

## Barras prismáticas submetidas à força axial de tração

Este capítulo apresenta o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de tração pura, incluindo barras ligadas por pinos e barras redondas com extremidades rosqueadas, de acordo com as premissas estabelecidas no capítulo anterior.

### 4.1 Condição de segurança

A condição de segurança para barras metálicas tracionadas, em função do estado limite último, é definida por:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (4.1)$$

na qual:

$N_{t,Sd}$  é a força axial de tração solicitante de cálculo, obtida pelo envoltória do estado limite último em sua combinação de ações mais desfavorável, sejam elas, normal, especial ou excepcional;

$N_{t,Rd}$  é a força axial de tração resistente de cálculo, determinada de acordo com as seções a seguir.

### 4.2 Limitação do índice de esbeltez

Antes de iniciar o cálculo propriamente dito da força axial resistente de cálculo, deve-se verificar se as barras atendem ao requisito mínimo quanto ao índice de esbeltez.

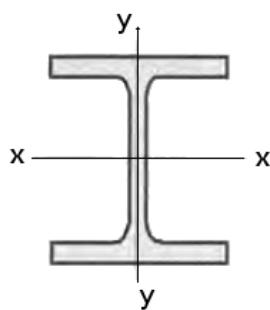


Figura 4.1: Eixos na seção transversal, o eixo  $z$  é sempre definido como no sentido longitudinal da barra (saindo do plano da figura).

Essa limitação não é uma restrição, porém recomenda-se que o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente ( $L_b/r$ ), excetuando-se tirantes de barras redondas pré-tencionadas ou outras barras que tenham sido montadas com pretensão, não supere 300. Essa verificação deve ser feita para ambas as direções cartesianas da seção transversal, ou seja:

$$\frac{L_{b,x}}{r_y} \leq 300 \quad (4.2)$$

$$\frac{L_{b,y}}{r_x} \leq 300 \quad (4.3)$$

sendo:

$L_{b,x}$  o comprimento destravado na direção x (medido no plano X-Z);

$L_{b,y}$  o comprimento destravado na direção y (medido no plano Y-Z);

$r_x$  o raio de giração em torno de x (sem usar a regra da mão direita, na direção y);

$r_y$  o raio de giração em torno de y (sem usar a regra da mão direita, na direção x);

Repetindo o disposto no capítulo anterior, observe que pela definição<sup>1</sup> o raio de giração é calculado em torno de um eixo, ou seja,  $r_x$  é em torno de x, formato presente em muitas tabelas de perfis de diversos fabricantes. Define-se comprimento destravado,  $L_{b,x}$ , de uma barra como a distância entre dois pontos de contenção lateral ou entre um ponto de contenção lateral e uma extremidade (ligação) e que, portanto, deve ser medido na direção do eixo da contenção lateral ou ligação de extremidade. Resumindo, se o comprimento destravado é medido na direção x, plano X-Z,  $L_{b,x}$ , o raio de giração deve ser tomado em torno do eixo y,  $r_y$ .

Um ponto de contenção lateral pode ser uma união de um elemento contraventado devidamente ligado a uma subestrutura de contraventamento.

Recomenda-se que perfis ou chapas, separados uns dos outros por uma distância igual à espessura de chapas espaçadoras, formando assim uma seção transversal composta, sejam interligados através dessas chapas espaçadoras de modo que o maior índice de esbeltez de qualquer perfil ou chapa, entre essas ligações, não ultrapasse 300. A figura 4.2 exemplifica, sendo  $\ell$  a distância entre essas chapas espaçadoras e  $r$  o mínimo raio de giração da seção transversal dentre os perfis que formam a composição, de maneira a relação  $\ell/r$  sempre resulte em um valor máximo possível, ou seja, máximo  $\ell$  admissível e mínimo  $r$  existente.

