

## CAPITULO 4 - Barras Traccionadas.

### ESTADOS LÍMITES - RESISTENCIAS NOMINALES

Imaginemos una barra simple de acero sujeta a un esfuerzo de tracción. Bajo la acción de esa carga, la misma sufrirá un alargamiento inicial determinado por la ley de Hooke (Ver Figura 1):

$$\Delta L = \frac{T.L}{E.F}$$

Si la tensión normal aplicada a la barra, alcanza el valor de la tensión de fluencia del acero, el alargamiento específico estará dado por:

$$\varepsilon_y = \frac{F_y}{E}$$

A partir de este punto, la barra incrementará su longitud sin necesidad de aumentos posteriores de la fuerza aplicada hasta que se alcanza la zona de *endurecimiento* por el trabajo mecánico aplicado en frío. Para continuar con los incrementos de longitud en esa zona, será necesario a su vez, incrementar el esfuerzo de tracción aplicado hasta alcanzar la *tensión de rotura convencional*  $F_u$ .

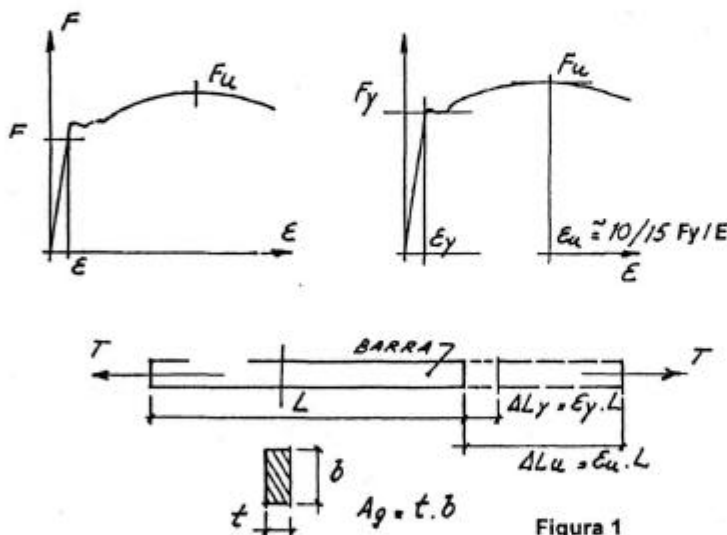


Figura 1

No existe ningún inconveniente, desde el punto de vista conceptual, de adoptar como *estado límite* de la barra, el valor  $T_n$ , que resulta de multiplicar el área bruta (gross)  $A_g$  de la sección por la tensión de rotura  $F_u$ :

$$T_n = A_g \cdot F_u$$

Como se puede observar en el gráfico de tensiones deformaciones (  $F, \varepsilon$  ), los alargamientos específicos correspondientes a  $F_u$  pueden ser del orden de 10 a 15 veces al que le

corresponde a la iniciación de la fluencia  $\varepsilon_y$ . En estas condiciones, los alargamientos de la barra  $\Delta L_u$ , serían excesivos y probablemente afectarían el comportamiento de la estructura en su conjunto. (Afectando los estados límites de servicio, amplificando los efectos de segundo orden, etc.).

Por ese motivo, se fija como *primer estado límite* o *Resistencia Nominal por fluencia* al valor de:

$$T_n = A_g \cdot F_y$$

a la cual le corresponde un alargamiento  $\Delta L_y \ll \Delta L_u$

Supongamos ahora que, para vincular la barra al resto de una estructura, agujereamos sus extremos con agujeros de diámetro  $d_1$ . Debido al conocido fenómeno de concentración de tensiones, en el borde del agujero aparecerá un pico de tensión (debido a la *entalla*) que disminuirá a medida que nos alejamos del mismo (Ver Figura 2).

