la deformación de las partes unidas (Figura 13)

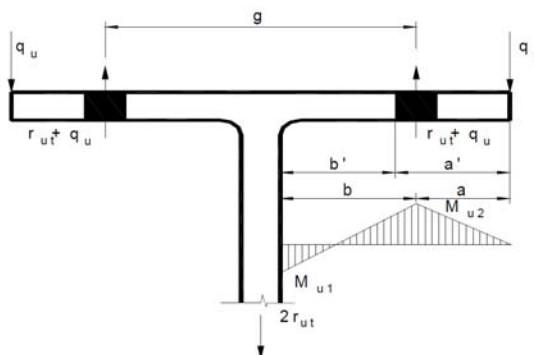


Figura 13: Acción de palanca. Extraída del CIRSOC 301/05



3.9.2. Combinación de tracción y corte en uniones tipo aplastamiento

La resistencia de diseño a tracción de un bulón sometido a corte y tracción combinados será:

$$R_d = \phi \cdot F_t \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

ϕ = El factor de resistencia indicado en la Tabla J.3.2.

F_t = La resistencia nominal a tracción en términos de tensión calculada con las expresiones de la Tabla J.3.5. como una función de la tensión de corte requerida f_v producida por las cargas mayoradas, en MPa. La tensión de corte requerida f_v será menor o igual que la resistencia de diseño al corte $\phi \cdot F_v$, indicada en la Tabla J.3.2.

Tabla J.3.5. Resistencia nominal a la tracción (F_t), (MPa). Uniones de tipo aplastamiento

Descripción de los bulones	Rosca incluida en el plano de corte	Rosca excluida del plano de corte
Bulones comunes (A307/ISO 4.6)	338 – 2,5 $f_u \leq 260$	
Bulones A325, A325M, ISO 8.8	806 – 2,5 $f_u \leq 620$	806 – 2,0 $f_u \leq 620$
Bulones A490, A490M, ISO 10.9	1012 – 2,5 $f_u \leq 778$	1012 – 2,0 $f_u \leq 778$
Partes roscadas de bulones A449 de diámetro mayor que 38,1 mm	0,98 F_u – 2,5 $f_u \leq 0,75 F_u$	0,98 F_u – 2,0 $f_u \leq 0,75 F_u$

Figura 14: Tabla J.3.5. Extraída del CIRSOC 301/05

3.9.3. Resistencia al aplastamiento de la chapa en los agujeros

La resistencia al aplastamiento de la chapa será verificada tanto para las uniones tipo aplastamiento como para las tipo deslizamiento crítico. La utilización de agujeros holgados y ovalados cortos y largos con eje mayor paralelo a la dirección de la fuerza se restringe para las uniones de deslizamiento crítico por medio de la Sección J.3.2.

La resistencia de diseño al aplastamiento de la chapa en los agujeros será:

$$R_d = \phi \cdot R_n$$

Con: $\phi = 0,75$

Siendo:

R_n = La resistencia nominal al aplastamiento de la chapa, en kN.

La resistencia nominal R_n será determinada de la siguiente forma:

- Para un bulón en una unión con agujeros normales, holgados u ovalados cortos, independientemente de la dirección de la fuerza, o con agujeros ovalados largos con eje mayor paralelo a la dirección de la fuerza:

- a) Cuando la deformación alrededor del agujero para cargas de servicio sea una consideración de proyecto (Deformación no permitida):

$$R_n = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

- b) Cuando la deformación alrededor del agujero para cargas de servicio no sea una consideración de proyecto:

$$R_n = 1,5 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 3,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

- b) Para un bulón en una unión con agujeros ovalados largos, con eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza:

$$R_n = 1,0 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 2,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

F_u = La resistencia a la tracción especificada de la chapa, en MPa

d = El diámetro del bulón, en cm

t = El espesor de la parte conectada crítica, en cm

L_c = La distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde del agujero y el borde del agujero adyacente o el borde del material, en cm (Ver Figura 15).

Para la unión, la resistencia al aplastamiento de la chapa será considerada como la suma de las resistencias al aplastamiento de la chapa en todos los agujeros de los bulones que pertenecen a la unión

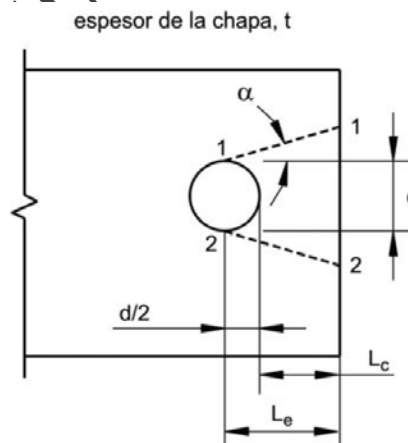


Figura 15: Desgarramiento de la chapa. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

3.9.4. Resistencia a la rotura de bloque de corte

Los ensayos realizados han demostrado que en vigas recortadas puede existir un modo de falla por desgarramiento (rotura) a lo largo del perímetro de los agujeros, según se muestra en la Figura 16.

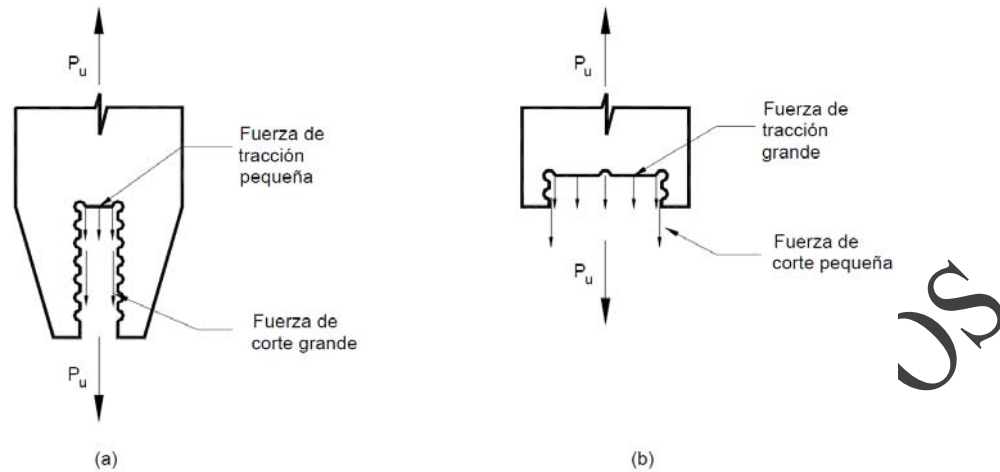


Figura 16: Rotura del bloque de corte a tracción. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

Este modo de falla denominado como rotura del bloque de corte, combina la resistencia a tracción en un plano y la resistencia al corte en un plano perpendicular al anterior. El camino de falla está definido mediante la línea que une los centros de los agujeros. El modo de falla por rotura de bloque de corte se produce también en uniones como las mostradas en la Figura a continuación

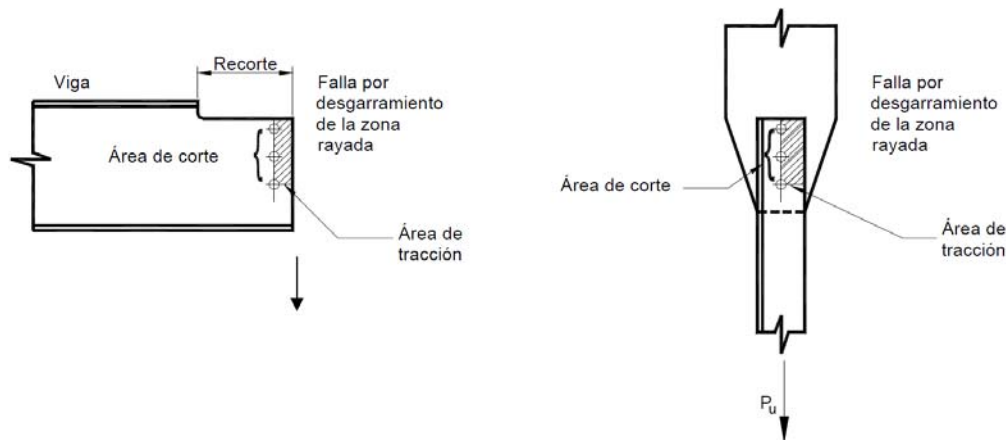


Figura 17: Superficie de falla para el estado límite de rotura de bloque de corte.

La rotura del bloque de corte es un estado límite en el cual la resistencia está determinada por la suma de la resistencia al corte en una línea (o líneas) de falla y de la resistencia a la tracción en un segmento perpendicular. Debe ser comprobada en las uniones extremas de viga donde se corta el ala superior y en situaciones similares, tales como barras traccionadas y chapas de nudo. Cuando se utilice la resistencia a rotura en el área neta para determinar la resistencia de un segmento, se deberá emplear la fluencia en el área bruta para el segmento perpendicular. La resistencia de diseño a la rotura del bloque de corte, $\phi \cdot R_n$, se determinará de la siguiente forma:

a) Cuando $F_u \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) \geq 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [0,6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt}] \cdot (10^{-1})$$



b) Cuando $F_u \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) < 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_y \cdot A_{gt}] \cdot (10^{-1})$$

Con: $\phi = 0,75$

Siendo:

A_{gv} = El área bruta solicitada al corte, en cm^2

A_{gt} = El área bruta solicitada a la tracción, en cm^2

A_{nv} = El área neta solicitada al corte, en cm^2

A_{nt} = El área neta solicitada a la tracción, en cm^2

R_n = La resistencia nominal del bloque de corte, en kN

F_u = La tensión de rotura especificada del acero, en MPa

F_y = La tensión de fluencia especificada del acero, en MPa

3.10. Calculo de uniones de deslizamiento crítico

La resistencia de diseño al corte de bulones de alta resistencia en uniones de deslizamiento crítico se obtendrá de acuerdo con la Sección J.3.8(a) e J.3.8(b). Los bulones así dimensionados se deberán verificar a corte trabajando en uniones tipo aplastamiento con las Secciones J.3.6. y J.3.7. y será verificado el aplastamiento de la chapa de acuerdo con las Secciones J.3.1. y J.3.10..

Las uniones de deslizamiento crítico impiden el desplazamiento de las partes unidas lo que es fundamentalmente una condición de servicio. Para satisfacerla deberá dimensionarse la unión con las cargas de servicio.

En casos especiales puede el proyectista definir que no exista desplazamiento hasta la falla, en cuyo caso se proyectará la unión de deslizamiento crítico para estado último con la solicitación producida por las cargas mayoradas.

3.10.1. Uniones de deslizamiento crítico dimensionadas para cargas mayoradas

La resistencia de diseño al deslizamiento $\phi \cdot R_{str}$, deberá ser mayor o igual que la fuerza requerida debida a las cargas mayoradas, donde:

$$\phi \cdot R_{str} = 1,13 \cdot \mu \cdot T_b \cdot N_s$$

Siendo:

R_{str} = La resistencia nominal al deslizamiento, en kN.

T_b = La fuerza de tracción mínima del bulón dada en la Tabla J.3.1., en kN.

N_s = La cantidad de superficies de rozamiento.

μ = El coeficiente medio de rozamiento para las Clases A, B, o C, según corresponda, o el que surja de ensayos.



- Para superficies Clase A (superficies de acero limpias con cepillo metálico libres de polvo, óxido o cascarillas de laminación y no pintadas, o superficies con recubrimientos Clase A en acero limpiado con chorro de arena) $\mu = 0,33$
- Para superficies Clase B (superficies de acero limpiadas con chorro de arena y no pintadas o superficies con recubrimiento Clase B en acero limpiado con chorro de arena) $\mu = 0,50$
- Para superficies Clase C (superficies galvanizadas por inmersión en caliente y con superficies ásperas), $\mu = 0,35$

3.10.2. Uniones de deslizamiento crítico dimensionadas para cargas de servicio

Se dimensiona en base a una llamada resistencia de diseño a corte que en realidad es la fuerza que puede transmitir la unión por rozamiento, pues el bulón no trabaja a corte

La resistencia de diseño al corte de un bulón en una unión de deslizamiento crítico para cargas de servicio será:

$$R_d = \phi \cdot F_v \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

$\phi = 1$ Para agujeros normales, holgados, ovalados cortos, y ovalados largos cuando el eje más largo es perpendicular o paralelo a la línea de fuerza.

F_v = La resistencia al deslizamiento crítico para cargas de servicio indicada en la Tabla A-J.3.2. , en MPa.

Tabla A-J.3.2. Resistencia al corte F_v para cargas de servicio de bulones de alta resistencia en uniones de deslizamiento crítico (a) (MPa).

Tipo de bulón	Resistencia al Corte			
	Agujeros normales	Agujeros holgados y ovalados cortos	Agujeros ovalados largos	
			Perpendicular a la línea de fuerza	Paralelo a la línea de fuerza
A325, A325M ISO 8.8	117	103	83	69
A490, A490M ISO 10.9	145	124	103	90

(a) Para cada plano de corte.

Figura 18: Tabla A-J.3.2. Extraída del CIRSOC 301/05

Los valores de la tabla anterior corresponden a superficies Clase A con un coeficiente de deslizamiento $\mu = 0,33$. Para superficies con mejor condición de rozamiento se podrán tomar valores superiores en función de la relación del coeficiente μ correspondiente con respecto a 0,33. Para superficies con peor condición de rozamiento (por ej. Galvanizadas sin tratamiento) se tomarán valores menores en proporción a la relación del μ con respecto a 0,33.

Se deberá especificar claramente el tratamiento a dar a las superficies en contacto.

La resistencia de diseño al corte será igual o mayor que la fuerza de corte en el bulón debida a las cargas de servicio.



3.10.3. Tracción y corte combinados en uniones de deslizamiento crítico dimensionadas para cargas mayoradas

Cuando las uniones de deslizamiento crítico estén solicitadas por una fuerza de tracción T_u , que reduzca la fuerza de apriete entre las superficies en contacto, la resistencia de diseño al rozamiento $\phi \cdot R_{str}$, deberá ser multiplicada por el siguiente factor, en el cual T_u (kN) es la resistencia a tracción requerida bajo cargas mayoradas:

$$1 - T_u / (1,13 \cdot T_b \cdot N_b)$$

Siendo:

T_u = La fuerza de tracción mínima del bulón dada en la Tabla J.3.1., en kN.

N_b = La cantidad de bulones cargados con la fuerza de tracción T_u , en kN.

3.10.4. Tracción y corte combinados en uniones de deslizamiento crítico dimensionadas para cargas de servicio

Si la unión, además de la de corte, está sometida a una fuerza de tracción, el efecto de ésta disminuye el efecto del pretensado del bulón, por lo que disminuye la capacidad para transmitir corte por fricción.

La resistencia de diseño al corte de un bulón en una unión de deslizamiento crítico solicitada a una fuerza de tracción T (kN) debida a las cargas de servicio que reduce la fuerza de apriete entre las partes en contacto, será $\phi \cdot F_v \cdot A_b \cdot (10^{-1})$, multiplicada por el siguiente factor de reducción:

$$1 - T / (0,8 \cdot T_b \cdot N_b)$$

Siendo:

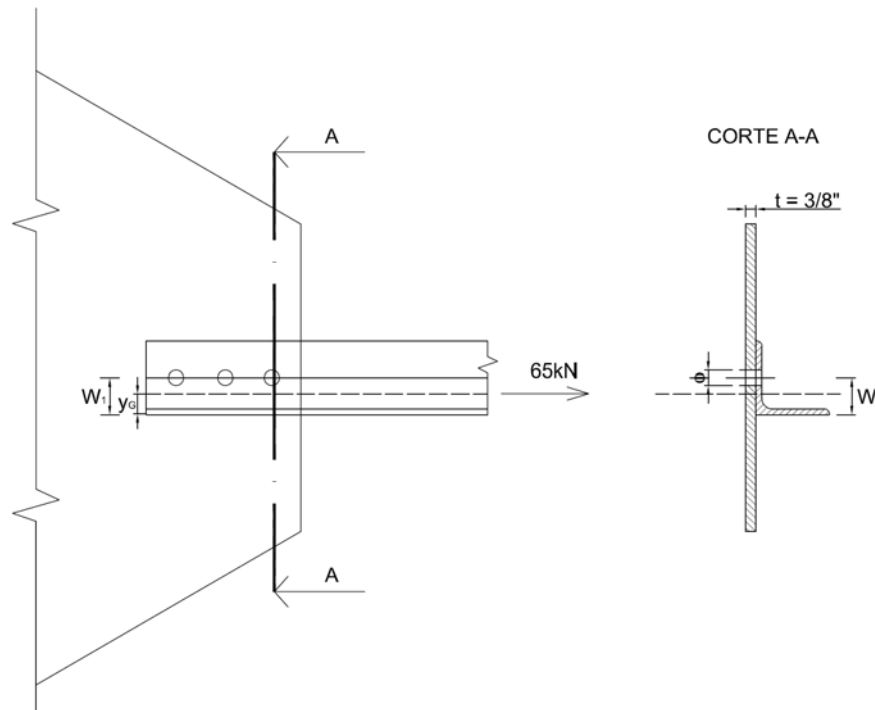
T_b = El pretensado mínimo del bulón dado por la Tabla J.3.1., en kN.

