

## Dimensionamento Estrutural de Consolo Curto em Concreto Armado Segundo Diferentes Normas

Mayra Perlingeiro<sup>1</sup>, Luiz Carneiro<sup>2</sup>, Ana Souza<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense / Departamento de Engenharia Civil / mayraperlingeiro@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense / Departamento de Engenharia Civil / luizcarneiro@id.uff.br

<sup>3</sup> Universidade Federal Fluminense / Departamento de Engenharia Civil / absouza@id.uff.br

### Resumo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o dimensionamento estrutural de consolo curto em concreto armado e realizar uma análise comparativa entre os resultados relativos ao dimensionamento deste consolo, obtidos segundo as recomendações das normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), e código ACI 318-19 (2019). O modelo de consolo curto em concreto armado adotado neste trabalho foi o mesmo utilizado por CAMPOS (2010), tendo sido feitas algumas alterações quanto à magnitude das solicitações e à resistência característica do concreto à compressão. Verificou-se que, em relação aos valores obtidos segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014), os valores de tensão na biela de concreto, de resistência da biela de concreto, de área da armadura do tirante e área da armadura de costura, segundo o código ACI 318-19 (2019) e a norma ABNT NBR 9062 (2017), foram cerca de 22% menor e igual, 61% maior e 69% maior, 13% menor e 1% maior, e 12% maior e 25% maior, nesta ordem.

### Palavras-chave

Consolo curto, concreto armado, dimensionamento, normas estruturais.

### Introdução

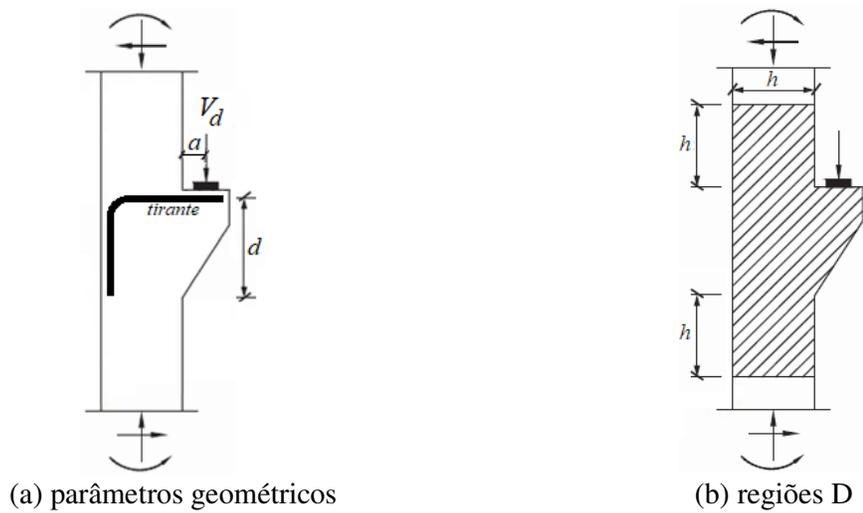
Consolos são elementos estruturais que apoiam mais comumente vigas, se projetam, em geral, de pilares e são muito comuns nas ligações de estruturas pré-fabricadas de concreto. As cargas aplicadas nestes elementos são transmitidas diretamente para o elemento principal que os apoiam (em sua maioria, pilar). O comportamento estrutural destes elementos é diferenciado, assim como o de blocos, reservatórios e vigas-paredes.

De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2014), consolos curtos são elementos estruturais em balanço nos quais a distância da carga aplicada à face do apoio ( $a$ ) situa-se entre a metade e a unidade da sua altura útil ( $d$ ), ou seja,  $0,5d \leq a \leq d$ , como mostrado na Figura 1a.

Em projeto de consolos curtos, considera-se que as hipóteses da seção plana não são aplicáveis, isto é, a distribuição de deformações específicas no seu interior é não linear, devido à descontinuidade geométrica e estática. Estes elementos estruturais se enquadram em situações típicas das conhecidas regiões D, utilizadas no método de bielas e tirantes e demarcadas na área hachurada da Figura 1b.

Permite-se, como exposto na norma ABNT NBR 6118 (2014), a análise da segurança no estado-limite último de um consolo curto por meio do uso de uma treliça isostática autoequilibrada, onde nos seus nós são aplicadas forças externas concentradas e reações de apoio.