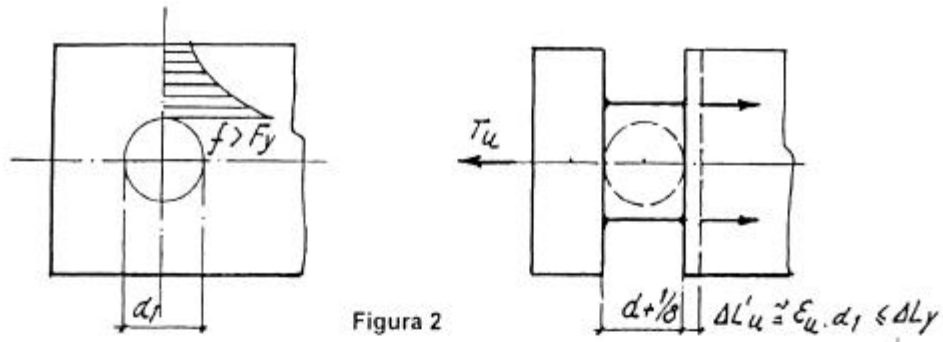


Figura 2

El valor de la tensión en el borde del agujero dependerá básicamente del diámetro del mismo, creciendo en forma inversamente proporcional a su diámetro. Debido a las deformaciones específicas en el entorno del agujero, el pico de tensiones puede alcanzar tensiones cuyos valores son considerablemente mayores a los de fluencia del material e incluso próximos a los de rotura.

Es posible entonces - merced a la plastificación total de la *sección neta*  $A_n$  que queda disponible por la presencia del agujero - que se alcance en la misma el valor de la tensión de rotura  $F_u$ . Pero, en este caso, de acuerdo al modelo ilustrado, esta tensión podrá alcanzarse sin excesivos alargamientos globales de la barra; sólo existirán deformaciones específicas importantes en el *entorno* del agujero. Esta consideración permite establecer un segundo estado límite, la *Resistencia Nominal por rotura*:

$$T_n = A_n \cdot F_u$$

#### Procedimiento de la LRFD

Según la Especificación LRFD y de acuerdo a lo explicado más arriba, la resistencia nominal de una barra traccionada puede estar gobernada por uno de los siguientes "estados límites de resistencia"

- Cuando se alcanza la fluencia en la sección bruta de la barra
- Por rotura en el área neta de la barra en la zona de la unión (a través de los agujeros).

Cuando el estado límite es el de fluencia de la sección bruta de la barra, la resistencia nominal se puede expresar como:

$$P_n = F_y \cdot A_g$$

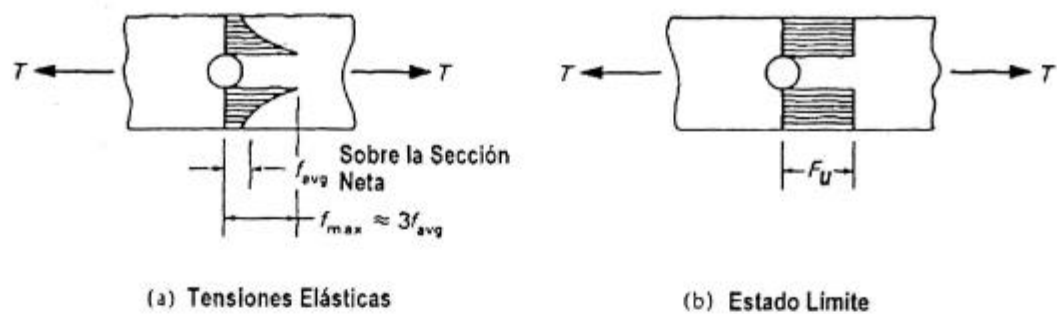
Siendo:

- $F_y$ : la tensión de fluencia mínima especificada  
 $A_g$ : el área bruta de la barra.

En las barras traccionadas con agujeros (para bulones o remaches), el área reducida por la presencia de los mismos se denomina *área neta*. La presencia de los agujeros origina una distribución de tensiones no uniforme "en servicio" como la indicada en la Figura 3a.

No obstante, a medida que cada fibra alcanza la deformación específica de fluencia  $\epsilon_y = F_y / E$ , su tensión se transforma en  $F_y$  y la deformación continúa incrementándose en la medida en que también se incrementa la carga, hasta que todas las fibras alcanzan o exceden la deformación específica  $\epsilon_y$  (Figura 3b).