N_b = La cantidad de bulones cargados con la fuerza de tracción de servicio T , en kN.

3.11. Ejemplo de aplicación:

3.11.1. Ejemplo 1

Dimensionar la unión de un perfil ángulo $L2\frac{1}{2}" \times 2\frac{1}{2}" \times \frac{1}{4}"$ a una cartela cuyo espesor de $\frac{3}{8}"$ con bulones de tipo A307, para un esfuerzo ultimo de tracción de $T_u = 65kN$. El acero utilizado de los perfiles y la cartela es F-24.



El acero utilizado en los perfiles y bulones es de acero F-24.

Resolución:

Se calcula el diámetro aproximado del bulon de acuerdo a la siguiente ecuación:

$d = \sqrt{5 \cdot t} - 0,2$ siendo t el espesor mínimo (en cm) de los elementos a unir, en nuestro caso es de $\frac{1}{4}"$ (0,64cm) que corresponde al espesor de la cartela

$$d = \sqrt{5 \cdot 0,64cm} - 0,2 = 1,58mm$$

Adoptamos bulones de $\frac{1}{2}"$, donde el área del vástago es:

$$A_b = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{(1,27cm)^2}{4} = 1,26cm^2$$

Resistencia de diseño al corte



La resistencia de diseño al corte de los bulones será:

$$R_d = \phi \cdot F_n \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

$\phi = 0,75$ (El factor de resistencia indicado en la Tabla J.3.2)

$F_n = F_v = 140 \text{ MPa}$ (La resistencia nominal, o al corte F_v , indicadas en la Tabla J.3.2. para bulones tipo A307, en MPa)

A_b = El área nominal del cuerpo no roscado del bulón (Se considera que el la rosca está excluida del plano de corte)

$$R_d = 0,75 \cdot 140 \text{ MPa} \cdot 1,26 \text{ cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 13,23 \text{ kN}$$

Entonces, la cantidad necesaria de bulones es:

$$n = \frac{T_u}{R_d} = \frac{65 \text{ kN}}{13,23 \text{ kN}} = 4,91$$

Adoptamos 5 bulones de ½" tipo A307

Distancias y Separaciones

- Distancias mínimas al borde:

Según tabla J.3.4., para bulones de ½" y bordes laminados $d_b = 18 \text{ mm}$

- Separación mínimo entre bulones: $3 \cdot d = 3 \cdot 1,27 \text{ cm} = 3,81 \text{ cm}$
- Separación máxima entre bulones:

Para barras no pintadas de acero resistente a la corrosión

$$s_{\max} \leq 14 \cdot t = 14 \cdot 0,64 \text{ cm} = 8,96 \text{ cm}$$

$$s_{\max} \leq 180 \text{ mm}$$

Verificación al aplastamiento

La resistencia de diseño al aplastamiento de la chapa en los agujeros será:

$$R_d = \phi \cdot R_n$$

Con: $\phi = 0,75$

Siendo:

R_n = La resistencia nominal al aplastamiento de la chapa, en kN.



La resistencia nominal R_n será determinada de la siguiente forma:

Cuando la deformación alrededor del agujero para cargas de servicio sea una consideración de proyecto (Deformación no permitida):

$$R_n = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

$L_c = 25\text{mm} - 12,7\text{mm}/2 = 18,65\text{mm}$ (Distancia desde el borde del agujero del bulón al borde del perfil)

$L_c = 50\text{mm} - 12,7\text{mm} = 37,3\text{mm}$ (Distancia entre bordes de agujeros consecutivos)

$$R_{n1} = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) = 1,2 \cdot (1,865\text{cm} + 4 \cdot 3,73\text{cm}) \cdot 0,64\text{cm} \cdot 370\text{MPa} \cdot (10^{-1})$$

$$R_{n1} = 476\text{kN}$$

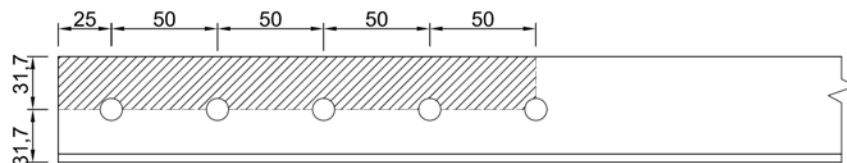
$$R_{d1} = 0,75 \cdot 476\text{kN} = 358\text{kN} > 65\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

$$R_{n2} = 2,4 \cdot 1,27\text{cm} \cdot 0,64\text{cm} \cdot 370\text{MPa} \cdot (10^{-1}) = 72,17\text{MPa} \text{ (Resistencia de un bulón)}$$

$$R_{n2} = 5 \cdot 72,17\text{MPa} = 270\text{MPa}$$

$$R_{d1} = 0,75 \cdot 270\text{kN} = 203\text{kN} > 65\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

Verificación del bloque de corte



Las áreas son:

$$A_{gv} = (5\text{cm} + 4 \cdot 2,5\text{cm}) \cdot 0,64\text{cm} = 14,4\text{cm}^2$$

$$A_{nv} = (5\text{cm} \cdot 4 + 2,5\text{cm} - 1,27\text{cm} \cdot 4 - 1,27\text{cm} / 2) \cdot 0,64\text{cm} = 10,74\text{cm}^2$$

$$A_{gt} = 3,17\text{cm} \cdot 0,64\text{cm} = 2,02\text{cm}^2$$

$$A_{nt} = (3,17\text{cm} - 1,27\text{cm} / 2) \cdot 0,64\text{cm} = 1,62\text{cm}^2$$

Entonces veremos si se cumple la condición

$$F_u \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) < 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$$

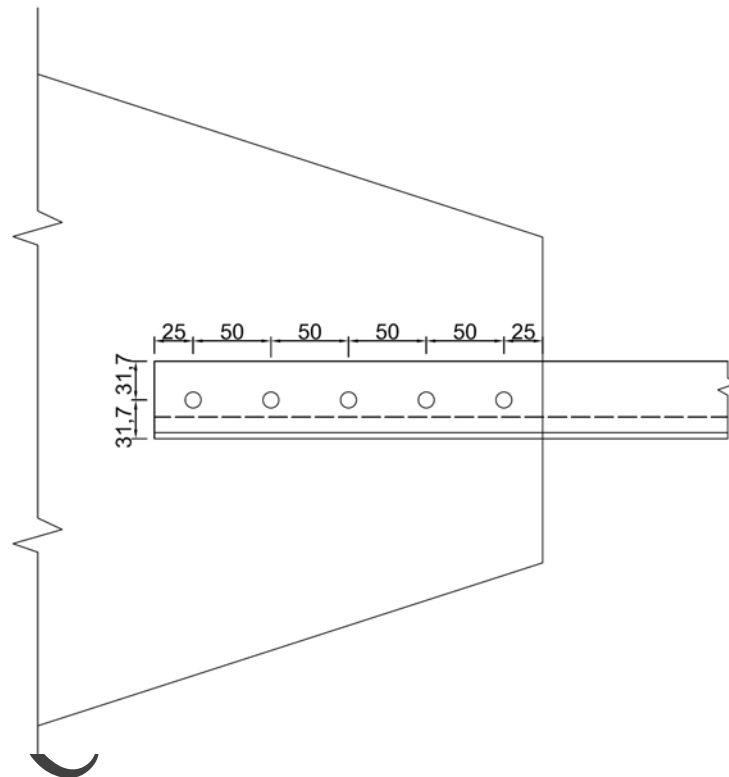
$$370\text{MPa} \cdot 1,62\text{cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 60\text{kN} < 0,6 \cdot 370\text{MPa} \cdot 10,74\text{cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 238\text{kN}$$

Entonces la resistencia del bloque de corte, viene dada por:

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_y \cdot A_{gt}] \cdot (10^{-1})$$

$$\phi \cdot R_n = 0,75 \cdot [0,6 \cdot 370\text{MPa} \cdot 10,74\text{cm}^2 + 235\text{MPa} \cdot 2,02\text{cm}^2] \cdot (10^{-1}) = 214\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

Disposición final de la unión (medida expresada en mm)



3.11.2. Ejemplo 2

Repetir el cálculo utilizando bulones tipo A325

Adoptamos el mismo diámetro que el ejercicio anterior, por trabajarse con los mismos espesores

Adoptamos bulones de ½", donde el área del vástago es:

$$A_b = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{(1,27\text{cm})^2}{4} = 1,26\text{cm}^2$$

Resistencia de diseño al corte



La resistencia de diseño al corte de los bulones será:

$$R_d = \phi \cdot F_n \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

$\phi = 0,75$ (El factor de resistencia indicado en la Tabla J.3.2)

$F_n = F_v = 415 \text{ MPa}$ (La resistencia nominal, o al corte F_v , indicadas en la Tabla J.3.2. para bulones tipo A325, en MPa)

A_b = El área nominal del cuerpo no roscado del bulón (Se considera que el la rosca está excluida del plano de corte)

$$R_d = 0,75 \cdot 415 \text{ MPa} \cdot 1,26 \text{ cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 39,21 \text{ kN}$$

Entonces, la cantidad necesaria de bulones es:

$$n = \frac{T_u}{R_d} = \frac{65 \text{ kN}}{39,21 \text{ kN}} = 1,65$$

Adoptamos 2 bulones de ½" tipo A325

Distancias y Separaciones

Las separaciones y distancias son las mismas adoptadas en el ejercicio anterior

Verificación al aplastamiento

La resistencia de diseño al aplastamiento de la chapa en los agujeros será:

$$R_d = \phi \cdot R_n$$

Con: $\phi = 0,75$

Siendo:

R_n = La resistencia nominal al aplastamiento de la chapa, en kN.

La resistencia nominal R_n será determinada de la siguiente forma:

Cuando la deformación alrededor del agujero para cargas de servicio sea una consideración de proyecto (Deformación no permitida):

$$R_n = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

$L_c = 25 \text{ mm} - 12,7 \text{ mm} / 2 = 18,65 \text{ mm}$ (Distancia desde el borde del agujero del bulón al borde del perfil)



$L_c = 50\text{mm} - 12,7\text{mm} = 37,3\text{mm}$ (Distancia entre bordes de agujeros consecutivos)

$$R_{n1} = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) = 1,2 \cdot (1,865\text{cm} + 3,73\text{cm}) \cdot 0,64\text{cm} \cdot 370\text{MPa} \cdot (10^{-1})$$

$$R_{n1} = 189\text{kN}$$

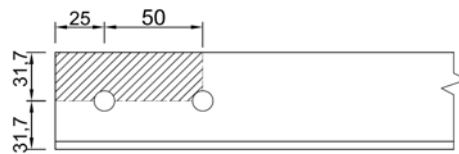
$$R_{d1} = 0,75 \cdot 189\text{kN} = 142\text{kN} > 65\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

$$R_{n2} = 2 \cdot 4 \cdot 1,27\text{cm} \cdot 0,64\text{cm} \cdot 370\text{MPa} \cdot (10^{-1}) = 72,17\text{kN} \text{ (Resistencia de un bulón)}$$

$$R_{n2} = 2 \cdot 72,17\text{kN} = 144\text{kN}$$

$$R_{d1} = 0,75 \cdot 144\text{kN} = 108\text{kN} > 65\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

Verificación del bloque de corte



Las áreas son:

$$A_{gv} = (5\text{cm} + 2,5\text{cm}) \cdot 0,64\text{cm} = 4,8\text{cm}^2$$

$$A_{nv} = (5\text{cm} + 2,5\text{cm} - 1,27\text{cm} - 1,27\text{cm} / 2) \cdot 0,64\text{cm} = 3,58\text{cm}^2$$

$$A_{gt} = 3,17\text{cm} \cdot 0,64\text{cm} = 2,02\text{cm}^2$$

$$A_{nt} = (3,17\text{cm} - 1,27\text{cm} / 2) \cdot 0,64\text{cm} = 1,62\text{cm}^2$$

Entonces veremos si se cumple la condición

$$F_u \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) < 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$$

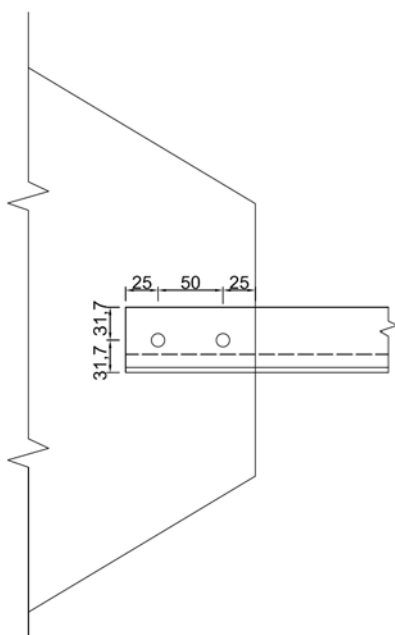
$$370\text{MPa} \cdot 1,62\text{cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 60\text{kN} < 0,6 \cdot 370\text{MPa} \cdot 3,58\text{cm}^2 \cdot (10^{-1}) = 79\text{kN}$$

Entonces la resistencia del bloque de corte, viene dada por:

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_y \cdot A_{gt}] \cdot (10^{-1})$$

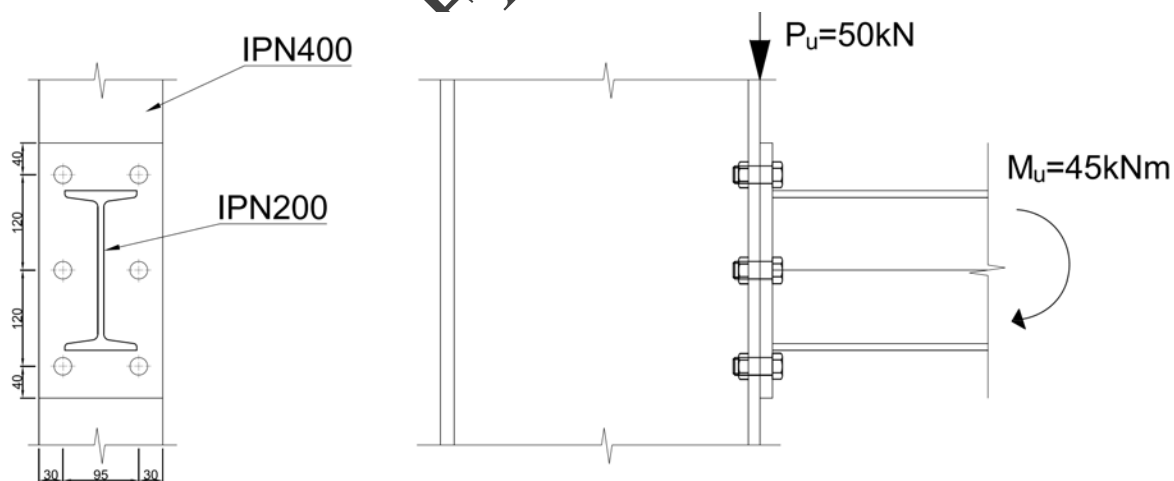
$$\phi \cdot R_n = 0,75 \cdot [0,6 \cdot 370\text{MPa} \cdot 3,58\text{cm}^2 + 235\text{MPa} \cdot 2,02\text{cm}^2] \cdot (10^{-1}) = 95\text{kN} \text{ (Verifica)}$$

Disposición final de la unión (medida expresada en mm)



3.11.3. Ejemplo 3:

Dimensionar la unión Viga – Columna con bulones A325 como se muestra a continuación. La viga está formada por un perfil IPN200, que se une mediante una chapa de 5/8" a la columna. Esta chapa esta soldada a la viga. La columna está formada por un IPN400. La separación entre bulones es la indicada en la figura. Dicha unión debe transmitir un momento $M_u = 45 \text{ kNm}$ y un esfuerzo de corte $P_u = 50 \text{ kN}$. El acero de los perfiles y la chapa es F-24



El espesor del ala del perfil IPN 400 es de 21,6mm



Resolución

Se calcula el diámetro aproximado del bulon de acuerdo a la siguiente ecuación:

$d = \sqrt{5 \cdot t} - 0,2$ siendo t el espesor mínimo (en cm) de los elementos a unir, en nuestro caso es de 5/8" (1,59cm) que corresponde al espesor de la cartela

$$d = \sqrt{5 \cdot 1,59cm} - 0,2 = 2,61mm$$

Adoptamos bulones de 7/8", donde el área del vástago es:

$$A_b = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{(2,22cm)^2}{4} = 3,87cm^2$$