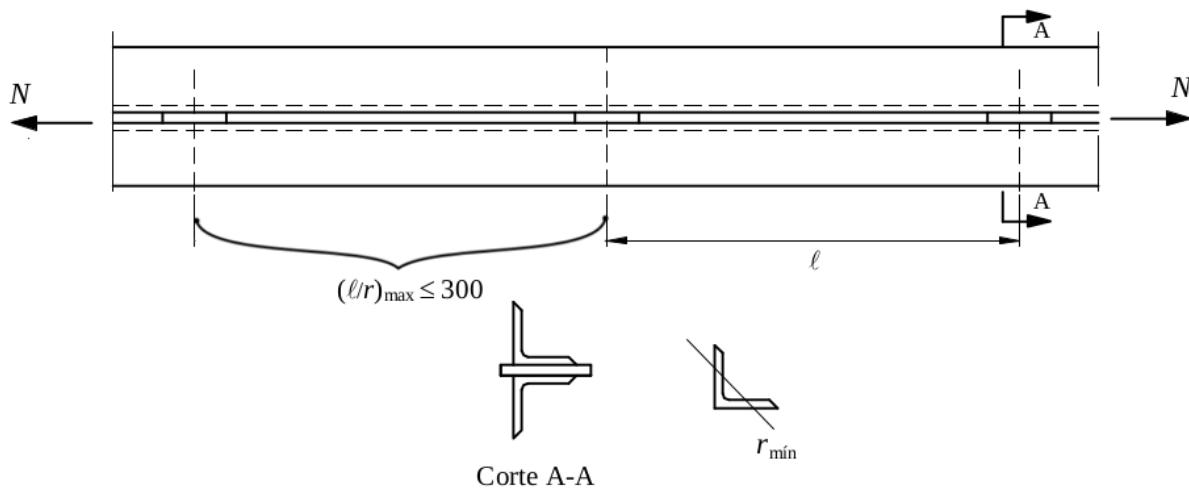


Figura 4.2: Barra composta tracionada. Exemplo com cantoneiras, porém as definições se aplicam a quaisquer perfis que formem barras compostas tracionadas.

No caso dessas recomendações não serem adotadas, o responsável técnico pelo projeto estrutural deve estabelecer novos limites para garantir que as barras tracionadas tenham um comportamento adequado em condições de serviço.

<sup>1</sup>O raio de giração é definido como  $r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$  ou  $r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$ , sendo  $A_g$  a área bruta da seção transversal e  $I_x$  ou  $I_y$  as inércias.

## 4.3 Força axial de tração resistente de cálculo - $N_{t,Rd}$

A força axial de tração resistente de cálculo,  $N_{t,Rd}$ , a ser usada no dimensionamento, exceto para barras redondas com extremidades rosqueadas e barras ligadas por pinos, é o **menor dos valores obtidos**, considerando-se os seguintes estados limites últimos:

### Escoamento da seção bruta (ESB)

$$N_{t,Rd}^{ESB} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4.4)$$

### Ruptura da seção líquida (RSL)

$$N_{t,Rd}^{RSL} = \frac{C_t A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (4.5)$$

### Ruptura da seção líquida (RSLC) por cisalhamento - Pinos

Essa verificação é somente aplicada a barras de quaisquer seções transversais com ligações nas extremidades feitas através de pinos.

$$N_{t,Rd}^{RSLC} = \frac{0,6 A_{sf} f_u}{\gamma_{a2}} \quad (4.6)$$

onde:

$A_g$  é a área bruta da seção transversal;

$A_e$  é a área líquida efetiva da seção transversal, determinada nas regiões de furação, conforme 4.3.1;

$A_{sf}$  é a área de cisalhamento da chapa ligada por pino, conforme 4.3.2;

$C_t$  é o coeficiente de redução da área nominal, conforme 4.3.3;

$f_y$  é a tensão de resistência ao escoamento do aço;

$f_u$  é a tensão de resistência a ruptura do aço ou resistência última.

No caso de ligações por pinos são aplicados os três estados limites últimos apresentados. No caso de barras com extremidades com ligações parafusadas ou ligadas por roscas ou que foram alvo de aberturas, aplicam-se os estados limites ESB e RSL. No caso de barras com ligações nas extremidades por solda e sem nenhum tipo de abertura ou corte no perfil, aplica-se apenas o estado limite ESB.

#### 4.3.1 Área líquida efetiva - $A_e$

A área líquida efetiva,  $A_e$ , é calculada em regiões com furação na peça metálica tracionada, para ligação ou qualquer outra finalidade. Em regiões onde não existam furos, a área líquida efetiva é igual a área bruta do perfil.