A causa del incremento de resistencia que se tiene en los materiales dúctiles, conocido como "endurecimiento", la resistencia alcanza un valor  $F_u > F_y$



**Figura 3. Distribución de Tensiones en presencia de Agujeros**

En consecuencia el otro estado límite que analiza la norma es el de rotura en el área neta, con una resistencia nominal.

$$P_n = F_u A_e$$

Siendo:

- $F_u$ : La resistencia a tracción especificada
- $A_e$ :  $U \cdot A_n$ , es el área efectiva
- $A_n$ : el área neta
- $U$ : un factor de eficiencia

Debe tenerse en cuenta que para alcanzar la tensión  $F_u$  deben desarrollarse deformaciones específicas  $\varepsilon$  grandes.

La norma permite que estas deformaciones se produzcan en secciones determinadas, como son las que tienen agujeros, y no en toda la longitud de la barra. De otra forma, como se dijo antes, se producirían deformaciones totales de la barra excesivas para la función que cumple en la estructura.

### Area neta

En la expresión anterior,  $A_n$  representa la sección neta de la barra para el caso de agujeros alineados en dirección perpendicular al esfuerzo, la cual puede calcularse como:

$$A_n = A_g - n \cdot d_f \cdot t$$

- $A_n$ : es la sección neta de la barra.
- $A_g$ : es la sección bruta.
- $n$ : número de agujeros alineados sobre una misma sección transversal en dirección perpendicular al eje de la barra.
- $d_f$ : diámetro del agujero.
- $t$ : espesor del miembro o chapa traccionada en el entorno del agujero.

El diámetro del agujero  $d_f$  se adopta, en general, mayor al diámetro del tornillo que alojará. El huelgo entre agujero y tornillo ha sido fijado por las *Especificaciones* en 1/16" (1.6 mm).

A consecuencia de que el agujereado de las barras se realiza por lo general mediante el proceso de *punzonado*, para el cálculo de la sección neta  $A_n$  se adopta un diámetro ficticio del agujero, mayor a  $d_f$ , en 1/16". De esta manera, se tiene en cuenta el hecho de que durante el punzonado quedan dañados, destruidos o endurecidos y con pequeñas fisuras, los bordes del agujero.

La sección neta será, en definitiva:

$$A_n = A_g - n \cdot (d + 0.32) \cdot t \quad (\text{en cm})$$

en la que  $d$  es el diámetro del tornillo.

Analizaremos el caso de agujeros *no alineados* o ubicados en *tresbolillo*, la cual es una disposición utilizada para obtener una sección neta mayor o menos debilitada (Ver Figura 4 derecha) En esta variante deben ser analizadas dos posibles secciones de falla.

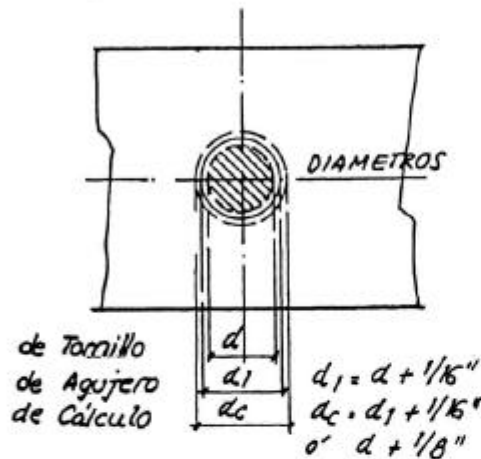
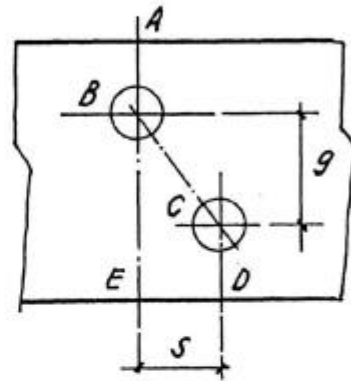


Figura 4



Para el primer caso, según la trayectoria ABE, la sección neta es la que resulta de restar a la sección bruta  $A_g$  solo un agujero. Para la trayectoria ABCD, a la sección bruta correspondiente se le deben deducir dos agujeros. Pero, para esta segunda alternativa, el criterio así aplicado no es correcto, está de lado de la inseguridad. La existencia, en el tramo BC de tensiones normales y de corte, determinan una resistencia que estaría comprendida entre la correspondiente al tramo ABE y el ABCD (considerada esta última como una sección bruta totalmente eficaz).