Adoptamos 6 bulones de 7/8" y verificamos la unión

Distancias y Separaciones

- Distancias mínimas al borde:

Según tabla J.3.4., para bulones de 7/8" y bordes laminados $d_b = 28mm$ (Verifica)

- Separación mínimo entre bulones: $s \geq 3 \cdot d = 3 \cdot 2,22cm = 6,66cm$ (Verifica)
- Separación máxima entre bulones:

Para barras no pintadas de acero resistente a la corrosión

$$s_{max} \leq 14 \cdot t = 14 \cdot 1,59cm = 22,26cm$$

$$s_{max} \leq 180mm$$

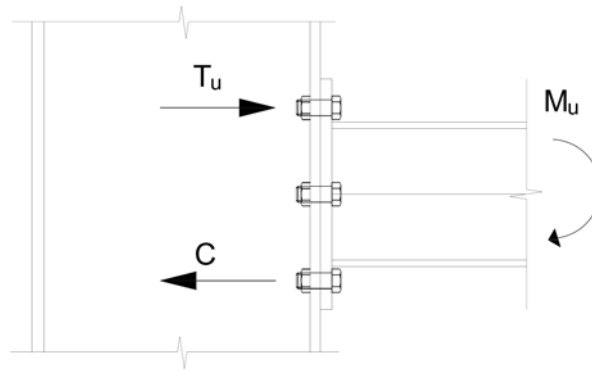
Verificación al corte y tracción combinados

Cada bulón deberá soportar un esfuerzo de corte igual a:

$$P_v = \frac{50kN}{6} = 8,33kN$$

Los 2 bulones de los extremos superior, además de estar sometido a corte, también estarán sometido a tracción debido al momento, cuyo valor es:

$$T_u = \frac{M_u}{z}$$



Donde z es la distancia entre los bulones más alejados, medido a eje de agujero

$$T_u = \frac{M_u}{z} = \frac{45kNm}{0,24m} = 187,5kN$$

Por lo tanto cada bulón tendrá la mitad de la carga que es $T_u = 93,75kN$

La resistencia de diseño a tracción de un bulón sometido a corte y tracción combinados será:

$$R_d = \phi \cdot F_t \cdot A_b \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

$$\phi = 0,75$$

$$F_t = 808 - 2,0 \cdot f_v \leq 620$$

La tensión de corte será:

$$f_v = \frac{T_u}{A_b \cdot (10^{-1})} = \frac{8,33kN}{3,87cm^2 \cdot (10^{-1})} = 21,52MPa$$

$$F_t = 808 - 2,0 \cdot 21,52MPa = 765MPa$$

Se adopta $F_t = 620MPa$

Entonces la resistencia de diseño será:

$$R_d = \phi \cdot F_t \cdot A_b \cdot (10^{-1}) = 0,75 \cdot 620MPa \cdot 3,87cm^2 \cdot (10^{-1}) = 180kN > 93,75kN \text{ (Verifica)}$$

Verificación al aplastamiento

La resistencia de diseño al aplastamiento de la chapa en los agujeros será:

$$R_d = \phi \cdot R_n$$

Con: $\phi = 0,75$



Siendo:

R_n = La resistencia nominal al aplastamiento de la chapa, en kN.

La resistencia nominal R_n será determinada de la siguiente forma:

Cuando la deformación alrededor del agujero para cargas de servicio sea una consideración de proyecto (Deformación no permitida):

$$R_n = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1})$$

$L_c = 25m - 12,7mm / 2 = 18,65mm$ (Distancia desde el borde del agujero del bulón al borde del perfil)

$L_c = 50m - 12,7mm = 37,3mm$ (Distancia entre bordes de agujeros consecutivos)

$$R_{n1} = 1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \cdot (10^{-1}) = 1,2 \cdot (5cm + 2,22cm / 2) \cdot 1,59cm \cdot 370MPa \cdot (10^{-1})$$

$$R_{n1} = 274kN$$

$$R_{d1} = 0,75 \cdot 274kN = 206kN > 8,33kN \text{ (Verifica)}$$

$$R_{n2} = 2,4 \cdot 2,22cm \cdot 1,59cm \cdot 370MPa \cdot (10^{-1}) = 313kN \text{ (Resistencia de un bulón)}$$

$$R_{d1} = 0,75 \cdot 313kN = 235kN > 8,33kN \text{ (Verifica)}$$



4. Uniones Soldadas

La soldadura es un proceso por el cual se unen partes metálicas mediante la aplicación de calor combinada o no con una presión entre las superficies en contacto. Puede o no adicionarse material de aporte al material base que se quiere unir.

En las estructuras metálicas se usan actualmente dos procedimientos para las uniones soldadas:

- a) Soldaduras por contacto o por puntos
- b) Soldadura por arco eléctrico con aporte de material

El aspecto de las soldaduras es el de una serie de ondas estrechas que se superponen unas a otras. La uniformidad de las ondas depende de la habilidad del soldador.

La temperatura que se alcanza durante el proceso es de 3000 a 4000 grados centígrados lo que hace se fundan, tanto el metal base como el extremo del electrodo. Al enfriarse, el conjunto queda formando una pieza única.

4.1. Procesos de soldaduras según CIRSOC 304/07:

Los procesos de soldaduras considerados por el reglamento son los siguientes:

- a) Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)
- b) Soldadura por arco sumergido (SAW)
- c) Soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (semiautomática alambre macizo), excepto modo de transferencia por cortocircuito (GMAW)
- d) Soldadura por arco con alambre tubular (semiautomática alambre tubular), con o sin protección gaseosa. (FCAW)
- e) Para los procesos (c) y (d) se deberán utilizar únicamente máquinas de soldar con fuente de poder de tensión constante.

A continuación se describe en forma breve cada uno de los procedimientos.

4.1.1. Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)

Se la conoce también por las siglas SMAW (Shield Metal Arc Welding), cuyo significado se podría decir que es soldadura por arco con metal protegido o revestido.

Para lograr la unión, se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente. El electrodo está compuesto de un núcleo metálico (material de aporte) y un revestimiento. Este procedimiento es manual, ya que la realiza un operador en donde se reemplaza el electrodo en la medida que se va consumiendo el mismo.

El revestimiento cumple la función de estabilizar y mantener el arco, principalmente con CA, proteger el material fundido del ingreso de gases perjudiciales, formar una escoria protectora del metal caliente, aporta elementos de aleación para obtener características determinadas en el metal depositado, mejora la fusión entre materiales.

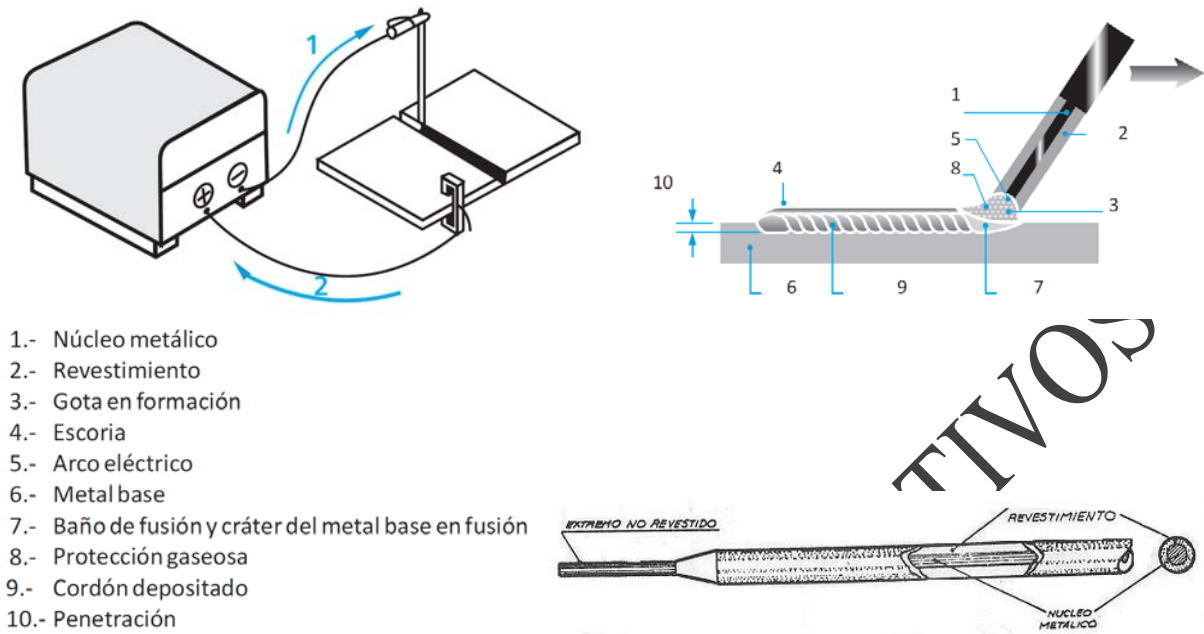


Figura 19: Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido

Las ventajas que presenta este método son:

- El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil
- El metal de aporte y el medio de protección proceden del electrodo revestido, es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos con protección gaseosa
- Se puede emplear en cualquier posición tanto en locales abiertos como cerrados
- Es aplicable a la mayoría de procesos y aleaciones y también es aplicable a gran variedad de espesores, mayores de 2 mm.

Como desventajas o limitaciones se puede decir:

- Es algo sucio a comparación con otros procesos, se necesita remover la escoria y si no se le da una adecuada limpieza entre cordones el cordón puede sufrir una serie de discontinuidades
- Es un proceso lento, debido a la baja tasa de deposición y a la necesidad de retirar la escoria, la tasa de deposición es baja, debido a que el electrodo sólo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm)
- No resulta productivo para espesores mayores de 28 mm
- No es aplicable a metales de bajo punto de fusión, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos
- Tiene limitación en lugares de difícil acceso.

4.1.2. Soldadura por arco sumergido (SAW)

Se la conoce también por las siglas SAW (Submerged Arc Welding), cuyo significado se podría decir que es soldadura por arco sumergido.

Similar a la soldadura MIG, el Arco Sumergido ó SAW implica la formación de un arco entre el electrodo y la pieza de trabajo. El proceso utiliza un fundente para generar escoria y gases de protección y para añadir elementos de aleación al baño de soldadura, por lo tanto, no se requiere gas de protección. Se puede colocar una capa fina de polvo fundente sobre la superficie de la pieza de trabajo. El arco se mueve a lo largo de la junta y el exceso flux es reciclado a través de una tolva. Queda una capa de escoria fusionada que se puede quitar fácilmente después de la soldadura. Como el arco está completamente cubierto por la capa de fundente, la pérdida de calor es extremadamente baja. Esto produce una eficiencia térmica del 60% (en comparación con el 25% de arco MIG). No hay ningún arco visible, la soldadura está libre de salpicaduras y no es necesaria ninguna extracción de humos.



Figura 20: Proceso de soldadura por arco sumergido

Las ventajas que presenta este método son:

- Altas tasas de deposición
- Alta penetración.
- Altas velocidades de soldadura.
- Permite soldar piezas con grandes espesores
- Buena apariencia del cordón
- No es necesario proteger al operador de la máquina de la emisión de radiación, ya que el arco se encuentra sumergido en el fundente, evitándose además las salpicaduras del metal fundido.
- El fundente actúa como un desoxidante protegiendo el arco y aportando elementos de aleación al cordón en el caso de emplear fundentes aleados.

Como desventajas o limitaciones se puede decir:

- Se requiere que las uniones a soldar estén completamente cerradas.
- Únicamente puede trabajarse en posición plana u horizontal
- La portabilidad del proceso es limitada.
- El fundente es abrasivo.
- El fundente necesita de almacenamiento y embalaje especial.
- Crea escoria.
- Con este sistema generalmente se sueldan piezas a partir de los 5 mm de espesor.

4.1.3. Soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (semiautomática alambre macizo), excepto modo de transferencia por cortocircuito (GMAW)

Se la conoce también por las siglas GMAW (Gas Metal Arc Welding), cuyo significado se podría decir que es soldadura por arco con metal protegido con gas.

En la soldadura por Arco Metálico con Gas, conocida como Proceso MIG/MAG, la fusión es producida por un arco que se establece entre el extremo del alambre aportado continuamente y la pieza a soldar. La protección se obtiene íntegramente de los gases suministrados simultáneamente con el metal de aporte.

La tarea, que cumplen los gases protectores arriba mencionados, es la de proteger al arco, al baño de fusión y al material de aporte contra el peligroso acceso de los gases de la atmósfera. Desplaza el aire alrededor del arco para evitar la contaminación del metal fundido con gases de la atmósfera.

Se lo denomina semiautomático, porque es realizado por un operador, pero el material de aporte es suministrado en forma continua mediante una pistola especial.

Tiene dos variables este método y son:

- MIG (Metal Inert Gas): El cual emplea protección de un gas inerte puro, (helio, argón, etc.). Para metal no ferroso.
- MAG (Metal Active Gas): El cual hace uso de dióxido de carbono, CO₂, o mezcla de CO₂ + Argón como gas protector. Para metal ferroso.

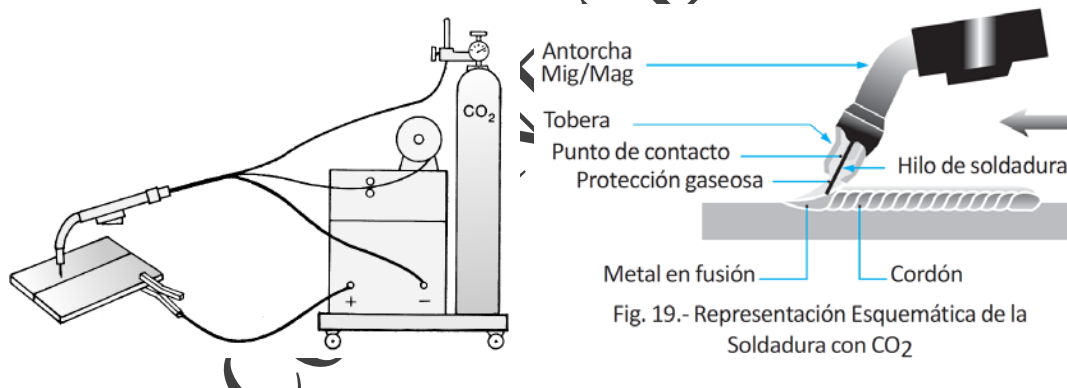


Fig. 19.- Representación Esquemática de la Soldadura con CO₂



Figura 21: Proceso de soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa



Las ventajas que presenta este método son:

- Puede utilizarse para la soldadura de todo tipo de material.
- El electrodo es alimentado continuamente, con lo que aumenta la productividad por no tener que cambiar de electrodo y la tasa de deposición es elevada. Se pueden conseguir velocidades de soldadura mucho más elevadas que con SMAW (electrodos revestidos).
- Se puede soldar en cualquier posición.
- Se pueden realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre cordones, zona que generalmente presenta peligro de imperfecciones.
- Casi no se requiere limpieza después de la soldadura

Como desventajas o limitaciones se puede decir:

- El equipo de soldadura es de valor más elevado, complejo y menos transportable que el de SMAW
- Es más difícil de usar en lugares de difícil acceso.
- Es difícil de utilizar en espacios restringidos, requiere conducciones de gas y de agua de refrigeración, tuberías, cilindros de gas de protección, por lo que no facilita su empleo en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Es sensible al viento y a las corrientes de aire, por lo que a veces es necesario utilizar pantallas protectoras.

4.1.4. Soldadura por arco con alambre tubular (semiautomática alambre tubular), con o sin protección gaseosa. (FCAW)

Se la conoce también por las siglas FCAW (Flux Cored Arc Welding), cuyo significado se podría decir que es soldadura por arco con núcleo fundente.

Es un proceso en el cual se obtiene la unión de los metales por calentamiento de estos en un arco entre un electrodo tubular continuo y la pieza, algo muy similar a lo que sucede en el proceso GMAW, su principal diferencia es el alambre comúnmente usado el cual tiene un flux interno que desempeña funciones muy similares al revestimiento del electrodo en el proceso SMAW, es decir el flux interior aporta a la estabilización del arco, el ajuste de la composición química de la soldadura introduciendo elementos de aleación y la protección por medio de los humos y la escoria entre otros.

El proceso tiene dos variantes principales:

- a) Soldadura autoprotegida (Innershield), en la cual la fusión del flux, que es el núcleo del alambre, proporciona toda la protección necesaria en la región de soldadura (sin uso de gas de protección).
- b) Utilizando un tanque de gas (dual shield), que forma parte de la protección al igual que se hace en una soldadura con un alambre macizo

Para ambas se trabaja de forma semi-automática, utilizando básicamente el mismo equipo GMAW. Al igual que el proceso GMAW es semiautomático, porque es realizado por un operador, pero el material de aporte es suministrado en forma continua mediante una pistola especial.