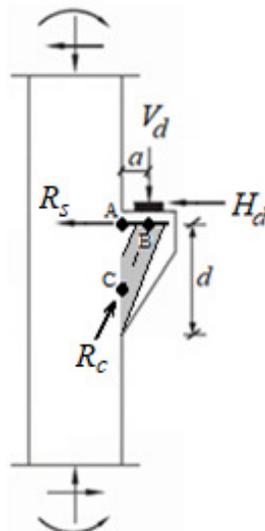
Essa treliça é composta por: bielas, que representam a resultante das tensões de compressão em uma região; tirantes, que representam uma armadura ou um conjunto de armaduras concentradas em um único eixo; e nós, que ligam as bielas e tirantes e recebem as forças concentradas aplicadas nesta treliça.



**Figura 1 – Consolo curto.**

A verificação das bielas, tirantes e nós é efetuada a partir das forças obtidas na análise da treliça isostática sob a ação do sistema autoequilibrado de forças ativas e reativas na treliça.

A Figura 2 ilustra um modelo de treliça simples mais utilizada para consolo curto com carga direta, onde nesta pode-se observar uma biela inclinada, as forças resistentes de tração  $R_s$  e compressão  $R_t$  e nós a serem analisados com o uso do método de bielas e tirantes.

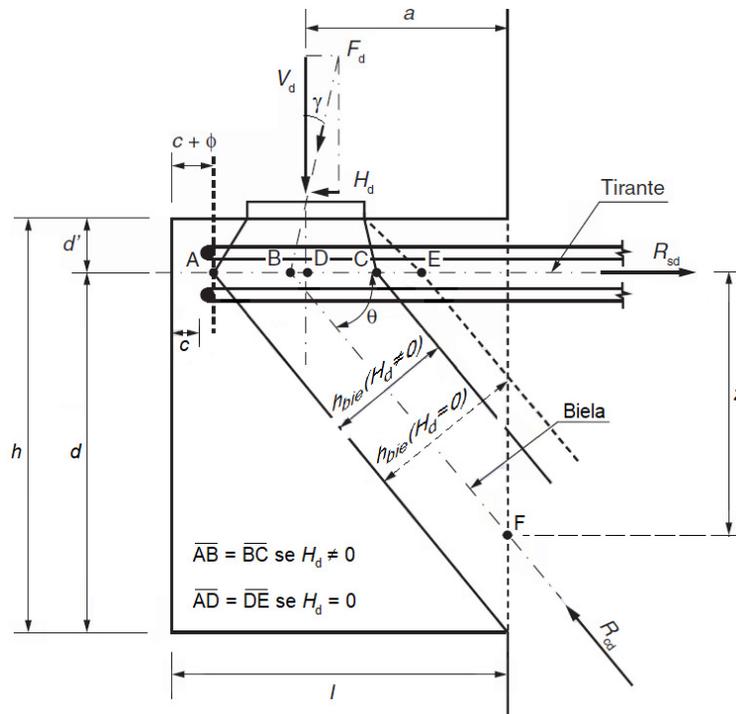


**Figura 2 – Modelo de treliça simples para consolo curto.**

De forma resumida, neste trabalho, apresentam-se recomendações, formulações e algumas disposições normativas (ABNT NBR 6118, 2014; ABNT NBR 9062, 2017; e ACI 318-19, 2019) sobre o dimensionamento estrutural de um consolo curto em concreto armado, além de uma análise comparativa entre os resultados relativos ao dimensionamento deste consolo, obtidos segundo as recomendações normativas.