Del resultado de algunas investigaciones (Cochrane), la *Especificación* adopta, para agujeros dispuestos en zigzag, un término:

$$\frac{s^2}{4 \cdot g}$$

que debe ser adicionado en el cálculo de la sección neta, a cada segmento inclinado y en el cual:

- $s$ : es la distancia entre dos agujeros consecutivos medida en dirección longitudinal.
- $g$ : es la distancia o gramil entre los mismos agujeros, medida en dirección transversal.

La sección neta  $A_n$  queda así, igual a:

$$A_n = A_g - \left[ n \cdot (d + 0.32) - \sum \frac{s_i^2}{4 \cdot g_i} \right] \cdot t \quad (\text{en cm})$$

el subíndice  $i$  identifica cada uno de los segmentos inclinados ubicados en el *camino* o trayectoria de falla elegida para su verificación.

La especificación fija las siguientes características de los agujeros en función del diámetro del bulón:

Además de los agujeros estándar que son  $1/16"$  de mayor diámetro que los correspondientes tornillos, hay tres tipos de agujeros: los *agrandados*, los de *ranura corta* y de *ranura larga*.

Los agujeros *agrandados* pueden usarse en algunas o todas las chapas de una unión de deslizamiento crítico. No deben usarse en una unión que trabaje por aplastamiento.

Los agujeros de *ranura corta* pueden usarse en uniones de deslizamiento crítico o en aquellas que trabajan por aplastamiento. En el primer caso se lo puede hacer independientemente de la dirección del esfuerzo. En el segundo, el eje más largo del agujero debe ser perpendicular a la dirección de la carga.

Los agujeros de *ranura larga* pueden usarse en cualquiera, pero en sólo una de las partes unidas, tanto en uniones de deslizamiento crítico como en las de aplastamiento. En las primeras pueden usarse en cualquier dirección; pero en las de aplastamiento, las cargas deben ser normales al eje más largo del agujero. Para calcular el área neta en tracción, el ancho del agujero debe tomarse como  $1/16"$  mayor que la dimensión nominal del agujero en la dirección perpendicular al esfuerzo aplicado (para corte, en cambio, el ancho se considerará igual que la dimensión nominal del agujero).

En la Figura 5a el área neta debe ser calculada restando del área bruta el área de los dos agujeros que se encuentran sobre la "línea de falla" más:  $\frac{1}{16} \cdot 2.t$ .

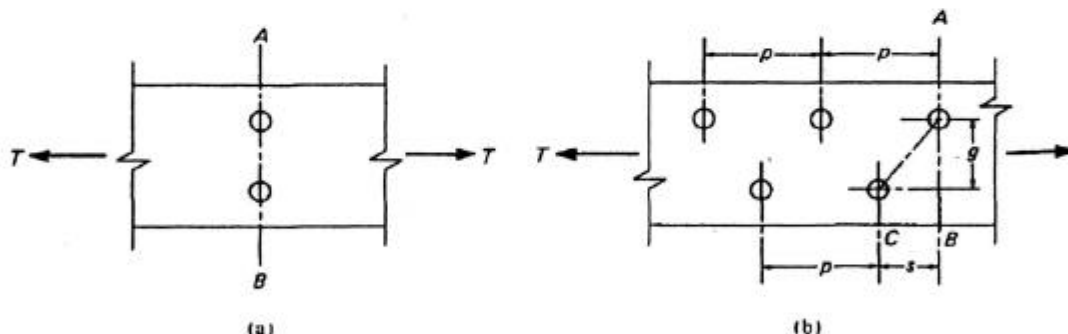


Figura 5. Probables líneas de falla

En la Figura 5b la "línea de falla" puede ser la A - B (con un agujero) o la línea quebrada A - C (con dos agujeros). Un cálculo exacto de la resistencia según la línea A - C es complejo, habiendo en la diagonal una combinación de tensiones normales ( $\sigma$ ) y tangenciales ( $\tau$ ). La norma adopta un método que consiste en considerar el ancho total del elemento, sin tomar en cuenta la línea a lo largo de la cual puede ocurrir la falla, restar el diámetro de los agujeros a lo largo de la sección en zig-zag considerada y sumar por cada diagonal una cantidad dada por la expresión  $s^2 / 4g$ .