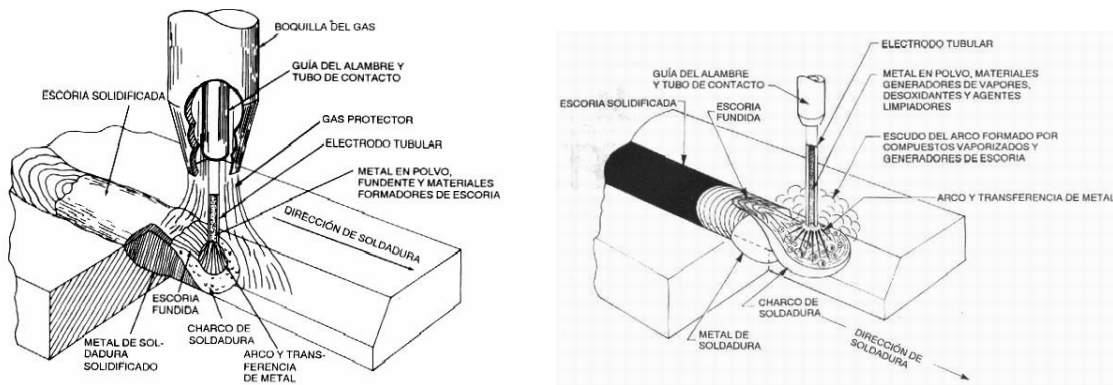


Figura 22: Proceso de soldadura por arco con alambre tubular con o sin protección gaseosa

Las ventajas que presenta este método son:

- Depósito de metal de soldadura de alta calidad. Excelente aspecto de la soldadura lisa y uniforme.
- Es posible soldar muchos aceros dentro de un intervalo de espesores amplio.
- Factor operativo elevado – fácil de mecanizar.
- Diseños de unión económicos en cuanto a su ingeniería.
- No requiere tanta limpieza previa como GMAW.
- Tasa de deposición hasta 4 veces mayor que con SMAW.
- Empleo de electrodos con de autoprotección hace innecesario el equipo para manipular fundente o gas, y tolera mejor las condiciones de movimiento brusco del aire que prevalezca en la construcción en exteriores.

Como desventajas o limitaciones se puede decir:

- El proceso de FCAW actual está limitado a la soldadura de metales ferrosos y aleaciones con base de níquel.
- El equipo es más costoso y complejo
- El alimentador de alambre y la fuente de potencia deben estar relativamente cerca del punto de soldadura.
- En la versión con escudo de gas, el escudo externo puede sufrir efectos adversos por el viento y las corrientes de aire. Esto no es un problema con los electrodos auto protegidos, excepto cuando hay vientos fuertes, porque el escudo se genera en el extremo del electrodo, que es exactamente donde se requiere.
- Se genera mayor cantidad de humos y vapores (en comparación con GMAW o SAW).

4.2. Clases de uniones soldadas:

Existen distintos tipos de soldaduras, a continuación se detallan:

4.2.1. Por su disposición tenemos:

Soldadura a tope:

Hay dos clases de soldadura a tope:

- Soldadura a tope de penetración completa
Consiste, en general, en unir dos chapas situadas en un mismo plano. Si la soldadura es accesible por un solo lado, se realiza sin preparación de bordes, para espesores inferiores a 4 mm. Con espesores superiores a 6 mm se preparan los bordes para una conseguir una buena penetración de la soldadura sobre el metal.

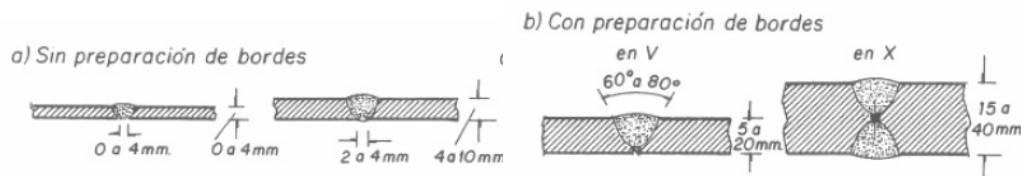


Figura 23: Soldadura a tope de penetración completa

- Soldadura a tope de penetración parcial
Al igual que las soldaduras a tope de penetración total las de penetración parcial pueden presentarse con planos prolongados, o con planos en T.

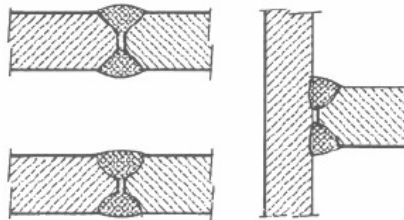


Figura 24: Soldadura a tope de penetración parcial

Soldadura a filete

Las soldaduras a filete se usan generalmente para juntas solapadas o en uniones T. Dependiendo de la orientación de las soldaduras, estas pueden ser clasificadas como soldaduras longitudinales o transversales. En las soldaduras longitudinales, la carga es aplicada paralela a la longitud de la soldadura y en las transversales, la carga es aplicada perpendicular a la soldadura.

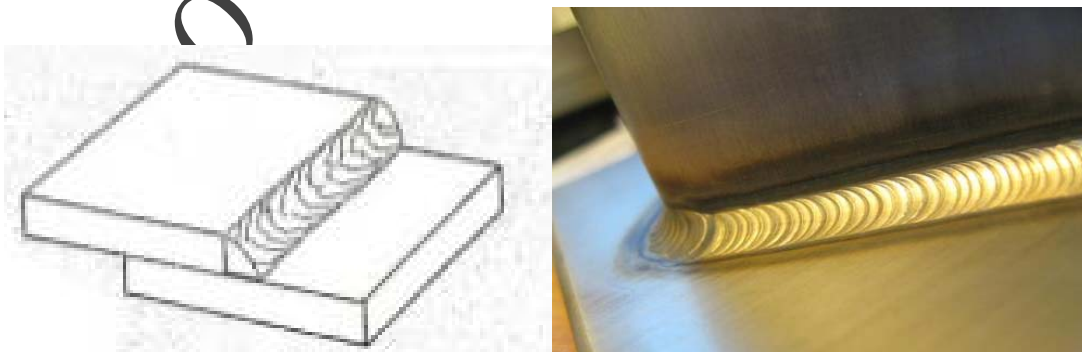


Figura 25: Soldadura a filete

Soldadura de tapón o de muesca:

La soldadura de muesca es un tipo especial de soldadura de filete que se usa a veces cuando es difícil obtener la longitud necesaria para desarrollar la resistencia requerida a corte en una junta solapada.

Las soldaduras en tapón consisten en rellenar agujeros circulares o alargados. No se utilizan para resistir esfuerzos de tracción pero sí para transmitir esfuerzos cortante, evitar el pandeo o la separación de elementos solapados y ensamblar elementos compuestos.

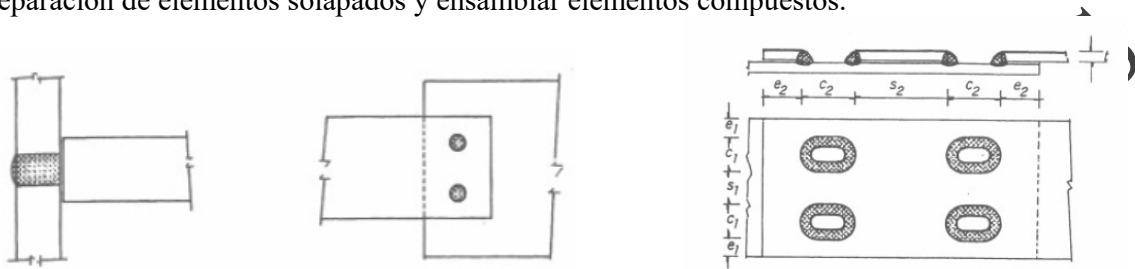


Figura 26: Soldadura de tapón y/o de muesca

4.2.2. Por su posición en la que se ejecuta:

Según su posición durante la ejecución de la soldadura los cordones se clasifican en:

Cordón plano: su superficie es aproximadamente horizontal. El metal de aportación se vierte desde encima

Cordón en ángulo horizontal: formado por la intersección de un plano horizontal con otro vertical, y sobre la cara superior del plano horizontal.

Cordón horizontal: se sitúa en un plano vertical y su dirección es horizontal.

Cordón Vertical: Su dirección es aproximadamente vertical.

Cordón de techo: puede ser de ángulo en techo o a tope también en techo; se sitúan en un plano horizontal, pero por su cara inferior.

Cordón en ángulo vertical: formado en la intersección de dos planos verticales.

La ejecución más recomendable es la del cordón plano y la del cordón en ángulo horizontal ya que el metal de aportación, fundido, se coloca por gravedad en la posición deseada.

Los cordones de techo son los más difíciles de realizar, debiéndose tomar las disposiciones constructivas convenientes, para limitarlos al mínimo.

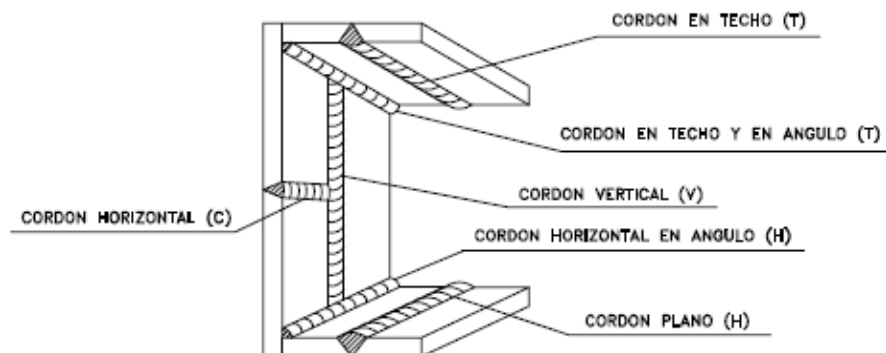


Figura 27: Distintas posiciones de las soldaduras



4.3. Tipos de electrodos revestidos:

La soldadura más utilizada en nuestro medio es la de arco con electrodo revestido o SMAW, por lo que se describirán los tipos más comunes de electrodos y su denominación según la norma AWS 5.1. La cual tiene una forma como se indica en la siguiente imagen:



La letra E designa el producto: Electrodo para soldadura eléctrica manual.

Los primeros 2 dígitos -en un número de 4 dígitos- o 3 dígitos -en un número de 5 dígitos señalan la resistencia mínima a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura:

E 60XX	60 000 lbs/pulg mínimo	4200kg/cm ²
E 70XX	70 000 lbs/pulg mínimo	4750kg/cm ²
E 110XX	110 000 lbs/pulg mínimo	4900kg/cm ²

El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con el electrodo en cuestión. Así si vale 1 significa que el electrodo es apto para soldar en todas posiciones (plana, vertical, techo y horizontal), 2 si sólo es aplicable para posiciones planas y horizontal; y si vale 4 indica que el electrodo es conveniente para posición plana, pero especialmente apto para vertical descendente.

El último dígito, que está íntimamente relacionado con el anterior, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo, e identifica a su vez el tipo de revestimiento, el que es calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento.

El sufijo indica el porcentaje aproximado de aleación en el depósito de soldadura.

Clasificación AWS	Tipo de Revestimiento	Posición de soldo según AWS	Corriente eléctrica
E 6010 E 6011	Alta celulosa, sodio Alta celulosa, potasio	F,V,OH,H	CC (+) CA o CC (+)
E 6012 E 6013	Alto titanio, sodio Alto titanio, potasio	F,V,OH,H	CA, CC (-) CA, CC (+) o CC (-)
E 6020	Alto óxido de hierro	H-Fillete F	CA, CC (-) CA, CC (+) o CC (-)
E 7014 E 7015	hierro en polvo, titanio bajo hidrógeno, sodio	F,V,OH,H	CA, CC (+) o CC (-) CC(+)
E 7016 E 7018	Bajo hidrógeno, potasio Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	F,V,OH,H	CA o CC (+) CA o CC (+)
E 7018M E 7024	Bajo hidrógeno, hierro en polvo Hierro en polvo, titanio	F,V,OH,H H-Fillete, F	CC (+) CA, CC (+) o CC (-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	H-Fillete F	CA, CC (-) CA, CC (+) o CC (-)
E 7028	Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	H-Fillete, F	CA o CC(+)
E 7048	Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	F,V,OH,H F,V,OH,HV-Descen.	CA o CC(+)

Según las normas AWS las posiciones de soldeo son:

F = plana; H = horizontal; filete = filete horizontal; V-Descend. (V-down) = vertical descendente; V = vertical; OH = sobrecabeza.

A1	0,5% Mo
B1	0,5% Cr; 0,5% Mo
B2	1,25% Cr; 0,5% Mo
B3	2,25% Cr; 1,0% Mo
B4	2,0% Cr; 0,5% Mo
B5	0,5% Cr; 1,0% Mo
C1	2,5% Ni
C2	3,25% Ni
C3	1,0% Ni; 0,35% Mo; 0,15% Cr
D1 y D2	0,25-0,45% Mo; 1,75% Mn
* G	0,5% mín. Ni; 0,3% mín. Cr; 0,2% mín. Mo; 0,1% mín. V; 1,0% mín. Mn

Los diámetros de los electrodos están íntimamente de con los espesores de las chapas a unir:

Espesor de las chapas en mm.	Diámetro de los electrodos mm.	Intensidad en amperios.
1 a 1,5	1	15 a 20
1,5 a 2	1,5	25 a 30
2 a 3	2	50 a 60
3 a 4	2,5	65 a 80
4 a 5	3,25	80 a 140
5 a 7	3,25	80 a 150
7 a 12	4	140 a 200
12 a 20	5	180 a 240
20 a 30	6	250 a 340

4.4. Uniones soldadas a tope

4.4.1. Área Efectiva

El *área efectiva* (A_w) de la soldadura a tope será determinado como el producto de la longitud efectiva de la soldadura por el espesor efectivo de garganta.

$$A_w = L_e \cdot t_e$$

La *longitud efectiva* (L_e) de la soldadura a tope será el ancho de la parte unida.

El *espesor efectivo* (t_e) de garganta de una soldadura a tope con penetración completa será el espesor de la parte unida más delgada.

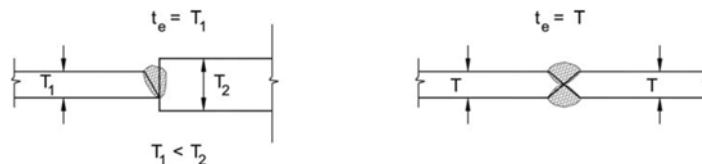
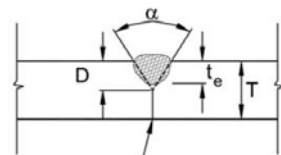


Figura 28: Dimensión efectiva de las soldaduras a tope con penetración completa. Extraída de los comentarios CIRSOC 301/05

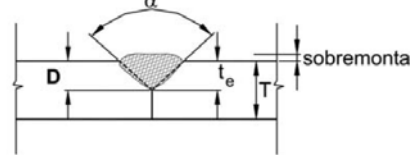
El **espesor efectivo** (t_e) de garganta de una soldadura a tope con penetración parcial será el indicado en la Tabla J.2.1.

Tabla J.2.1. Espesor de garganta efectivo de soldaduras a tope de penetración parcial

Proceso de Soldadura	Posición de soldado	Preparación de la Junta	Espesor de Garganta Efectivo
Arco c/ Electrodo Metálico Protegido o Arco Sumergido	Todas	Juntas en U o J	Altura del chaflán
Arco c/ Elec. Metálico bajo Protección gaseosa		Bisel o Junta en $V \geq 60^\circ$	
Arco con Núcleo Fundente		Bisel o Junta en $V < 60^\circ$ pero $\geq 45^\circ$	Altura del chaflán menos 3 mm



(c) Bisel o junta en "V" Sin Vacío



(d) Bisel o junta en "V" sobremonta

Figura 29: Dimensión efectiva de las soldaduras a tope con penetración parcial. Extraída de los comentarios CIRSOC 301/05

4.4.2. Limitaciones

El espesor de garganta efectivo mínimo de una soldadura a tope con penetración parcial será el indicado en la Tabla J.2.3. El tamaño de la soldadura estará determinado por el mayor espesor de las dos partes unidas. Sin embargo, el tamaño de la soldadura será menor o igual que el espesor de la parte unida más delgada, aún cuando una dimensión mayor fuera necesaria por la resistencia requerida. En este caso, se deberá tener particular cuidado para proporcionar suficiente precalentamiento para obtener una soldadura de buena calidad.