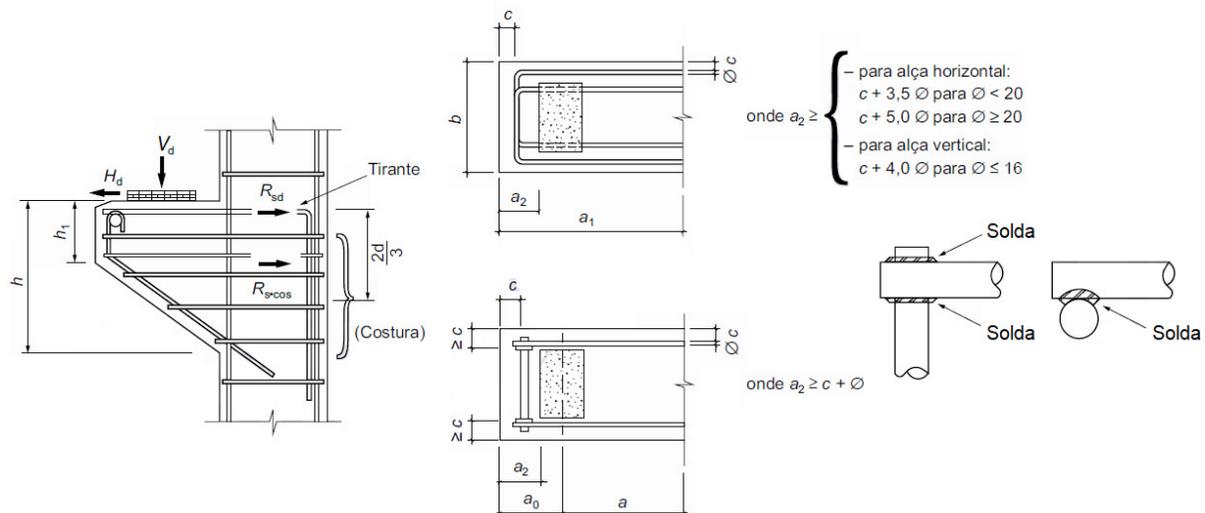
### Considerações Normativas para Consolo Curto

A Figura 3 apresenta o modelo de biela e tirante, admitido pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), para consolo curto com carga direta. Percebe-se que o tirante, no topo do consolo, se ancora na biela sob a carga externa vertical de um lado e no pilar ou apoio do outro, enquanto a biela inclinada vai da carga até a face do pilar ou apoio, usando toda a altura de consolo disponível.



**Figura 3 – Modelo de biela e tirante para consolo curto.**

Os eixos das bielas devem ser escolhidos de maneira a se aproximar o máximo possível das tensões principais de compressão e dos tirantes, dos eixos das armaduras a serem efetivamente detalhadas. As bielas inclinadas devem ter ângulo de inclinação cuja tangente esteja entre 0,57 e 2 em relação ao eixo da armadura longitudinal do elemento estrutural, conforme citado na norma ABNT NBR 6118 (2014). A Figura 4 mostra a armadura típica, admitido pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), para consolo curto com carga direta.



**Figura 4 – Armadura típica para consolo curto.**

Os valores máximos de tensão resistente de cálculo, segundo as normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), na biela de concreto atravessada por um único tirante ou em nó CCT (compressão-compressão-tração) são dados pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 0,72 \cdot (1 - f_{ck}/250) \cdot f_{cd} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\sigma_{Rd,máx}^{bie} = f_{cd} \quad \text{Equação (2)}$$

onde  $f_{ck}$  é a resistência característica do concreto à compressão.

De acordo com o recomendado pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), as áreas de aço para o tirante são calculadas de acordo com as Equações 3 e 4, nesta ordem.

$$A_s^{tir} = R_{sd}/f_{yd} \quad \text{Equação (3)}$$

$$A_s^{tir} = (0,1 + a/d) \cdot V_d/f_{yd} + H_d/f_{yd} \quad \text{Equação (4)}$$

onde  $R_{sd}$  é o valor de cálculo da força de tração determinada no tirante e  $f_{yd}$  é a resistência de cálculo ao escoamento do aço do tirante.

A fim de permitir uma ruptura mais dúctil e evitar redução da carga de ruptura, a norma ABNT NBR 6118 (2014) exige o uso de armadura de costura, cujo valor deve ser igual ou maior a 40% da armadura do tirante, que deve ser distribuída na forma de estribos horizontais em uma altura igual a 2/3 da altura útil do consolo curto. A norma ABNT NBR 9062 (2017) apresenta a Equação 5 para a armadura de costura de consolos curtos a ser distribuída em uma altura de 2/3d.

$$A_s^{cos}/s = 0,4 \cdot [(0,1 + a/d) \cdot V_d/f_{yd}]/d \quad \text{Equação (5)}$$

onde  $s$  é o espaçamento entre os estribos horizontais em aço.

A Equação 6 mostra a área mínima de costura,  $\text{cm}^2/\text{m}$ , recomendada pela norma ABNT NBR 9062 (2017) para consolo curto.

$$A_{s,min}^{cos} = 0,15 \cdot b \quad \text{Equação (6)}$$

onde  $b$  é a largura do consolo curto.