Ancho neto en A - B = Ancho (A - B) - (diámetro del agujero +  $1/16"$ )

Ancho neto en A - C = Ancho (A - B) - 2.(diámetro del agujero +  $1/16"$ ) +  $s^2 / 4g$

El área neta mínima determinante se calcula multiplicando la menor de estas longitudes por el espesor.

### Dimensiones nominales de agujeros

Dimensiones de los agujeros				
Diámetro del Tornillo	Estándar (diámetro)	Agrandados (diámetro)	De ranura corta (ancho x longitud)	De ranura larga (ancho x longitud)
$\frac{1}{2}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{16} \times \frac{11}{16}$	$\frac{9}{16} \times 1\frac{1}{4}$
$\frac{5}{8}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{11}{16} \times \frac{7}{8}$	$\frac{11}{16} \times 1\frac{9}{16}$
$\frac{3}{4}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{15}{16}$	$\frac{13}{16} \times 1$	$\frac{13}{16} \times 1\frac{7}{8}$
$\frac{7}{8}$	$\frac{15}{16}$	$1\frac{1}{16}$	$\frac{15}{16} \times 1\frac{1}{8}$	$\frac{15}{16} \times 2\frac{3}{16}$
1	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{16} \times 1\frac{5}{16}$	$1\frac{1}{16} \times 2\frac{1}{2}$
$\geq 1\frac{1}{8}$	$d + \frac{1}{16}$	$d + \frac{5}{16}$	$\left(d + \frac{1}{16}\right) \times \left(d + \frac{3}{8}\right)$	$\left(d + \frac{1}{16}\right) \times (2,5 \times d)$

Ejemplos:

#### Número 1

Determinar el área neta crítica de la chapa indicada en la Figura 6, de  $\frac{1}{2}$ " de espesor:

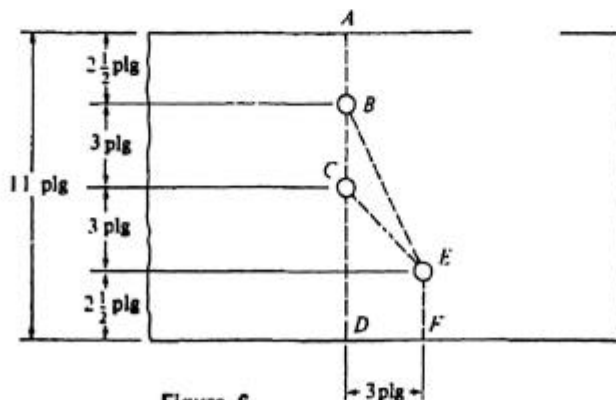


Figura 6

se debe descontar en cada caso  $13/16" + 1/16" = 7/8"$

$$ABCD = 11 - (2) \left( \frac{7}{8} \right) = 9,25"$$

$$ABCEF = 11 - (3) \cdot \left(\frac{7}{8}\right) + \frac{(3)^2}{4.3} = 9,125"$$

$$ABEF = 11 - (2) \cdot \left(\frac{7}{8}\right) + \frac{3^2}{4.6} = 9,625"$$

$$A_n = 9,125 \cdot 1/2 = 4,56 \text{ plg}^2$$

### Número 2

Determinar el área neta del perfil mostrado en la Figura 7, considerando tornillos de:  $d_t = 1"$