No caso de barras ligadas por parafusos ou com aberturas a área líquida efetiva,  $A_e$ , de uma barra é o produto do comprimento da linha de ruptura crítica,  $l_{r,cr}$ , pela espessura do perfil,  $t$ .

$$A_e = l_{r,cr} t \quad (4.7)$$

A linha de ruptura crítica,  $l_{r,cr}$ , é a que fornece o menor comprimento dentre todas as possibilidades de linhas de ruptura.

No caso de barras com seções tubulares ou seções circulares maciças, com extremidades rosqueadas, a área líquida efetiva corresponde a 75% da área bruta, ou seja,  $A_e = 0,75 A_g$ .

No caso de barras com extremidades em chapas ligadas por pinos, a área líquida efetiva vale:

$$A_e = 2tb_{ef} \quad (4.8)$$

na qual:

$t$  é a espessura da chapa de ligação;

$b_{ef}$  é largura efetiva da chapa de ligação, dada pelo menor dos dois valores:

$$b_{ef} = \min \left\{ \frac{2t + 16mm}{2}, b - d_h \right\} \quad (4.9)$$

sendo  $b$  a largura da chapa de ligação e  $d_h$  o diâmetro do furo do pino.

### Linhas de ruptura

As linhas de ruptura são regiões onde supostamente ocorra o colapso à tração da seção transversal. Algumas características delas são:

- a) Iniciam em uma das extremidades da seção transversal e se dirigem a outra extremidade;
- b) Passam obrigatoriamente pela furação, caso exista;
- c) A linha de ruptura crítica,  $l_{r,cr}$ , é a que produz o menor comprimento possível.

As linhas de ruptura são sempre traçadas na região interna da ligação, figura 4.3. Uma linha de ruptura nunca deve estar "atrás" de um furo (considerando a frente da ligação voltada para a solicitação ou reação), como a linha de ruptura 3, da figura 4.3, em relação a reação. A linha 3 não é uma linha de ruptura, assim como a linha 4, considerando a frente voltada para a solicitação.

A consideração de uma linha de ruptura "atrás" de um furo seria como levar em conta que algum parafuso foi eliminado da ligação, o que não é correto, pois a verificação de ruptura é feita para a barra e não para a ligação a qual deve ser considerada íntegra.

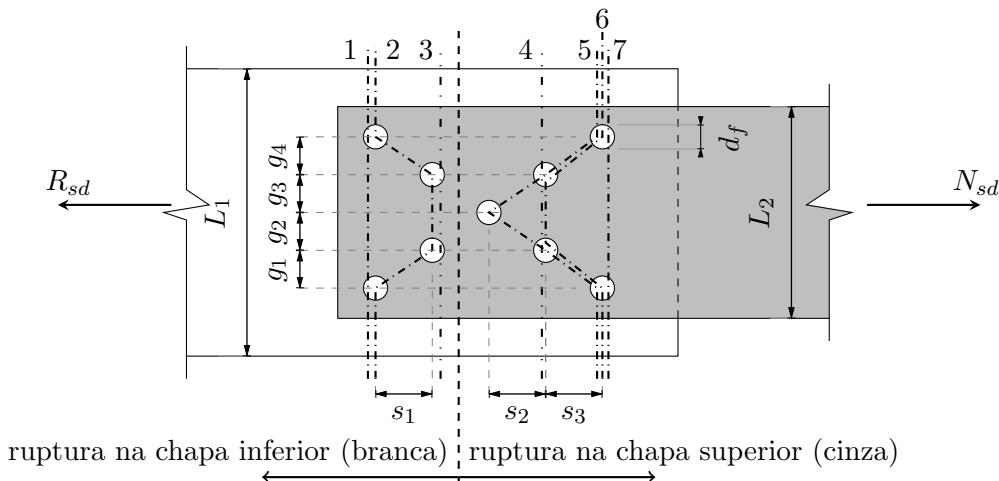


Figura 4.3: Possíveis Linhas de Ruptura (traço ponto), linhas 1, 2, 5, 6 e 7. Não são linhas de ruptura (traço dois pontos), linhas 3 e 4, pois possuem parafusos entre a linha e a direção da força,  $N_{sd}$  ou reação,  $R_{sd}$ .