4.5. Soldadura de filete

4.5.1. Área efectiva

El **área efectiva** (A_w) será el producto de la longitud efectiva del filete por el espesor efectivo de garganta. La tensión en el filete será considerada actuando en el área efectiva, para cualquier dirección de la fuerza aplicada.

$$A_w = L_e \cdot t_e$$

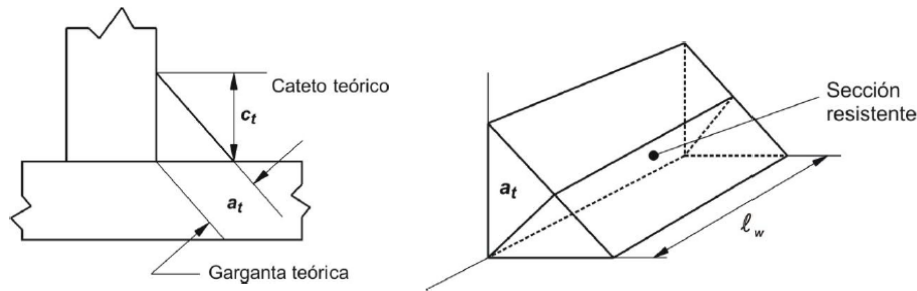


Figura 30: Dimensiones teóricas y sección resistente de una junta de filete. Extraída del CIRSOC 304/07

La **longitud efectiva del filete** (L_e) será la longitud total del filete de dimensiones uniformes, incluidos los retornos. En un filete curvo, la longitud efectiva deberá ser medida a lo largo de línea central de la garganta efectiva.

El **espesor efectivo de garganta de una soldadura de filete** (t_e) será la distancia más corta entre la raíz y la cara del filete en una representación esquemática de la sección transversal de la soldadura.

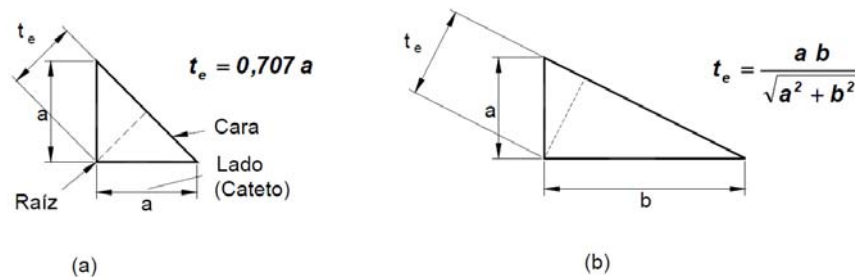


Figura 31: Sección transversal de soldadura. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

4.5.2. Limitaciones

- El **lado mínimo de la soldadura de filete** (w_{\min}) será mayor o igual que el requerido para transmitir las fuerzas calculadas y que el indicado en la Tabla J.2.4. que está basado en experiencias y proporciona cierto margen respecto de las tensiones no calculadas que se originan durante la fabricación, manipuleo, transporte, y montaje.

Tabla J.2.4. Tamaño Mínimo de Soldaduras de Filete (b)

Espesor del Material Unido más Grueso (mm)	Tamaño Mínimo de la Soldadura de Filete (a) (mm)
Hasta 6	3
Más de 6 hasta 13	5
Más de 13 hasta 19	6
Más de 19	8

(a) Lado del filete. Debe hacerse de una sola pasada.
 (b) Ver la Sección J.2.2(b) para el lado máximo del cordón de filete.

Aunque no existe una limitación específica para el tamaño máximo de las soldaduras de filete, algunas veces la disposición de los materiales de la unión limita el tamaño máximo de la soldadura que se puede depositar en forma apropiada, y medida a 10 largo del borde de una placa. Es necesario que el inspector de soldadura pueda identificar el borde de una placa para colocar el calibrador de soldadura.

El metal de relleno aunque solidificado, pero aún caliente, se contrae de manera significativa conforme se enfría a la temperatura ambiente. La restricción que el material grueso representa para la contracción de dicho metal de aporte, puede generar un agrietamiento de la soldadura. Más aún, si la soldadura es pequeña, la cantidad total de calor en la misma es pequeña, y si una o ambas partes unidas es gruesa, este calor se transmite tan rápido que la soldadura puede enfriarse de igual forma y volverse muy quebradiza. Este efecto de enfriamiento del material grueso sobre las soldaduras pequeñas puede entonces producir una pérdida de ductilidad en la soldadura. Ésta puede agrietarse debido a la combinación de estos dos efectos. Para evitar la formación de grietas y minimizar la distorsión, las especificaciones establecen un tamaño mínimo de soldadura.

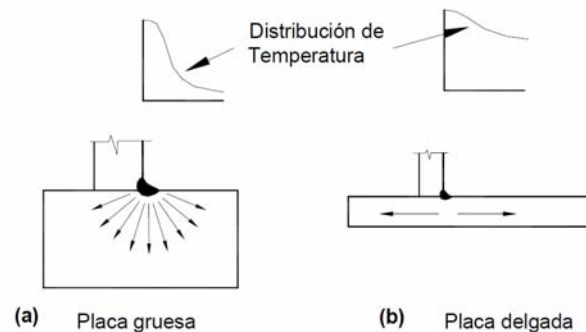


Figura 32: Distribución de temperatura. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

- El lado máximo del filete en soldaduras de unión entre partes será:
 - a) Menor o igual que el espesor del material para cordones a lo largo de los bordes de material de espesor menor que 6 mm.
 - b) Menor o igual que el espesor del material menos 2 mm, para cordones a lo largo de los bordes de material de espesor mayor o igual que 6 mm, a menos que la soldadura sea especialmente indicada en los planos para ser realizada de forma de obtener un espesor de garganta completo. En este caso, se permite que la distancia entre el borde del metal base y el pie de la soldadura sea menor que 2 mm, siempre que el tamaño del cordón sea claramente verificable.

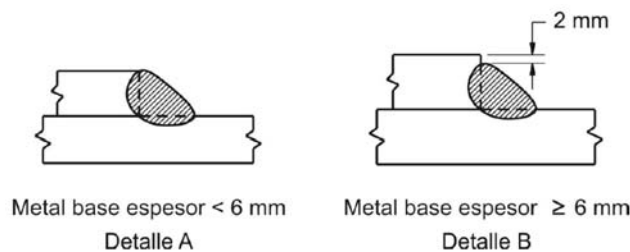


Figura 33: Lado máximo del filete. Extraída del CIRSOC 304/07

- **La longitud efectiva mínima de una soldadura de filete** calculada sobre la base de la resistencia, será mayor o igual que **4 veces el lado nominal**. Si esto no se cumple se considerará que el **lado de la soldadura** no excede de **1/4 de la longitud efectiva**.

Si en las uniones extremas de barras planas traccionadas se utilizan solamente soldaduras de filete longitudinales, la **longitud de cada filete de soldadura** será mayor o igual que la distancia perpendicular entre ellos. Para los efectos sobre el área efectiva de las barras unidas de la longitud de las soldaduras de filete longitudinales en uniones extremas.

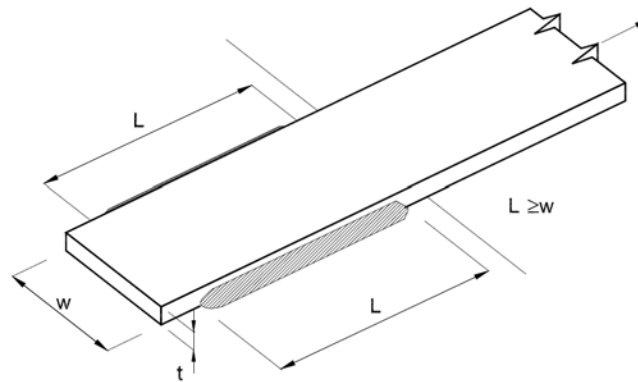


Figura 34: Longitud de filete de barras planas. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

Cuando se inicia y termina una soldadura de filete, pequeñas secciones cercanas a los extremos no son totalmente efectivas debido a los cráteres y concentraciones de esfuerzos. La longitud total de una soldadura de filete es la distancia desde el cráter, que se encuentra en el borde de inicio, hasta el cráter que se encuentra en el borde de terminación. Por lo tanto, la longitud efectiva de una soldadura de filete se considera, por lo general, como la longitud total menos dos veces el tamaño nominal de la soldadura, para considerar los cráteres

$$L_e = L - 2 \cdot w$$

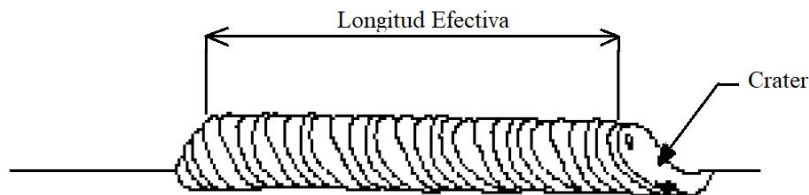


Figura 35: Longitud efectiva de soldadura de filete

- **La longitud efectiva máxima** para soldaduras de filete paralelas a la dirección de la fuerza, ubicadas en el extremo de barras cargadas (“soldaduras de filete extremas”) será:

$$L_e = \beta \cdot L$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1 & \text{Si } L \leq 100 \cdot w \\ \beta &= 1,2 - 0,002 \cdot (L/w) \leq 1 & \text{Si } 100 \cdot w < L \leq 300 \cdot w \end{aligned}$$



$$\beta = 0,6$$

$$\text{Si } L > 300 \cdot w$$

Siendo:

L = La longitud real del filete, en cm.

w = El lado del filete, en cm.

Cuando se superan determinadas longitudes, resulta no conservador suponer que la tensión promedio sobre la longitud total de la soldadura puede ser tomada igual a la resistencia de diseño. Los ensayos han mostrado que para longitudes de soldaduras iguales o menores a aproximadamente *100 veces* el lado del filete se puede suponer razonablemente que la longitud efectiva es igual a la longitud real.

Para longitudes mayores que *100 veces* el lado del filete, la longitud efectiva se deberá adoptar menor que la longitud real. El coeficiente de reducción β , el cual es una aproximación simplificada de expresiones exponenciales desarrolladas en Europa durante varios años a partir de análisis por elementos finitos y ensayos. El criterio está basado sobre consideraciones de resistencia nominal para filetes de lado menor que *6 mm* y sobre el juicio profesional basado en un límite de servicio de un desplazamiento ligeramente menor que *1 mm* en el extremo, para filetes de lado igual o mayor que *6 mm*.

Matemáticamente, la aplicación del factor β implica que la resistencia mínima de una “soldadura de filete extrema” se alcanza cuando la longitud es aproximadamente *300 veces el lado*. Como resulta ilógico que la resistencia total de una soldadura de longitud mayor que *300 veces su lado*, sea inferior al de una soldadura de longitud menor, el coeficiente de reducción se adopta igual a *0,6* para filetes de longitud mayor que *300 veces su lado*.

Nota: El reglamento CIRSOC 301, el símbolo w tiene un doble significado, por un lado se lo llama al lado del filete y por otro es el ancho de una chapa plana. Por lo que se debe prestar especial atención el caso al que corresponda.

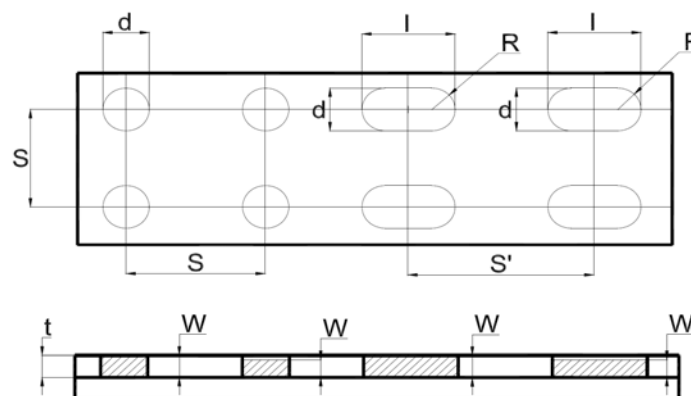
4.6. Soldadura de Tapón y de Muesca

4.6.1. Área Efectiva

El *área efectiva de corte de soldaduras de tapón y de muesca* será considerada como el área de la sección nominal del agujero ó muesca en el plano de la superficie de empalme.

4.6.2. Limitaciones

- Las *soldaduras de tapón o de muesca* pueden ser usadas para transmitir corte en uniones de solape o para prevenir el pandeo de las partes traslapadas y para unir las partes componentes de barras armadas.
- El *diámetro de los agujeros para soldaduras* de tapón será mayor o igual que el espesor de la parte que la contiene más *8 mm*, redondeados al siguiente mm, ni mayor que el diámetro mínimo más *3 mm*, ó *2,25 veces* el espesor del metal que se suelda. La separación mínima centro a centro de soldaduras de tapón será cuatro veces el diámetro del agujero (ver la Figura 36).



Espesor de chapa, en mm	Diámetro de agujero, o ancho de muesca, en mm	Separación y altura de soldadura
5 a 6	14	$d \geq (t + 8 \text{ mm})$; y también $d \leq 2,25 W$
8 a 9,5	18	$S \geq 4d$ $S' \geq 2l$ $l \leq 10W$ $R = d/2$ $R \geq t$ cuando $t \leq 16 \text{ mm}$, $W = l$ cuando $t > 16 \text{ mm}$, $W = l/2$ pero no menor que 16 mm
11 a 13	22	
14 a 16	24	

Figura 36: Soldadura de tapón o de muesca. Extraída del CIRSOC 301/05

- La **longitud de la muesca** para una soldadura de muesca no excederá de diez veces el espesor de la soldadura. El ancho de la muesca no será menor que el espesor de la parte que la contiene más **8 mm**, redondeando al mm siguiente, ni será mayor que **2,25 veces** el espesor de la soldadura. Los extremos de la muesca serán semicirculares o tendrán las esquinas redondeadas con un radio no menor que el espesor de la parte que la contiene, excepto en aquellos extremos en los cuales se extienda hasta el borde de la parte.
- La **separación mínima** de líneas de soldadura de muesca en la dirección transversal a su longitud será cuatro veces el ancho de la muesca. La separación mínima centro a centro en la dirección longitudinal sobre cualquier línea debe ser dos veces la longitud de la muesca.
- El **espesor de las soldaduras de tapón o de muesca** en material de espesor menor o igual que **16 mm**, será igual al espesor del material. En material de espesor mayor que **16 mm**, el espesor de la soldadura será, como mínimo, la mitad del espesor del material, pero nunca será menor que **16 mm**.

4.7. Resistencia de diseño de uniones soldadas:

La resistencia de un cordón de soldadura está gobernada por la resistencia del metal base o del material de aporte.

La **resistencia de diseño del metal de soldadura** es:

$$R_d = \phi \cdot F_w \cdot A_w \cdot (10^{-1})$$



Siendo:

F_w = La resistencia nominal del material del electrodo, en MPa.

A_w = El área de la sección efectiva de la soldadura, en cm².

ϕ = Factor de resistencia

La **resistencia de diseño del metal base** es:

$$R_d = \phi \cdot F_{BM} \cdot A_{BM} \cdot (10^{-1})$$

Siendo:

F_{BM} = La resistencia nominal del metal base, en MPa.

A_{BM} = El área de la sección transversal efectiva del metal base, en cm².

ϕ = Factor de resistencia

La Tabla J.2.5. contiene los factores de resistencia y las resistencias nominales de los cordones conjuntamente con algunas limitaciones. Para la adopción de estos estados límites se supone que se cumplen los requerimientos relativos a resistencia de los electrodos (electrodo de calidad concordante según Tabla 3.1. del Reglamento CIRSOC 304-2007) dados en la Tabla J.2.5. y en la Sección J.2.6.