A norma ABNT NBR 9062 (2017) recomenda o uso de estribos verticais (armadura transversal), em consolos com carga direta e com  $a/d \leq 1,0$ , pois são construtivamente necessários e cujo valor é dado pela Equação 7.

$$A_{s,min}^{tra} = 0,15\% \cdot b \cdot h \quad \text{Equação (7)}$$

onde  $h$  é a altura do consolo curto na região de engastamento.

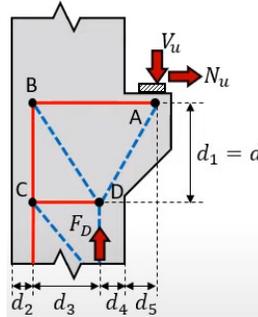
O código ACI 318-19 (2019) apresenta um modelo de bielas e tirantes como mostrado na Figura 5, onde  $d_1$  é a altura útil,  $d_2$  é a distância entre a face externa do pilar e o centroide da barra de ancoragem do tirante BC (v. Equação 8),  $d_4$  é a metade da largura da biela  $h_{bie}$  e  $d_5$  é a distância dada pela Equação 9.

$$d_2 = c + \emptyset + 0,5 \cdot \emptyset_{anc} \quad \text{Equação (8)}$$

onde  $\Phi_{anc}$  é o diâmetro da barra do tirante BC, que pode ser admitido igual ao diâmetro  $\Phi$  do tirante AB.

$$d_5 = a_f + d' \cdot tg\theta_R \quad \text{Equação (9)}$$

onde  $a_f$  é a distância entre  $V_u$  e a face do pilar,  $d'$  é a diferença entre a altura total e a altura útil do consolo curto, e  $tg\theta_R$  é a razão entre  $N_u$  e  $V_u$ .



**Figura 5 – Modelo de bielas e tirantes de acordo como o código ACI 318-19 (2019).**

Fazendo-se o equilíbrio de momentos fletores no nó C, chega-se à Equação 10.

$$F_D \cdot d_3 - N_u \cdot d - V_u \cdot (d_3 + d_4 + a_f + (c + 0,5 \cdot \Phi_{anc}) \cdot tg\theta_R) = 0 \quad \text{Equação (10)}$$

Conforme o código ACI 318-19 (2019), a resistência efetiva do concreto à compressão, aqui denominada por tensão resistente de cálculo na biela de concreto atravessada por um único tirante ou em nó CCT (compressão-compressão-tração), é calculada com o uso da Equação 11.

$$\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 0,85 \cdot \beta_c \cdot 0,80 \cdot f'_c \quad \text{Equação (11)}$$

onde  $f'_c$  é a resistência especificada do concreto à compressão, que neste trabalho considera-se aproximadamente igual a  $f_{ck}$ , e  $\beta_c$  é o fator de modificação de confinamento para bielas e nós no método de bielas e tirantes, que é igual a 1,00 para consolo curto.

No nó D da Figura 5, a força nominal de compressão é dada pela Equação 12.

$$F_D = 0,75 \cdot \sigma_{Rd,máx}^{bie} \cdot A_{bie} \quad \text{Equação (12)}$$

onde  $A_{bie}$  é a área da biela, dada pela Equação 13.

$$A_{bie} = b \cdot h_{bie} \quad \text{Equação (13)}$$

Com o uso das Equações 8 a 13, chega-se a uma equação do 2º grau em  $h_{bie}$ , expressa pela Equação 14. Encontrado o valor de  $h_{bie}$ , obtêm-se  $d_3$  e  $d_4$ .

$$A \cdot h_{bie}^2 + B \cdot h_{bie} + C = 0 \quad \text{Equação (14)}$$

onde  $A$ ,  $B$  e  $C$  são dados pelas Equações 15 a 17.

$$A = -0,5 \cdot \Phi \cdot \sigma_{Rd,máx}^{bie} \cdot b \quad \text{Equação (15)}$$

$$B = (\phi \cdot \sigma_{Rd,max}^{bie} \cdot b) \cdot (l - d_2) \quad \text{Equação (16)}$$

onde  $l$  é a largura do pilar.