O cálculo do comprimento das linhas de ruptura  $l_r$  é feito da seguinte maneira:

- a) Caso as linhas de ruptura sejam verticais (como o caso da linha 7 da figura 4.3):

$$l_{ri} = L_c - n.d_{ef} \quad (4.10)$$

- b) Caso as linhas de ruptura possuam trechos diagonais (como o caso da linha 2 da figura 4.3):

$$l_{ri} = L_c - n.d_{ef} + \sum_{i=1}^m d'_i \quad (4.11)$$

sendo:

*i* a linha de ruptura que se está calculando o comprimento;

$L_c$  a largura total da região ligada ou largura bruta para a chapa *c*, que no caso de figura é  $L_1$  para as linhas de ruptura 1 e 2, e  $L_2$  para as linhas de ruptura 7, 6 e 5;

*n* a quantidade de furos que a linha de ruptura intercepta;

*m* a quantidade de diagonais na linha de ruptura;

$d_{ef}$  a largura efetiva do furo, conforme a seguir.

$d'_i$  é o comprimento da diagonal entre os centros dos furos adjacentes sem alinhamento horizontal ou vertical, e pode ser obtido aproximadamente por  $\frac{s_i^2}{4g_i}$ , sendo *s* a distância horizontal entre os centros dos furos adjacentes em diagonal e *g* a vertical (*s* e *g* podem ter valores iguais ou diferentes). A unidade de  $d'$  é a mesma de *s* e *g*.

### Largura Efetiva do Furo

Em ligações parafusadas, a largura efetiva do furo  $d_{fe}$  deve ser adotada para efeitos de cálculo com 2,0 mm a mais que o diâmetro do furo  $d_f$  (ver tabela 10.1), ou seja:

$$d_{fe} = d_f + 2,0\text{mm} \quad (4.12)$$

com  $d_f$  em milímetros assim como o resultado  $d_{fe}$ .

Por questões de praticidade e como ligações e suas definições serão vistos mais adiante, a tabela 10.1 é reproduzida na tabela 4.1, sendo  $d_b$  o diâmetro do parafuso empregado na ligação.

Tabela 4.1: Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas (dimensões em milímetros)

$d_b$	Diâmetro furo padrão	Diâmetro furo alargado	Dimensões furo pouco alongado	Dimensões furo muito alongado
$\leq 24$	$d_b + 1,5$	$d_b + 5,0$	$d_b + 1,5 \times d_b + 6,0$	$d_b + 1,5 \times 2,5d_b$
27	28,5	33	28,5 x 35	28,5 x 67,5
$\geq 30$	$d_b + 1,5$	$d_b + 8,0$	$d_b + 1,5 \times d_b + 9,5$	$d_b + 1,5 \times 2,5d_b$

O valor do diâmetro do furo,  $d_f$  à ser adotado é sempre o valor perpendicular a direção da solicitação que, usualmente, pode ser simplificado para o menor valor dentre os apresentados na tabela 4.1 em função do tipo da furação, por exemplo, para o tipo de furação pouco alongada com  $d_b < 24\text{mm}$ ,  $d_f = d_b + 1,5$ .

No caso de barras com extremidades ligadas por pinos, quando o pino tiver por função também permitir rotações relativas entre as partes conectadas, o diâmetro do furo do pino,  $d_h$ , pode ser no máximo 1,0 mm maior que o do pino,  $d_p$ , ou seja:

$$d_p < d_h \leq d_p + 1,0\text{mm} \quad (4.13)$$

No caso de furação para outra finalidade, que não a de ligação de peças, a largura efetiva do furo é igual a largura do furo propriamente dita, independente do formato, sendo adotada a maior largura perpendicular à solicitação.

#### 4.3.2 Área de cisalhamento da chapa ligada por pino - $A_{sf}$

Na verificação das extremidades de barras ligadas por pinos através de chapas, a área de cisalhamento da chapa ligada por pino é dada por:

$$A_{sf} = 2t \left( a + \frac{d_p}{2} \right) \quad (4.14)$$

na qual:

$a$  é a menor distância da borda do furo à extremidade da barra medida na direção paralela à força axial atuante, sendo que  $a \geq \frac{4}{2}b_{ef}$ ;

$d_p$  é o diâmetro do pino;

$t$  é a espessura da chapa de ligação.