Tipo de fuerza (a)	Material	Factor de Resistencia ϕ	Resistencia Nominal F_{RM} o F_w	Nivel de Resistencia Requerida del material de aporte (b,c)
Soldaduras a Tope de Penetración Completa				
Tracción perpendicular al área efectiva	Base	0,90	F_y	Debe usarse material de aporte compatible. Para requerimientos de Ensayo Charpy ver (d)
Compresión perpendicular al área efectiva	Base	0,90	F_y	Se permite usar metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que la del metal de aporte compatible
Tracción o compresión paralela al eje de la soldadura				
Corte en el área efectiva	Base	0,90	$0,60 F_y$	
	Electrodo	0,65	$0,60 F_{EXX}$	
Soldaduras a Tope de Penetración Parcial				
Compresión perpendicular al área efectiva	Base	0,90	F_y	Se permite usar metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que la del metal de aporte compatible
Tracción o compresión paralela al eje de la soldadura (e)				
Corte paralelo al eje de la soldadura	Base	0,60 (f)	(f)	
	Electrodo		$0,60 F_{EXX}$	
Tracción perpendicular al área efectiva	Base	0,90	F_y	
	Electrodo	0,65	$0,60 F_{EXX}$	
Soldaduras de Filete				
Corte en el área efectiva	Base	0,60 (f)	$0,60 F_{EXX}(f)$	Se permite usar metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que la del metal de aporte compatible
	Electrodo			
Tracción o compresión paralela al eje de la soldadura (e)	Base	0,90	F_y	
Soldaduras de Tapón y de Muesca				
Corte paralelo a las superficies de empalme (en el área efectiva)	Base	0,60 (f)	(f)	Se permite usar metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que la del metal de aporte compatible
	Electrodo		$0,60 F_{EXX}$	
(a) Para la definición del área efectiva, ver la Sección J.2.				
(b) Para el material de aporte compatible, ver la Tabla 3.1, Reglamento CIRSOC 304-2007.				
(c) Se permitirá metal de aporte con una resistencia mayor en un nivel que el metal de aporte compatible.				
(d) Para juntas en T o en ángulo sin retiro de chapas de respaldo en servicio se deberá utilizar material de aporte con una mínima tenacidad Charpy de 27J a 4°C. Si el material de aporte no cumple la citada exigencia y la chapa de respaldo no es retirada, la soldadura será dimensionada utilizando el factor de resistencia y la resistencia nominal de la soldadura a tope de penetración parcial.				
(e) Las soldaduras de filete y de penetración parcial que unen los elementos componentes de barras armadas, como una unión de ala y alma, podrán ser dimensionadas sin considerar la tensión de tracción o compresión en aquellos elementos, paralelos al eje de las soldaduras.				
(f) El cálculo de los materiales unidos está gobernado por las Secciones J.4. y J.5.				

Figura 37: Tabla J.2.5. Extraída del CIRSOC 301/05

Debido a que la soldadura debe transmitir totalmente la carga de una barra a otra, los cordones deben ser dimensionados correctamente y ejecutados con el electrodo adecuado. A los fines del cálculo, se supone que los filetes de soldadura transmiten las cargas mediante tensiones de corte en el área efectiva, independientemente de la orientación de los cordones en la unión. Las soldaduras a tope transmiten la carga de la misma manera que las partes que unen

Debe notarse que en la Tabla J.2.5. la resistencia nominal del filete de soldadura es determinada a partir del área efectiva de la garganta, mientras que la resistencia de las partes unidas está gobernada por sus respectivos espesores.

Los planos de corte para soldaduras de filete y para el material base:



Figura 38: Planos de corte en cordones de filete cargados longitudinalmente. Extraída de los comentarios del CIRSOC 301/05

Los planos de corte son:

- Plano 1-1, en el cual la resistencia está gobernada por la resistencia al corte del material A.
- Plano 2-2, en el cual la resistencia está gobernada por la resistencia al corte del metal de soldadura.
- Plano 3-3, en el cual la resistencia está gobernada por la resistencia al corte del material B.

4.7.1. Uniones que transmiten esfuerzo axial

El CIRSOC 301/05 exige que el centro de gravedad de los medios de unión coincida con el centro de gravedad de la barra, excepto que la excentricidad resultante de la no coincidencia sea considerada en el cálculo de las solicitaciones. Exime del cumplimiento de esta exigencia a las uniones extremas de ángulos simples y ángulos dobles axialmente cargados y sometidos a cargas estáticas. Un caso de este tipo es la unión de diagonales y montantes de cabriadas a las chapas de nudo, o de diagonales a cordones longitudinales en columnas armadas con celosías.

El proceso de proyecto de una unión de este tipo es:

- Se elige el lado del filete w tal que:

$$w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$$

- Se calcula la resistencia de diseño de una unidad de longitud de filete. Siendo el área efectiva el producto de la longitud unitaria por la proyección del lado sobre el plano de garganta supuesto a 45° , resulta:

$$R_{d1} = \phi \cdot F_w \cdot A_w \cdot (10^{-1}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) \cdot (0,707 \cdot w) \cdot 1 \cdot (10^{-1})$$

3) Se determina la longitud necesaria de filete L_t para una resistencia requerida F_u

$$L_t = F_u / R_{d1}$$

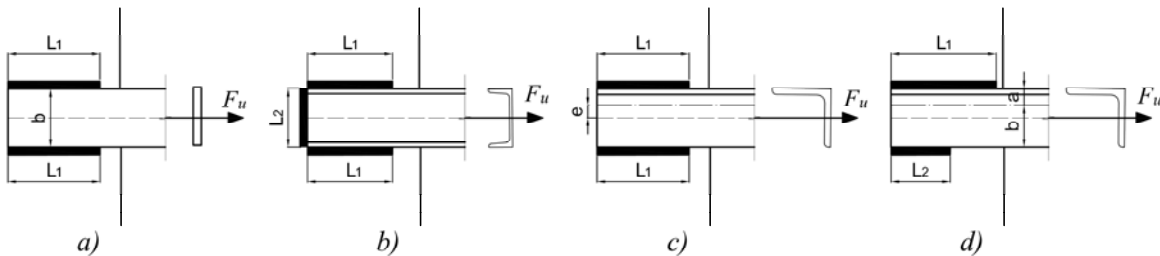


Figura 39: Cálculo de cordones en uniones que transmiten esfuerzo axial. Extraída de libro de Troglia

Se distribuyen los filetes según el caso.

En el caso (a) $L_1 = L_t/2$ y se debe cumplir además que $L_1 \geq b$

En el caso (b) $L_1 = (L_t - L_2)/2$

En el caso (c) siendo un ángulo simple se puede tomar $L_1 = L_t/2$ y no considerar la excentricidad.

Esto depende de la importancia del esfuerzo y además se debe tratar de cargas estáticas

En el caso (d) se distribuyen los filetes para centrar la soldadura con el eje de gravedad de la barra.

Por equilibrio:

$$L_1 = \left(\frac{b}{a+b} \right) \cdot L_t$$

$$L_2 = \left(\frac{a}{a+b} \right) \cdot L_t$$

4.7.2. Uniones sometidas a corte y momento en el plano

Se utiliza el método elástico que desprecia la fricción entre las partes unidas y las supone totalmente rígidas. Con estas hipótesis el método es conservador.

Supongamos la junta de la Figura 40. Si suponemos filetes de lado igual a la unidad (por ejemplo 1cm) y prefijamos sus longitudes L_t resulta la distribución de la Figura 40. Podemos obtener la posición del centro de gravedad (G) de los filetes de lado unitario y longitud L_t (se puede para ello despreciar la dimensión del lado del filete). Trasladada F_u a G , los filetes quedan sometidos a un corte F_u y a un momento torsor $T = F_u \cdot e_x$

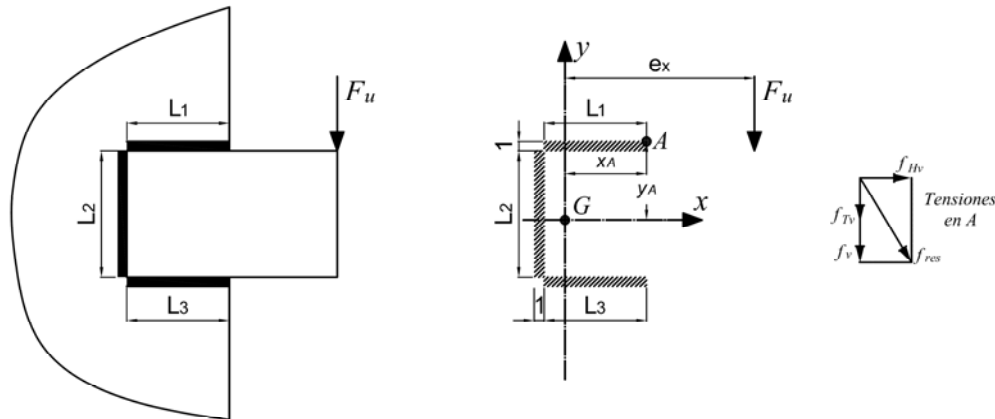


Figura 40: Cálculo de cordones sometidos a corte y momento en el plano. Extraída de libro de Troglia

Suponiendo una distribución uniforme la tensión debida al cortante en cualquier punto es:

$$f_v = \frac{F_u}{\sum L_i}$$

Las tensiones horizontal f_{Th} y vertical f_{Tv} debidas al momento torsor en un punto como el A son:

$$f_{Th} = \left(\frac{T}{I_p} \right) \cdot y_A \quad f_{Tv} = \left(\frac{T}{I_p} \right) \cdot x_A$$

Siendo:

$I_p = I_x + I_y$ El momento de inercia polar de la soldadura

I_x, I_y = Momento de inercia con respecto a los ejes X-X e Y-Y de los filetes de soldadura de ancho unitario y longitud L_i

x_A, y_A = Coordenadas del punto A

En un punto como el A, la tensión combinada será:

$$f_{res} = \sqrt{(f_v + f_{Tv})^2 + f_{Th}^2}$$

Se deberá buscar el punto de los filetes en que esta tensión resultante es máxima (f_{max}) lo que ocurrirá en los puntos más alejados del centro de gravedad.

La resistencia de diseño unitaria de un filete de 1cm de lado es

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) \cdot 0,707 \cdot 1$$

Luego el lado necesario de los filetes será:

$$w_{nec} = \frac{f_{max}}{f_{d1}}$$

Si d no cumpliera las especificaciones para lado mínimo o máximo se deberán redimensionar las longitudes de filetes L_i prefijadas.

Si además la unión debe transmitir esfuerzo normal, el mismo se distribuirá entre todos los cordones resultando una tensión que se sumará a la f_{Th}

Otra manera de resolverlo, sería adoptar un espesor y longitud de soldadura y obtener las tensiones máximas (f_{\max}) y deberá ser menor a la de diseño (f_{d1})

$$f_{d1} \geq f_{\max}$$

4.7.3. Uniones que transmiten corte y momento en el plano normal (corte y flexión)

Supongamos la unión de la Figura 41-a. Si tomamos filetes de lado unitario tendremos la situación de la Figura 41-b.

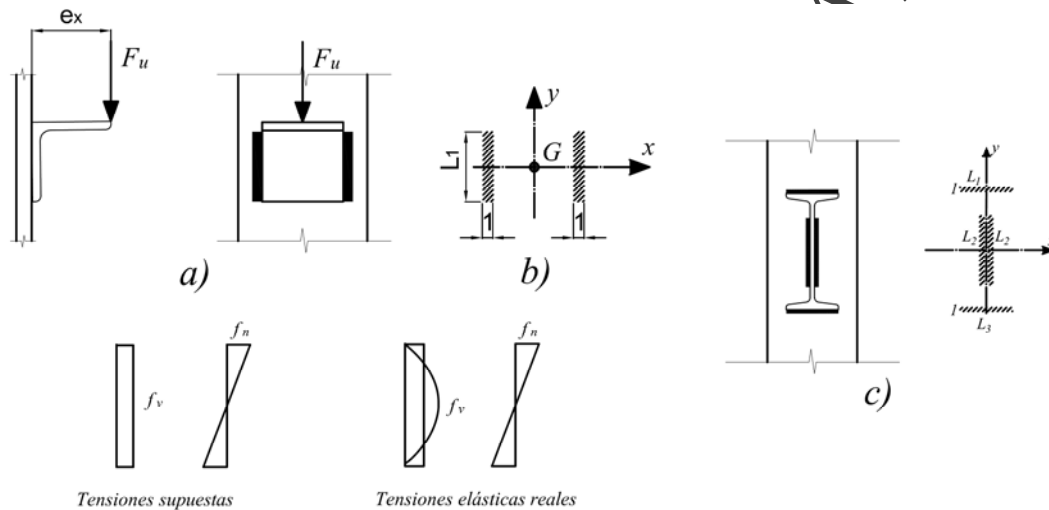


Figura 41: Cálculo de cordones sometidos a corte y momento normal al plano. Extraída de libro de Troglia

Un procedimiento práctico y simplificado es considerar que el corte se distribuye uniformemente en el área de los filetes verticales (tensión f_v) y el momento genera tensiones normales f_n iguales al momento dividido el módulo resistente S_w del área de los filetes con respecto al eje de flexión $X-X$. La tensión combinada se obtiene componiendo vectorialmente la tensión cortante y la normal. Esto en secciones rectangulares de soldadura como las de la Figura 40-a y 40-b no es estrictamente cierto porque no coexisten en el mismo punto los valores supuestos de tensiones, pero por simplicidad se procede de la forma indicada.

$$f_v = \frac{F_u}{A_w} \quad f_n = \frac{(F_u \cdot e_x)}{S_w}$$

$$f_c = \sqrt{f_v^2 + f_n^2}$$

Siendo:

A_w = Área efectiva de filetes verticales

S_w = Módulo resistente del área de filetes de lado unitario.



La tensión resistente de diseño de un filete de lado unitario es

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) \cdot 0,707 \cdot 1$$

Luego el lado necesario de los filetes será:

$$w_{nec} = f_c / f_{d1}$$

Si d no cumpliera las especificaciones de lado mínimo y máximo se deberán redimensionar y reubicar los filetes.

Si además la unión debe transmitir esfuerzo normal, el mismo se distribuirá entre el área total de los filetes resultando una tensión normal que se adicionará a la producida por el momento.

Otra manera de resolverlo, sería adoptar un espesor y longitud de soldadura y obtener las tensiones máximas (f_c) y deberá ser menor a la de diseño (f_{d1})

$$f_{d1} \geq f_c$$

4.8. Ensayos no destructivos a la soldadura:

Se presentan a continuación los ensayos no destructivos más comunes realizados a las soldaduras, para verificar su calidad. Los mismos son:

- Ensayo Visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas Magnéticas
- Radiografías
- Ultrasonido

4.8.1. Ensayo Visual:

La inspección visual es una secuencia de operaciones que se realizan a lo largo de todo el proceso productivo y que tiene como fin asegurar la calidad de las uniones soldadas.

Para facilitar la inspección visual, es necesario el empleo de ciertos instrumentos como pueden ser: cintas métricas, reglas, falsas escuadras, calibres, galgas, equipos de medición de temperaturas o presiones, dispositivos de iluminación y medios ópticos auxiliares (comprobadores de superficies, sistemas fotoeléctricos, proyectores de perfiles, lupas y endoscopios).

La inspección visual es una secuencia de operaciones que se realizan a lo largo de todo el proceso productivo, con el fin de:

1. Revisar las especificaciones de los procesos, procedimientos y consumibles.
2. Inspeccionar las superficies para detectar posibles defectos que interfieran en la operación de soldadura.
3. Verificar que los metales base y de aportación cumplen lo indicado en los planos y especificaciones de construcción.
4. Medir los materiales para verificar que las longitudes, diámetros anchos y espesores cumplen con los requisitos.

5. Verificar las secciones punteadas para soldadura comprobando que se cumplen las especificaciones relativas a preparación de bordes, dimensiones y acabados superficiales.

Las soldaduras deberán reunir los siguientes requisitos visuales después de la ejecución del cordón de soldadura:

1. La soldadura deberá estar libre de grietas.
2. Todas las grietas deben rellenarse a través de toda la sección de la soldadura.
3. La cara de la soldadura deberá estar al ras con la superficie del metal base, y el cordón deberá fusionarse suavemente con el metal base. El socavamiento no deberá exceder 1mm. El reforzamiento de la soldadura no deberá exceder de 3mm.
4. La raíz de la soldadura será inspeccionada y no deberá haber evidencia de grietas, fusión incompleta, o penetración inadecuada en la unión. Una raíz de superficie cóncava es permitida dentro de los límites normalizados, de manera que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor al del metal base.



Figura 42: Ensayo Visual – Verificación del espesor de soldadura

4.8.2. Líquidos Penetrantes:

El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie en estudio, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad. Después de un determinado tiempo se elimina el exceso de líquido y se aplica un

revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas.