$$C = -\{N_u \cdot d + V_u \cdot [l - d_2 + a_f + (c + 0,5 \cdot \phi_{anc}) \cdot tg\theta_R]\} \quad \text{Equação (17)}$$

Sendo  $\theta_A$  o ângulo formado entre as forças que atuam no tirante AB e na biela AD da Figura 5, determina-se a Equação 18.

$$\theta_A = arctg[d_1/(d_4 + d_5)] \quad \text{Equação (18)}$$

Fazendo-se o equilíbrio do nó A, obtêm-se as forças na biela AD e no tirante AB, dadas pelas Equações 19 e 20.

$$F_{AD} = V_u / sen\theta_A \quad \text{Equação (19)}$$

$$F_{AB} = F_{AD} \cdot cos\theta_A + N_u \quad \text{Equação (20)}$$

A área de aço para o tirante, segundo o código ACI 318-19 (2019), é dada pela Equação 21.

$$A_s^{tir} = F_{AB} / (0,75 \cdot f_y) \quad \text{Equação (21)}$$

onde  $f_y$  é a resistência especificada ao escoamento do aço do tirante.

A área mínima de aço para o tirante, segundo o código ACI 318-19 (2019), é dada pela Equação 22.

$$A_{s,min}^{tir} = 0,04 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot b \cdot d \quad \text{Equação (22)}$$

De acordo com o código ACI 318-19 (2019), deve-se colocar uma armadura de costura (estribos horizontais) para se impedir a formação de fissuras, cujo valor mínimo é dado pela Equação 23.

$$A_{s,min}^{cos}/s = \left( \frac{0,0025}{sen^2\theta_b} \right) \cdot b \quad \text{Equação (23)}$$

onde  $\theta_b$  é o ângulo relativo à biela com relação à horizontal, devendo ser pelo menos igual a  $40^\circ$  e  $s$  é o espaçamento entre as barras de aço da armadura de costura não maior que 300 mm.

O valor do ângulo  $\theta_b$  da Equação 19 de cada biela (AD e BD da Figura 5), utilizam-se as Equações 24 e 25.

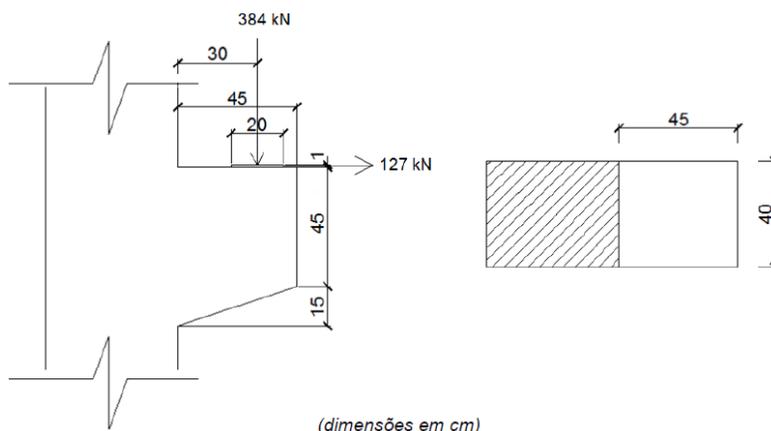
$$\theta_{AD} = \theta_A \quad \text{Equação (24)}$$

$$\theta_{BD} = arctg[d_1/d_3] \quad \text{Equação (25)}$$

### Exemplo de Aplicação

Neste trabalho, desenvolveu-se um dimensionamento estrutural de um consolo curto de concreto armado, cujos dados geométricos e de carregamento direto em serviço podem ser visualizados na Figura 6, com o objetivo de comparar os resultados oriundos deste dimensionamento com os obtidos segundo os documentos ABNT NBR 6118 (2014), ABNT NBR 9062 (2017) e ACI 318-19 (2019).

O modelo de consolo curto em concreto armado adotado neste trabalho foi o mesmo utilizado por CAMPOS (2010), tendo sido feitas algumas alterações quanto à magnitude das solicitações e à resistência característica do concreto à compressão.