#### 4.3.3 Coeficiente de redução - $C_t$

Quando a ligação é feita por todos os segmentos (elementos AA e/ou AL) de um perfil, a seção transversal participa integralmente da transferência dos esforços. Isto não acontece, por exemplo, nas cantoneiras conectadas por uma aba apenas, nas quais a transferência dos esforços se dá apenas através da aba conectada. Nesses casos as tensões se concentram no segmento conectado e não mais se distribuem em toda a seção. Esse efeito, conhecido como "Shear Lag" e apresentado pela primeira vez no AISI:1993, é levado em consideração através do coeficiente  $C_t$ .

#### Seções transversais abertas

Quando a força de tração for transmitida por alguns (não todos) elementos da seção transversal somente usando:

- a) parafusos;
- b) soldas longitudinais;
- c) combinação de soldas longitudinais e transversais.

O coeficiente de redução da área líquida efetiva,  $C_t$ , é dado por:

$$C_t = 1,0 - \frac{e_c}{l_c} \begin{cases} \leq 0,9 \\ \geq 0,6 \end{cases} \quad (4.15)$$

sendo:

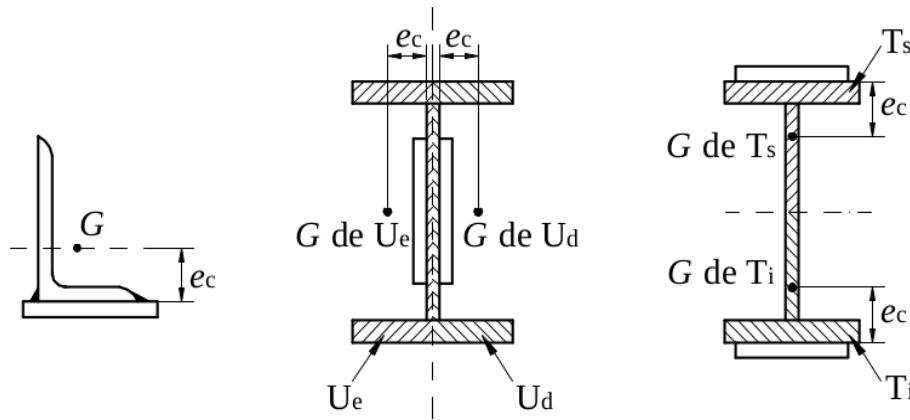
$e_c$  é a excentricidade da ligação;

$l_c$  é o comprimento efetivo da ligação.

Para essa consideração do coeficiente  $C_t$  deve ser usado 0,90 como limite superior e não se permite o uso de ligações que resultem em um valor inferior a 0,60, ou seja, se o  $C_t$  resultar acima de 0,9, usa-se 0,9, se o  $C_t$  resultar abaixo de 0,6, deve-se alterar a ligação.

A excentricidade da ligação é igual à distância do centro geométrico da seção da barra, G, ao plano de cisalhamento da ligação, conforme figura 4.4.

O comprimento efetivo da ligação é igual ao comprimento da solda na direção da força axial,  $L_w$  em ligações soldadas ou, em ligações parafusadas, a distância do primeiro ao último parafuso da linha de furação com maior número de parafusos, na direção da força axial.

Figura 4.4: Ilustração dos valores de  $e_c$  em seções abertas.

### Casos especiais:

- Seção transversal com todos os elementos AA e/ou AL conectados por soldas ou parafusos, o coeficiente de redução vale  $C_t = 1,00$ ;
- Seção transversal conectada somente por soldas transversais, independente da quantidade de elementos conectados, o coeficiente de redução vale:

$$C_t = \frac{A_c}{A_g}$$

sendo  $A_c$  a área dos elementos da seção transversal conectados pela solda.

### Chapas planas

Quando a força de tração for transmitida somente por soldas longitudinais ao longo de ambas as suas bordas, o coeficiente de redução  $C_t$ , vale:

- $C_t = 1,0$ , para  $L_w \geq 2b$
- $C_t = 0,87$ , para  $2b > L_w \geq 1,5b$
- $C_t = 0,75$ , para  $1,5b > L_w \geq b$

onde  $L_w$  é o comprimento da solda longitudinal e  $b$  é a largura da chapa, conforme figura 4.5.