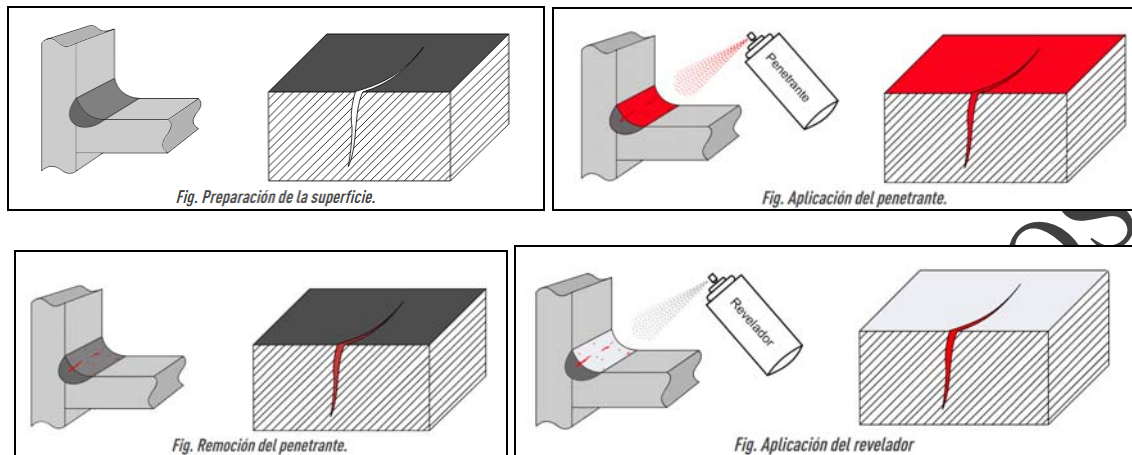


Figura 43: Aplicación de líquidos penetrantes a la soldadura



Figura 44: Defecto en la soldadura - Porosidad

4.8.3. Partículas Magnéticas:

La aplicación del ensayo de Partículas Magnéticas consiste básicamente en magnetizar la pieza a inspeccionar, aplicar las partículas magnéticas (polvo fino de limaduras de hierro) y evaluar las indicaciones producidas por la agrupación de las partículas en ciertos puntos. Este proceso varía según los materiales que se usen, los defectos a buscar y las condiciones físicas del objeto de inspección.

Los defectos que se pueden detectar son únicamente aquellos que están en la superficie o a poca profundidad. Cuanto menor sea el tamaño del defecto, menor será la profundidad a la que podrá ser detectado.

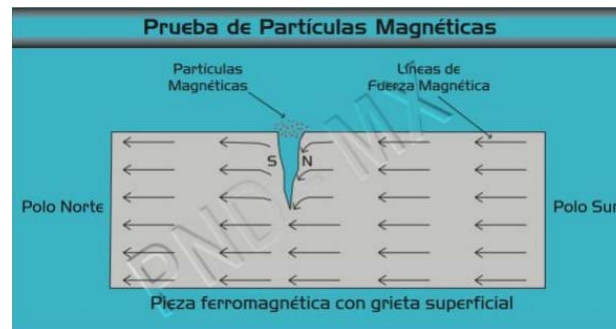


Figura 45: Aplicación del método de partículas magnéticas

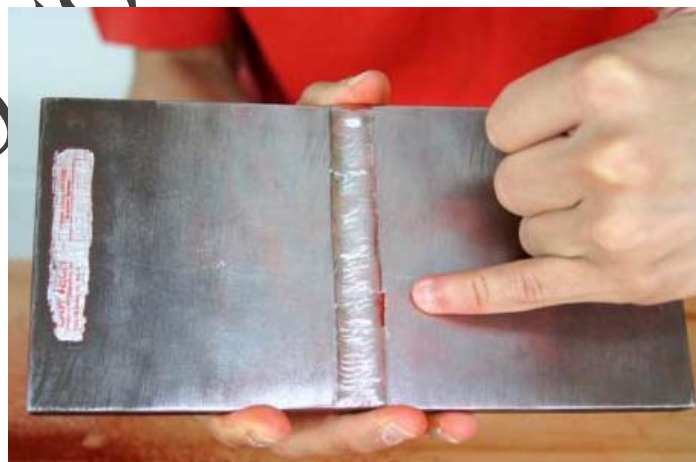


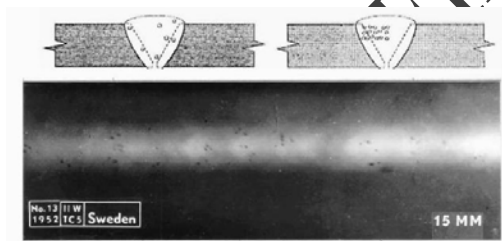
Figura 46: Discontinuidad en el cordón

Como se ve en la imagen, las limaduras de hierro magnetizadas dejan expuesta una discontinuidad del cordón sobre el borde.

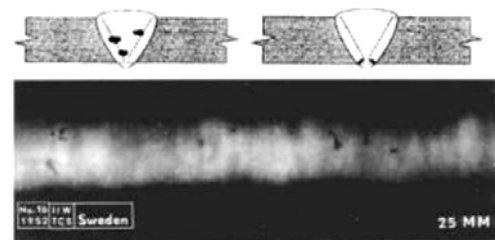
4.8.4. Radiografías:

La radiografía es un método de inspección no destructiva que se basa en la propiedad de los rayos X o Gamma de atravesar materiales opacos a la luz sin reflejarse ni refractarse, produciendo una impresión fotográfica de la energía radiante transmitida. Dichas radiaciones X o Gamma inciden sobre la pieza a inspeccionar, que absorberá una cantidad de energía radiante que depende de la densidad, la estructura y la composición del material. Estas variaciones de absorción son detectadas y registradas como se menciona anteriormente en una película radiográfica obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza.

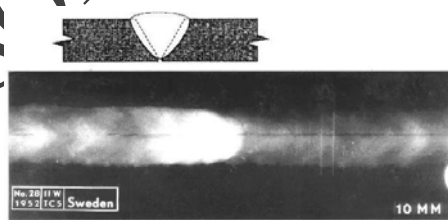
Los defectos de los materiales como grietas, bolsas, inclusiones, absorben las radiaciones en distinta proporción que el material base, de forma que estas diferencias generan detalles de contraste claro-oscuro



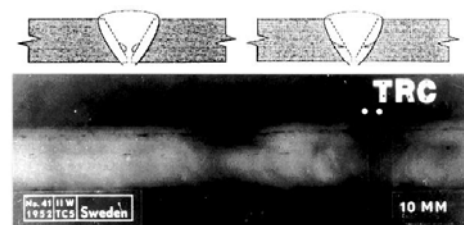
Defecto de porosidad presente



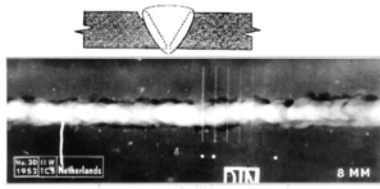
Defecto de escoria presente en la soldadura



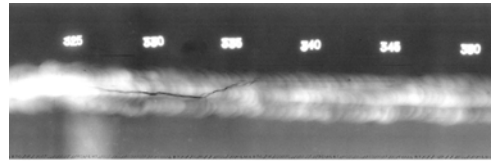
Defecto de falta de penetración



Defecto de falta de fusión de los materiales



Defecto de falta de mordedura

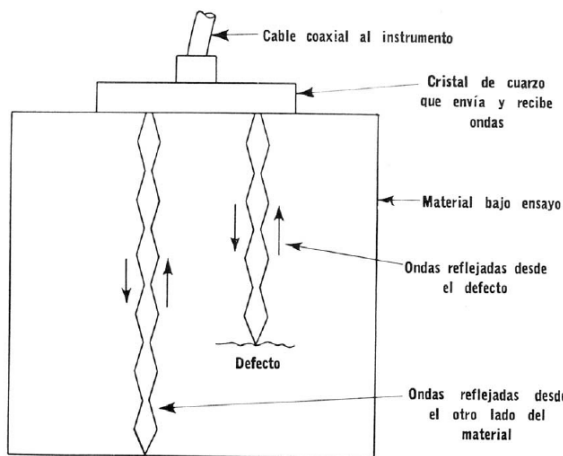


Fisura longitudinal en la soldadura

4.8.5. Ultrasonido:

El equipo utilizado para la aplicación de estas técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas sujetas a las leyes de reflexión al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Al ser captadas, son analizadas según el objetivo del equipamiento y con la determinación del tiempo transcurrido desde su emisión hasta su recepción, puede conocerse la distancia recorrida, al ser la velocidad previamente establecida.

Es un método en el cual un haz sónico de alta frecuencia (125 KHz a 20 MHz) es circularizado en el material a ser inspeccionado con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales (fisuras, inclusiones, etc.). El sonido que recorre el material es reflejado por las interfaces y es detectado y analizado para determinar la presencia y localización de discontinuidades.



4.9. Símbolos para uniones soldadas

La Figura 47 presenta los diversos símbolos de soldadura desarrollados por la American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura). Con este excelente sistema taquigráfico, se da toda la información necesaria con unas cuantas líneas y números, ocupando apenas un pequeño espacio en los planos y dibujos de ingeniería. Estos símbolos eliminan la necesidad de dibujos en las soldaduras y hacer largas notas descriptivas. Ciertamente es conveniente para los proyectistas y dibujantes utilizar este sistema estándar. Si la mayoría de las soldaduras indicadas en un dibujo son de las mismas dimensiones, puede ponerse una nota y omitir los símbolos, excepto en las soldaduras fuera de medida.











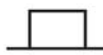
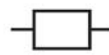





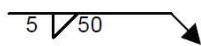
Símbolos básicos de soldadura									
Posterior	Filete	Tapón o ranura	Ranura o a tope						
			Cuadrado	V	Bisel	U	J	Ensanchamiento en V	Ensanchamiento de bisel
									
Símbolos suplementarios de soldadura									
Respaldo	Espaciado	Soldadura todo alrededor	Soldadura de campo	Contorno		Véase AWS A2.4 para otros símbolos básicos y complementarios de soldadura			
				Al ras	Convexo				
									
Posición estándar de los elementos de un símbolo de soldadura									
<p>Símbolo de acabado</p> <p>Símbolo de contorno</p> <p>Abertura en la raíz, profundidad del relleno en soldaduras de muesca y tapón</p> <p>Garganta efectiva</p> <p>Profundidad de la preparación o tamaño en pulgadas</p> <p>Línea de referencia</p> <p>Especificación, proceso u otras referencias</p> <p>Cola (se omite cuando no se usan referencias)</p> <p>Símbolo básico de soldadura o referencia de detalle</p>							<p>Ángulo de ranura o ángulo incluido o abocardar para soldaduras de tapón</p> <p>Longitud de la soldadura en pulgadas</p> <p>Paso (espaciamiento entre centros) de las soldaduras en pulgadas</p> <p>Símbolo de soldadura de campo</p> <p>Símbolo de soldadura todo alrededor</p> <p>La flecha conecta la línea de referencia al lado de la junta con flecha. Use un quiebre como en A o B para indicar que la flecha apunta al miembro ranurado en las juntas con bisel o con bisel y J.</p>		
<p>Nota:</p> <p>Tamaño, símbolo de la soldadura, longitud y espaciamiento deben leerse en ese orden de izquierda a derecha sobre la línea de referencia. Ni la orientación de la línea de referencia ni la posición de la flecha alteran esta regla.</p> <p>El lado perpendicular de los símbolos  debe estar a la izquierda.</p> <p>Las dimensiones de las soldaduras de filete deben mostrarse tanto en el lado con la flecha como en otro lado.</p> <p>Los símbolos se aplican entre cambios bruscos en la dirección de la soldadura, a menos que se muestre el símbolo de "todo alrededor" o se indique algo diferente.</p> <p>Estos símbolos no se refieren explícitamente al caso de ocurrencia frecuente en las estructuras, en donde material duplicado (por ejemplo, atiesadores) se localiza en el lado posterior de una placa de nudo o alma. Los fabricantes han adoptado la siguiente convención de estructuras: cuando en la lista de embarque del material en detalle se detecte la existencia de un miembro en el lado alejado, así como en el lado cercano, la soldadura mostrada para el claro cercano se duplicará para el lado alejado.</p>									

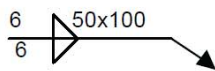
Figura 47: Tabla extraída del manual del AISC



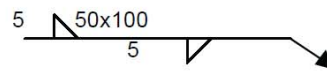
Algunos ejemplos son como se muestran a continuación:



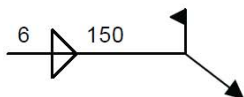
filete sobre lado cercano
(lado que apunta la flecha)
lado = 5 mm
longitud = 50 mm



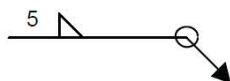
filete intermitente en cadena
lado = 6 mm
longitud = 50 mm
distancia entre centros = 100 mm



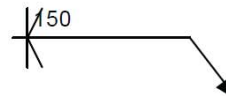
filete intermitente alternado
lado = 5 mm
longitud = 50 mm
distancia entre ejes = 100 mm



filete ambos lados
lado = 6 mm (ambos)
longitud = 150 mm
ejecución en obra



filete todo alrededor
lado = 5 mm



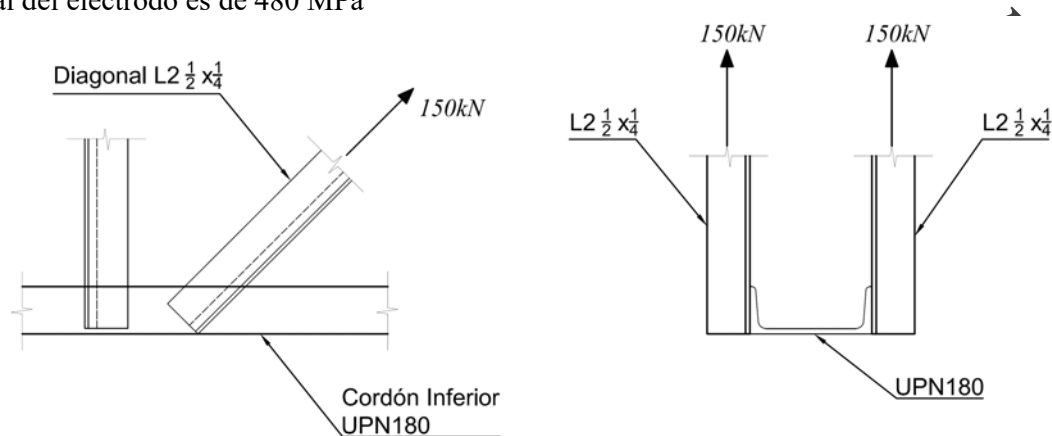
tope penetración total
doble bisel
longitud = 150 mm

SOLO CON FINES EDUCATIVOS

4.10. Ejemplo de aplicación:

4.10.1. Ejemplo 1:

Dimensionar la unión soldada de una diagonal compuesta por un perfil ángulo L 2 ½" x 1/4", el cual está unido al cordón inferior que lo conforma un perfil UPN 180. El perfil se encuentra solicitado a una carga de tracción de 150 kN. El acero utilizado es F-24. La resistencia del material del electrodo es de 480 MPa



Resolución:

El lado mínimo del filete depende del espesor del material de mayor espesor, que en este caso es el espesor del ala del perfil UPN 180, cuyo valor es de 11 mm. De la tabla J.2.4 el espesor mínimo es:

$$w_{\min} = 5 \text{ mm}$$

El lado máximo depende del espesor del elemento que se quiere unir, que en este caso, es el espesor del ala de la diagonal, $t = 6,4 \text{ mm}$. Como se observa supera los 6 mm, por lo que se debe descontar 2 mm.

$$w_{\max} = 6,4 \text{ mm} - 2 \text{ mm} = 4,2 \text{ mm}$$

Se adopta un lado de $w = 4 \text{ mm}$

Plantearémos cuatro configuraciones de cordones de soldadura, teniendo distintas hipótesis para cada una.