**Figura 6 – Consolo curto dimensionado neste trabalho.**

O consolo curto está em equilíbrio, tem comprimento  $l$  de 45 cm e largura  $b$  de 40 cm, suporta cargas diretas em serviço na vertical de 384 kN e na horizontal de 127 kN, está ligado a um pilar de 40 cm x 40 cm de dimensões, e possui um aparelho de apoio em neoprene de 20 cm x 20 cm x 1 cm de dimensões. Os materiais concreto e aço possuem resistências características  $f_{ck}$  e  $f_{yk}$  iguais a 45 MPa e 500 MPa, nesta ordem. O cobrimento de concreto  $c$  deste consolo é igual a 3 cm.

### Resultados e Análise

Com base nas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017), iniciou-se a definição da geometria da treliça apresentada na Figura 3. Para isto, adotou-se  $d' = 4$  cm e  $\phi = 20$  mm, sendo  $d'$  a diferença entre a altura total  $h$  e a altura útil  $d$  do consolo curto, e  $\phi$  o diâmetro da armadura do tirante.

O ângulo de inclinação  $\gamma$  da força resultante  $F_d$  (v. Figura 3) é dado pelo arco cuja a tangente é a razão entre  $H_d$  ( $1,4 \cdot 127 = 177,8$  kN) e  $V_d$  ( $1,4 \cdot 384 = 537,6$  kN). Com isto,  $\gamma$  é igual a  $18,3^\circ$ .

O ângulo de inclinação da biela  $\theta$  é dado, a partir do ponto A da Figura 3, pelo arco cuja a tangente é a razão entre  $d$  e  $[l - (c + \phi)]$ . Então,  $\arctg(40 \text{ cm} - 4 \text{ cm}) / [45 \text{ cm} - (3 \text{ cm} + 2 \text{ cm})] = 54,5^\circ$ .

A largura da biela  $h_{bie}$ , a partir da Figura 3, pode ser calculada como  $AC \cdot \text{sen}\theta$ , sendo  $AC$  o comprimento entre os pontos A e C. Como  $H_d$  não é nulo, então o comprimento entre os pontos A e B,  $AB$ , é igual ao comprimento entre os pontos B e C,  $BC$ . Assim,  $AB = BC = (l - a) - (c + \phi) - d' \cdot \text{tg}\gamma = (45 \text{ cm} - 30 \text{ cm}) - (3 \text{ cm} + 2 \text{ cm}) - 4 \text{ cm} \cdot \text{tg}18,3^\circ = 8,7$  cm. Como o comprimento entre os pontos A e C,  $AC$ , é igual a 17,4 cm,  $h_{bie} = 17,4 \text{ cm} \cdot \text{sen}54,5^\circ = 14,2$  cm.

Na Figura 3, o braço de alavanca  $z$  é dado pela multiplicação entre a tangente do ângulo  $\theta$  e o comprimento  $(a + d' \cdot \text{tg}\gamma)$ , ou seja,  $z = \text{tg}\theta \cdot (a + d' \cdot \text{tg}\gamma) = \text{tg}54,5^\circ \cdot (30 \text{ cm} + 4 \text{ cm} \cdot \text{tg}18,3^\circ) = 43,9$  cm.

Fazendo o equilíbrio de nó B da Figura 3, a força resultante de compressão de cálculo  $R_{cd}$  na biela de concreto é igual a  $V_d / \text{sen}\theta = 537,6 \text{ kN} / \text{sen}54,5^\circ = 660,3$  kN, enquanto a força resultante de tração de cálculo  $R_{sd}$  no nível do centroide da armadura do tirante é igual a  $R_{cd} \cdot \text{cos}\theta + H_d$ . Portanto,  $R_{sd} = 660,3 \text{ kN} \cdot \text{cos}54,5^\circ + 177,8 \text{ kN} = 561,2$  kN.

A tensão na biela de concreto  $\sigma_{bie}$  é dada pela razão entre a força  $R_{cd}$  e a área da seção transversal da biela  $A_{bie}$ , que é igual ao produto entre a largura da biela  $h_{bie}$  e a largura do consolo curto  $b$ . Assim,  $\sigma_{bie} = 660,3 \text{ kN} / (14,2 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}) = 1,16 \text{ kN/cm}^2 = 11,6 \text{ MPa}$ .