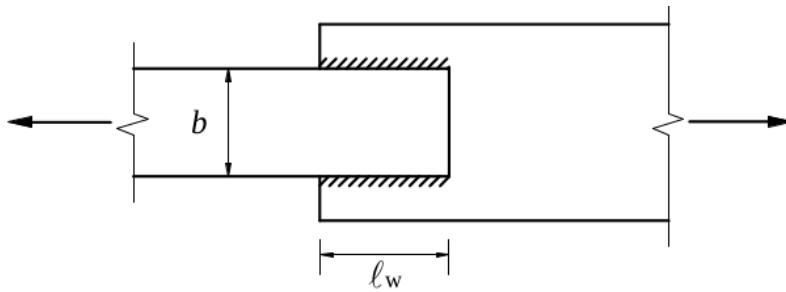


Figura 4.5: Chapa plana com força de tração transmitida por solda longitudinal.

O caso de chapa ligada com solda transversal não é recomendado. Se a ligação for por solda de topo entre chapas ou parafusada, o coeficiente  $C_t = 1,0$ .

### Seções tubulares retangulares

Quando a força de tração for transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica ou por chapas de ligação em dois lados opostos da seção, desde que o comprimento da ligação,  $l_c$ , não seja inferior à dimensão da seção na direção paralela à(s) chapa(s) de ligação,  $b$ , o coeficiente de redução  $C_t$  é dado por:

$$C_t = 1,0 - \frac{e_c}{l_c} \quad (4.16)$$

sendo a excentricidade da ligação,  $e_c$  calculada de acordo com a figura 4.6.

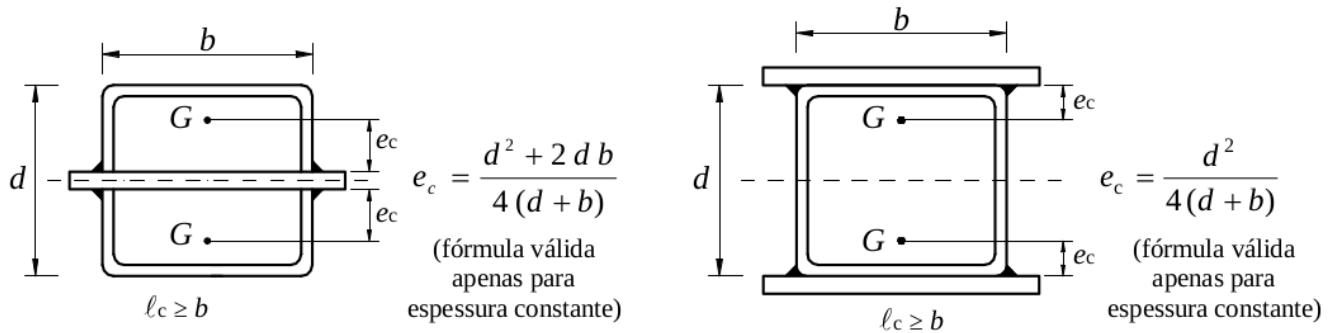


Figura 4.6: Ilustração do valor de  $e_c$  em seção tubular retangular.

Na figura 4.6 o comprimento da ligação,  $l_c$ , não aparece como cota pois é perpendicular ao plano da seção transversal.

### Seções tubulares circulares

Quando a força de tração for transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica, o coeficiente de ligação vale:

- a)  $C_t = 1,0$ , para  $l_c \geq 1,3D$ ;
- b)  $C_t = 1,0 - \frac{e_c}{l_c}$ , para  $1,3D > l_c \geq D$ .

sendo o diâmetro externo,  $D$ , e a excentricidade da ligação,  $e_c$ , dados na figura 4.7.

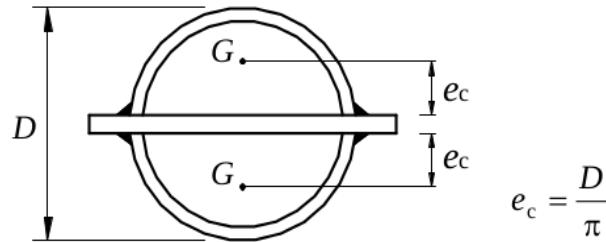


Figura 4.7: Ilustração do valor de  $e_c$  em seção tubular circular.

### Seções tubulares com extremidades rosqueadas

No caso de barras com seções tubulares ou seções circulares maciças, com extremidades rosqueadas, o coeficiente de redução  $C_t = 1,0$ .

### Barras com extremidades ligadas por pinos

No caso de barras com extremidades ligadas por pinos, o coeficiente de redução  $C_t = 1,0$ .