1º Caso: adoptamos filetes longitudinales de igual longitud, sin tener en cuenta la excentricidad de la carga

La resistencia de diseño es:

$$R_{d1} = \phi \cdot F_w \cdot A_w \cdot (10^{-1}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) \cdot (0,707 \cdot w) \cdot L_t \cdot (10^{-1})$$

La longitud total del cordón será:

$$L_t = \frac{F_u}{R_{d1}} = \frac{F_u}{0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) \cdot (0,707 \cdot w) \cdot (10^{-1})}$$

$$L_t = \frac{150kN}{0,60 \cdot (0,60 \cdot 480MPa) \cdot (0,707 \cdot 0,4cm) \cdot (10^{-1})} = 30,7cm$$

Dividimos en dos cordones de igual longitud

$$L_1 = \frac{L_t}{2} = \frac{30,7cm}{2} = 15,34cm \rightarrow \text{Adopto } L_1 = 16cm$$

2° Caso: adoptamos filetes longitudinales de igual longitud y un filete transversal, sin tener en cuenta la excentricidad de la carga

La longitud total es la misma del 1° caso $L_t = 30,7cm$

El filete transversal tiene una longitud igual al ancho del perfil que es 63,5mm y el mismo espesor que los demás cordones, por lo que la deberemos descontar de la longitud total, para obtener la longitud de los filetes longitudinales

$$2 \cdot L_1 = 30,7cm - 6,35cm = 24,35cm$$

Dividimos en dos cordones de igual longitud

$$L_1 = \frac{24,35cm}{2} = 12,175cm \rightarrow \text{Adopto } L_1 = 12,5cm$$

3° Caso: adoptamos filetes longitudinales de distintas longitudes, teniendo en cuenta la excentricidad de la carga

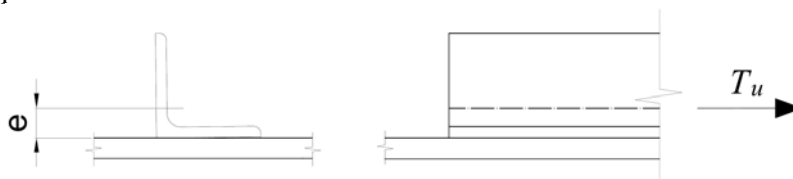
La longitud total es la misma del 1° caso $L_t = 30,7cm$

La longitud de cada filete será

$$L_1 = \left(\frac{b}{a+b} \right) \cdot L_t = \left(\frac{4,55cm}{1,8cm + 4,55cm} \right) \cdot 30,7cm = 21,99cm \rightarrow \text{Adopto } L_1 = 22cm$$

$$L_2 = \left(\frac{a}{a+b} \right) \cdot L_t = \left(\frac{1,8cm}{1,8cm + 4,55cm} \right) \cdot 30,7cm = 8,7cm \rightarrow \text{Adopto } L_2 = 9cm$$

4° Caso: adoptamos filetes longitudinales de distintas longitudes, teniendo en cuenta la excentricidad de la carga y a su vez la flexión que se genera en los mismos por la excentricidad de con respecto al plano de soldadura





Adoptamos las longitudes del tercer cao y verificamos sus tensiones

El cordón 1 estará sometido a un esfuerzo de corte P_1 y a un momento M_{u1} , cuyo valor es:

$$P_1 = \left(\frac{b}{a+b} \right) \cdot T_u = \left(\frac{4,55cm}{1,8cm + 4,55cm} \right) \cdot 150kN = 107,5kN$$

$$M_{u1} = P_1 \cdot e = 150kN \cdot 1,8cm = 193,5kNcm$$

El cordón 2 estará sometido a un esfuerzo de corte P_2 y a un momento M_{u2} , cuyo valor es:

$$P_2 = \left(\frac{a}{a+b} \right) \cdot T_u = \left(\frac{1,8cm}{1,8cm + 4,55cm} \right) \cdot 150kN = 42,5kN$$

$$M_{u2} = P_2 \cdot e = 42,5kN \cdot 1,8cm = 76,5kNcm$$

Se verifican a continuación las tensiones en ambos cordones

Tensiones en el cordón 1:

$$f_{v1} = \frac{P_{u1}}{A_{w1}} = \frac{107,5kN}{22cm \cdot 0,707 \cdot 0,4cm (10^{-1})} = 172,78MPa$$

$$f_{n1} = \frac{M_{u1}}{S_{w1}}$$

$$S_{w1} = \left(\frac{0,707 \cdot 0,4cm \cdot (22cm)^2}{6} \right) = 22,81cm^3$$

$$f_{n1} = \frac{M_{u1}}{S_{w1}} = \frac{193,5kNcm}{22,81cm^3 \cdot (10^{-1})} = 84,8MPa$$

La tensión principal es:

$$f_{c1} = \sqrt{f_{v1}^2 + f_{n1}^2} = \sqrt{172,78^2 + 84,8^2} = 192,46MPa$$

La tensión de diseño es:

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot 480MPa) = 172,8MPa$$

$$f_{c1} > f_{d1} \text{ (No verifica)}$$

Tensiones en el cordón 2:

$$f_{v2} = \frac{P_{u2}}{A_{w2}} = \frac{42,5kN}{9cm \cdot 0,707 \cdot 0,4cm (10^{-1})} = 167MPa$$

$$f_{n2} = \frac{M_{u2}}{S_{w2}}$$



$$S_{w2} = \left(\frac{0,707 \cdot 0,4cm \cdot (9cm)^2}{6} \right) = 3,81cm^3$$

$$f_{n2} = \frac{M_{u2}}{S_{w2}} = \frac{76,5kNcm}{3,81cm^3 \cdot (10^{-1})} = 200,7MPa$$

La tensión principal es:

$$f_{c2} = \sqrt{f_{v2}^2 + f_{n2}^2} = \sqrt{167^2 + 200,7^2} = 261MPa$$

La tensión de diseño es:

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot 480MPa) = 172,8MPa$$

$$f_{c2} > f_{d1} \text{ (No verifica)}$$

Por lo que debe redimensionarse los filetes. Aumentamos las longitudes de los cordones, cuyos nuevos valores será:

$$L_1 = 25cm \quad L_2 = 13cm$$

Tensiones en el cordón 1:

$$f_{v1} = \frac{P_{u1}}{A_{w1}} = \frac{107,5kN}{25cm \cdot 0,707 \cdot 0,4cm (10^{-1})} = 152MPa$$

$$f_{n1} = \frac{M_{u1}}{S_{w1}}$$

$$S_{w1} = \left(\frac{0,707 \cdot 0,4cm \cdot (25cm)^2}{6} \right) = 29,45cm^3$$

$$f_{n1} = \frac{M_{u1}}{S_{w1}} = \frac{193,5kNcm}{29,45cm^3 \cdot (10^{-1})} = 65,68MPa$$

La tensión principal es:

$$f_{c1} = \sqrt{f_{v1}^2 + f_{n1}^2} = \sqrt{152^2 + 65,68^2} = 165,58MPa$$

La tensión de diseño es:

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot 480MPa) = 172,8MPa$$

$$f_{c1} < f_{d1} \text{ (Verifica)}$$

Tensiones en el cordón 2:



$$f_{v2} = \frac{P_{u2}}{A_{w2}} = \frac{42,5kN}{12cm \cdot 0,707 \cdot 0,4cm(10^{-1})} = 125,23MPa$$

$$f_{n2} = \frac{M_{u2}}{S_{w2}}$$

$$S_{w2} = \left(\frac{0,707 \cdot 0,4cm \cdot (12cm)^2}{6} \right) = 6,78cm^3$$

$$f_{n2} = \frac{M_{u2}}{S_{w2}} = \frac{76,5kNcm}{6,78cm^3 \cdot (10^{-1})} = 112,7MPa$$

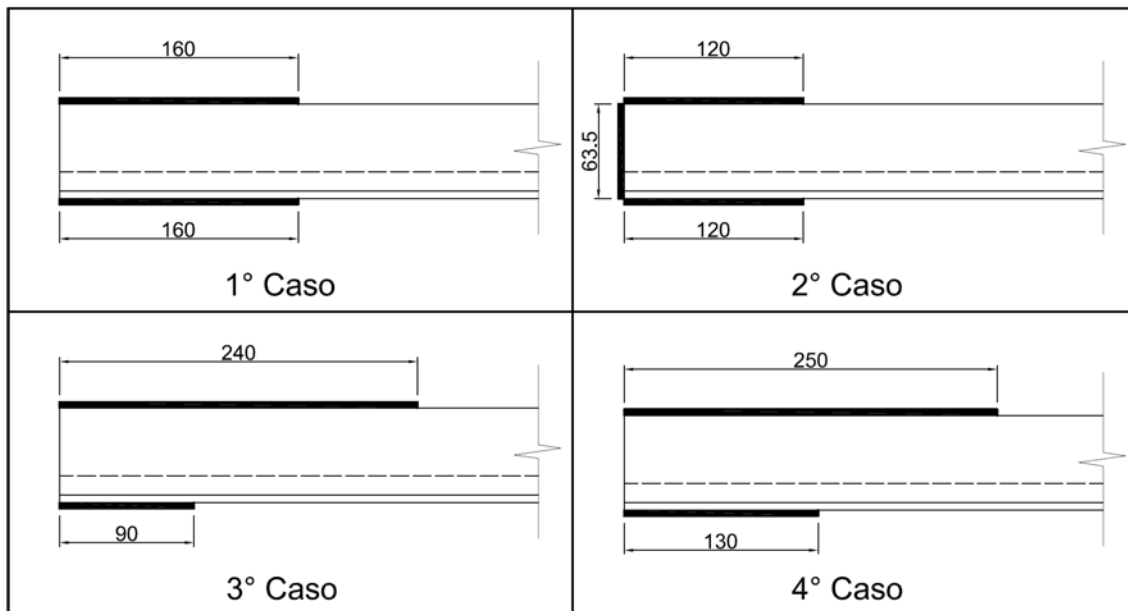
La tensión principal es:

$$f_{c2} = \sqrt{f_{v2}^2 + f_{n2}^2} = \sqrt{125,23^2 + 112,7^2} = 168,5MPa$$

La tensión de diseño es:

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot 480MPa) = 172,8MPa$$

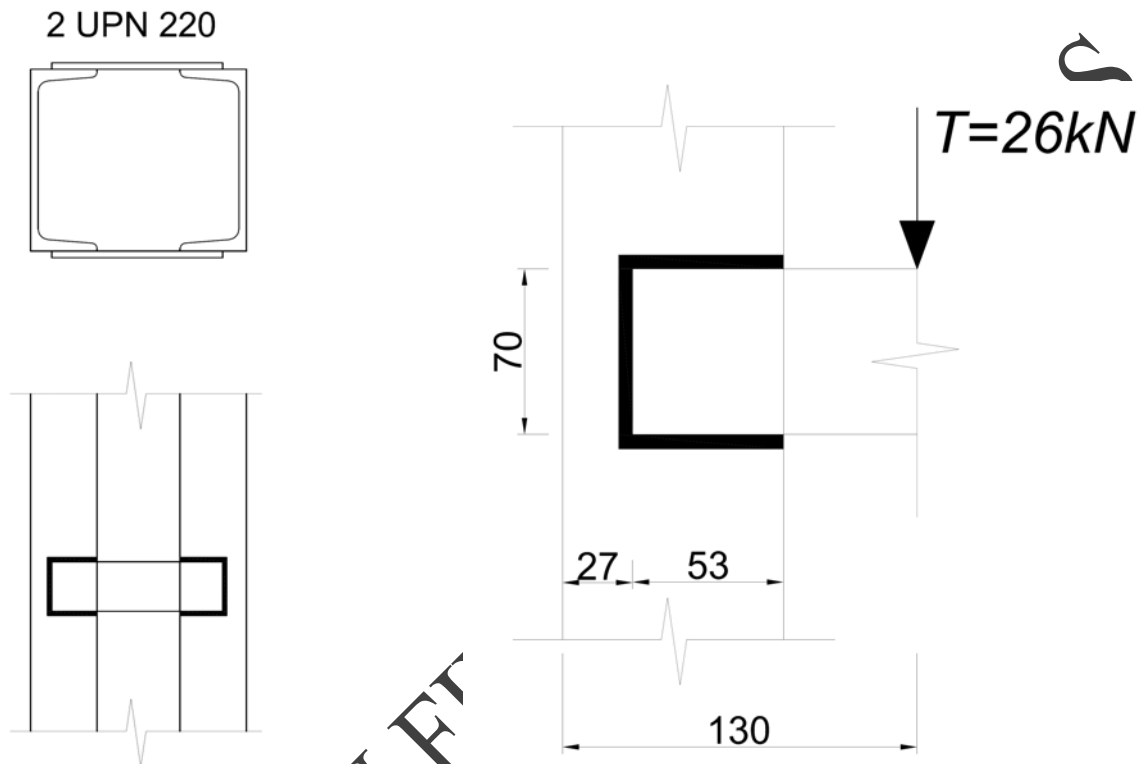
$$f_{c2} < f_{d1} \text{ (Verifica)}$$



Nota: Los casos expuestos son a modo de ejemplo, considerando las distintas hipótesis. Siempre que las cargas sean estática, como es el caso de estructuras de naves industriales y cubiertas, se puede aplicar el caso 1, que resulta mucho mas simplificado

4.10.2. Ejemplo 2:

Dimensionar la soldadura de una presilla de una columna conformada por dos perfiles UPN220. La altura de la presilla es de 70mm y tiene un espesor de 8mm. La carga a la cual esta solicitada es de 26 kN ubicada de acuerdo al grafico siguiente. El acero utilizado es F-24. La resistencia del material del electrodo es de 480 MPa.



Resolución:

El lado mínimo del filete depende del espesor del material de mayor espesor, que en este caso es el espesor del ala del perfil UPN 220, cuyo valor es de 11,5 mm. De la tabla J.2.4 el espesor mínimo es:

$$w_{\min} = 5mm$$

El lado máximo depende del espesor del elemento que se quiere unir, que en este caso, es el espesor del ala de la presilla, $t = 8mm$. Como se observa supera los 6mm, por lo que se debe descontar 2mm.

$$w_{\max} = 8mm - 2mm = 6mm$$

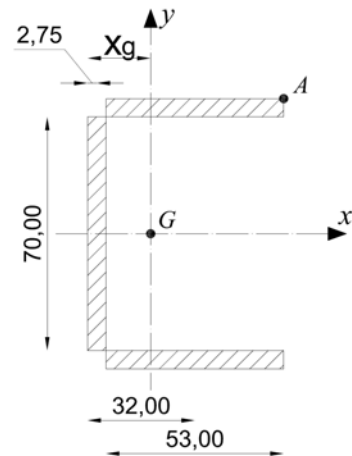
Se adopta un lado de $w = 5,5mm$

Para obtener las características de los cordones de soldaduras, primero, se debe conocer la posición del baricentro

Como el espesor es el mismo para todos los cordones, al tomar momentos estáticos, se hace en función de la longitud de los cordones. Entonces tomamos momento estático con respecto al borde izquierdo del cordón vertical

$$L_t \cdot x_g = 2 \cdot 53mm \cdot 32mm + 70mm \cdot 2,75mm$$

$$x_g = \frac{3584,5mm^2}{176mm} = 20,36mm = 2,36cm$$



El momento de inercia con respecto a los ejes X-X e Y-Y son:

Cuando se calcula I_x , no tienen en cuenta los momentos de inercia propios de los cordones horizontales, ya que no son significativos

$$I_x = \frac{0,55 \cdot 7^3}{12} + 2 \cdot \left[(5,3 \cdot 0,55) \cdot (3,5 + 0,55/2)^2 \right]$$

$$I_x = 98,80cm^4$$

Cuando se calcula I_y , no tienen en cuenta los momentos de inercia propios de los cordones verticales, ya que no son significativos

$$I_y = 2 \cdot \left[\frac{0,55 \cdot 5,3^3}{12} + (5,3 \cdot 0,55) \cdot (3,2 - 2,36)^2 \right] + \left[(7 \cdot 0,55) \cdot (2,36 - 0,55/2)^2 \right]$$

$$I_y = 44,80cm^4$$

El momento de inercia polar es:

$$I_p = I_x + I_y = 98,80cm^4 + 44,80cm^4 = 143,6cm^4$$

El momento torsor es:

$$M_T = 26kN \cdot 13cm = 338kNcm$$

Suponiendo una distribución uniforme la tensión debida al cortante en cualquier punto es:

$$f_v = \frac{T}{L_t \cdot 0,707 \cdot d \cdot (10^{-1})} = \frac{26kN}{17,6cm \cdot 0,707 \cdot 0,55cm \cdot (10^{-1})} = 38MPa$$

Las tensiones horizontal f_{Th} y vertical f_{Tv} debidas al momento torsor en un punto como el A son:

$$f_{Th} = \left(\frac{M_T}{I_p} \right) \cdot y_A = \left(\frac{338kNcm}{143,6cm} \right) \cdot (3,50cm + 0,55cm) \cdot \frac{1}{(10^{-1})} = 95,3MPa$$



$$f_{T_v} = \left(\frac{M_T}{I_p} \right) \cdot x_A = \left(\frac{338 \text{ kNcm}}{143,6 \text{ cm}^4} \right) \cdot (5,3 \text{ cm} + 0,55 \text{ cm} - 2,36 \text{ cm}) \cdot \frac{1}{(10^{-1})} = 82,14 \text{ MPa}$$

En un punto como el A, la tensión combinada será:

$$f_{res} = \sqrt{(f_v + f_{T_v})^2 + f_{T_h}^2}$$

$$f_{res} = \sqrt{(38 \text{ MPa} + 82,14 \text{ MPa})^2 + (95,3 \text{ MPa})^2} = 153,34 \text{ MPa}$$

La tensión de diseño es:

$$f_{d1} = 0,60 \cdot (0,60 \cdot F_{EXX}) = 0,60 \cdot (0,60 \cdot 480 \text{ MPa}) = 172,8 \text{ MPa}$$

$$f_{res} < f_{d1} \text{ (Verifica)}$$

SOLO CON FINES EDUCATIVOS