De acordo com a Equação 1, que apresenta o valor máximo de tensão resistente de cálculo na biela de concreto atravessada por um único tirante ou em nó CCT, segundo a norma ABNT NBR 6118 (2014),  $\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 0,72 \cdot (1 - 45 \text{ MPa} / 250) \cdot 45 \text{ MPa} / 1,4 = 19,0 \text{ MPa}$ . Com o uso da Equação 2, este valor, conforme a norma ABNT NBR 9062 (2017), passa para  $\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 45 \text{ MPa} / 1,4 = 32,1 \text{ MPa}$ .

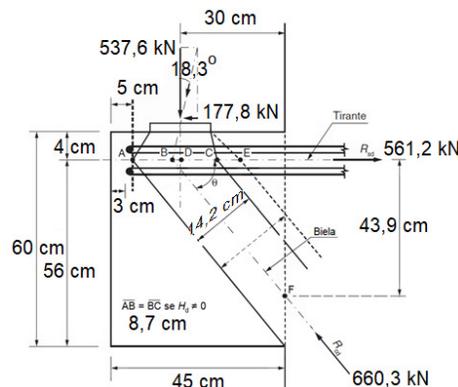
Como a tensão na biela de concreto  $\sigma_{bie} = 11,6 \text{ MPa}$  é menor que a tensão máxima resistente de cálculo na biela de concreto  $\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 19,0 \text{ MPa}$  ou  $\sigma_{Rd,máx}^{bie} = 32,1 \text{ MPa}$ , a biela de concreto está segura quanto ao seu esmagamento.

A área de aço do tirante, de acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2014) e expressa pela Equação 5, é igual a  $A_s^{tir} = 516200 \text{ N} / (500 \text{ MPa} / 1,15) = 1187,3 \text{ mm}^2 = 11,9 \text{ cm}^2$ . Em contrapartida, esta área, segundo a norma ABNT NBR 9062 (2017) e a Equação 6, é igual a  $A_s^{tir} = (0,1 + 30 \text{ cm} / 56 \text{ cm}) \cdot 537600 \text{ N} / (500 \text{ MPa} / 1,15) + 177800 \text{ N} / (500 \text{ MPa} / 1,15) = 1195,0 \text{ mm}^2 = 12,0 \text{ cm}^2$ . A partir destas áreas, a armadura do tirante deve ser formada por 4 barras de 20 mm, o que leva a uma área de aço real do tirante de  $12,6 \text{ cm}^2$ .

A armadura de costura, conforme a norma ABNT NBR 6118 (2014), deve ser igual a  $A_s^{cos} = 40/100 \cdot 11,9 \text{ cm}^2 = 4,8 \text{ cm}^2$ , distribuída em uma altura  $2/3 \cdot 56 \text{ cm} = 37,3 \text{ cm}$ , o que equivale a  $12,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Adotando-se estribos horizontais de 10 mm de diâmetro, chegam-se a 4 estribos horizontais de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 12 cm.

Pela Equação 9, que expressa a armadura de costura a ser distribuída em uma altura  $2/3 \cdot d$  segundo a norma ABNT NBR 9062 (2017), o valor de  $A_s^{cos}/s = 0,4 \cdot [(0,1 + 30 \text{ cm} / 56 \text{ cm}) \cdot 537600 \text{ N} / (500 \text{ MPa} / 1,15)] / 560 \text{ mm} = 0,56 \text{ mm}^2/\text{mm} = 5,6 \text{ cm}^2/\text{m}$  em uma altura de 37,3 cm, o que conduz a 4 estribos horizontais de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 10,5 cm. Este valor  $A_s^{cos}/s$  deve ser maior que  $A_{s,min}^{cos} = 0,15 \cdot 40 \text{ cm} = 6 \text{ cm}^2/\text{m}$  em uma altura de 37,3 cm (v. Equação 10). Por conseguinte,  $A_s^{cos}/s = 6 \text{ cm}^2/\text{m}$  em uma altura de 37,3 cm, o que leva a 5 estribos horizontais de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 9,5 cm.

A armadura transversal, de acordo com a norma ABNT NBR 9062 (2017), é igual a  $A_{s,min}^{tra} = 0,15/100 \cdot 40 \text{ cm} \cdot 60 \text{ cm} = 3,6 \text{ cm}^2$  (v. Equação 11), o que conduz a 3 estribos verticais de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 19,5 cm. A Figura 7 ilustra os valores geométricos e de forças do consolo curto dimensionado neste trabalho por meio das recomendações das normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017).