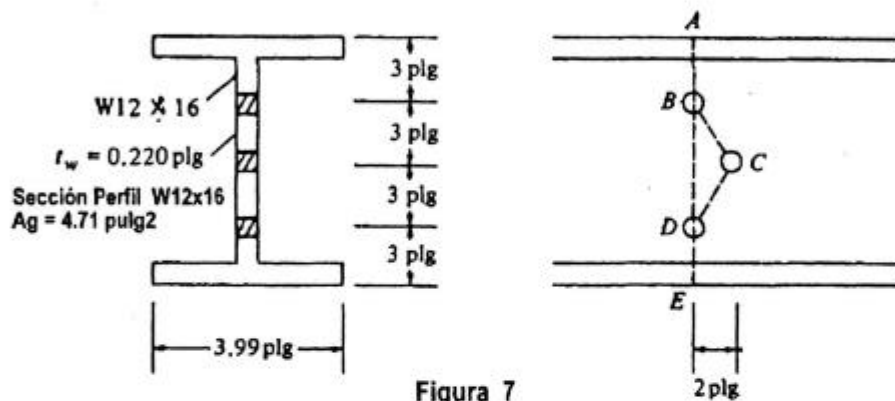


Figura 7

$$ABDE = 4,71 - 2 \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{8}\right) \cdot (0,220) = 4,21 \text{ plg}^2$$

$$ABCDE = 4,71 - 3 \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{8}\right) \cdot (0,220) + 2 \cdot \frac{2^2}{4.3} \cdot (0,220) = 4,11 \text{ plg}^2$$

### Número 3

Determinar el área neta a lo largo de la línea ABCDEF para la Sección  $U 15 \times 33,9$ . En esta sección, si la línea en zigzag involucra agujeros en el ala y en el alma, el espesor cambia en la unión. Se supone la sección  $U$  aplanada, formando una sola chapa, con espesor variable, como se muestra en la figura 8 b y 8 c. El área neta a lo largo de la trayectoria ABCDEF se calcula restando del área bruta de la sección, el área de los agujeros (teniendo en cuenta la variación de los espesores) y sumando  $s^2/4g$  para cada segmento diagonal multiplicado por el espesor correspondiente. Para los segmentos  $BC$  y  $DE$ , que pasan por el ala y alma, se ha multiplicado por el promedio de los espesores.

Area neta  $ABCDEF$

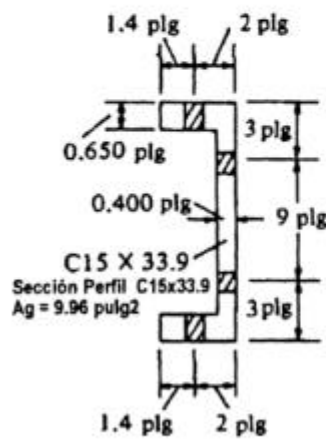
$$9,96 - 2 \cdot \left(\frac{7}{8}\right) \cdot 0,650 - 2 \cdot \left(\frac{7}{8}\right) \cdot 0,400 + \frac{3^2}{4.9} \cdot (0,400) + 2 \cdot \frac{3^2}{4.4,60} \cdot \left(\frac{0,650 + 0,400}{2}\right) = 8,736 \text{ plg}^2$$



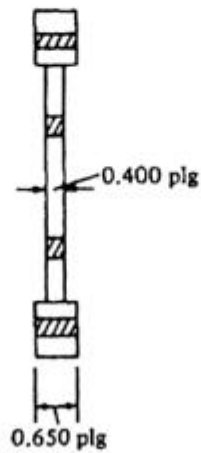
Area bruta

$$U 15 \times 33,9 \Rightarrow A_g = 9,96 \text{ plg}^2$$

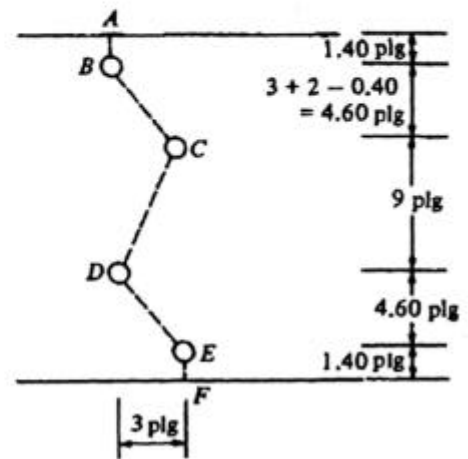
Los agujeros son para tornillos  $\frac{3}{4}"$



(a)



(b)



(c)

Figura 8