**Figura 7 – Consolo curto deste trabalho com valores segundo as normas brasileiras.**

A partir do código ACI 318-19 (2019), considerando  $d_1$ , que é a altura útil igual a 56 cm e com o uso das Equações 8 e 9, calculam-se os valores de  $d_2 = 3 \text{ cm} + 2 \text{ cm} + 0,5 \cdot 2 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$  e de  $d_3 = 30 \text{ cm} + 4 \text{ cm} \cdot 127 \text{ kN}/384 \text{ kN} = 31,3 \text{ cm}$  (v. Figura 5).

O valor da força nominal de compressão no nó D é  $F_D = 0,75 \cdot (0,85 \cdot 1,00 \cdot 0,80 \cdot 45 \text{ MPa}) \cdot (400 \text{ mm} \cdot h_{bie}) = 9180 \text{ MPa} \cdot \text{mm} \cdot h_{bie}$ , sendo a largura da biela  $h_{bie}$  dada em mm.

Os valores dos coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  da Equação 14, dados pelas Equações 15 a 17, são:  $A = -0,5 \cdot 0,75 \cdot 30,6 \text{ MPa} \cdot 400 \text{ mm} = -4590 \text{ N/mm}$ ;  $B = 0,75 \cdot 30,6 \text{ MPa} \cdot 400 \text{ mm} \cdot (400 \text{ mm} - 60 \text{ mm}) = 3121200 \text{ N}$ ;  $C = -\{127 \text{ kN} \cdot 56 \text{ cm} + 384 \text{ kN} \cdot [40 \text{ cm} - 6 \text{ cm} + 30 \text{ cm} + (3 \text{ cm} + 0,5 \cdot 2 \text{ cm}) \cdot 127 \text{ kN}/384 \text{ kN}]\} = -32196 \text{ kN} \cdot \text{cm} = -321960000 \text{ N} \cdot \text{mm}$ . Resolvendo-se a Equação 14, chega-se a  $h_{bie} = 126,8 \text{ mm} = 12,7 \text{ cm}$ . Portanto,  $F_D = 9180 \text{ MPa} \cdot \text{mm} \cdot 126,8 \text{ mm} = 1164024 \text{ N} = 1164,0 \text{ kN}$ ,  $d_4 = 0,5 \cdot 12,7 \text{ cm} = 6,4 \text{ cm}$  e  $d_3 = 40 \text{ cm} - 6 \text{ cm} - 6,4 \text{ cm} = 27,6 \text{ cm}$ .

Com o uso da Equação 18, chega-se ao valor do ângulo  $\theta_A = \arctg(56 \text{ cm} / (6,4 \text{ cm} + 31,3 \text{ cm})) = 56,1^\circ$ . Logo, as forças na biela AD e no tirante AB são iguais a  $F_{AD} = 384 \text{ kN} / \text{sen}56,1^\circ = 462,6 \text{ kN}$  e a força  $F_{AB} = 462,6 \text{ kN} \cdot \cos56,1^\circ + 127 \text{ kN} = 385,0 \text{ kN}$ .

Para  $F_{AD} = 462,6 \text{ kN}$ , a tensão na biela é igual a  $\sigma_{bie} = 462600 \text{ N} / (400 \text{ mm} \cdot 126,8 \text{ mm}) = 9,1 \text{ MPa}$ , cujo valor é menor que a tensão resistente  $\sigma_{Rd,m\acute{a}x}^{bie} = 0,85 \cdot 1,00 \cdot 0,80 \cdot 45 \text{ MPa} = 30,6 \text{ MPa}$ , o que não leva ao esmagamento da biela.

A partir do último resultado acima, chega-se área de aço para o tirante (v. Equação 21), segundo o código ACI 318-19 (2019), que é igual a  $A_s^{tir} = 385000 \text{ N} / (0,75 \cdot 500 \text{ MPa}) = 1026,7 \text{ mm}^2 = 10,3 \text{ cm}^2$ , o que leva a 4 barras de aço de 20 mm de diâmetro. Este valor de  $A_s^{tir} = 10,3 \text{ cm}^2$  é maior que o mínimo (v. Equação 22), igual a  $A_{s,min}^{tir} = 0,04 \cdot 45 \text{ MPa} / 500 \text{ MPa} \cdot 40 \text{ cm} \cdot 56 \text{ cm} = 8,1 \text{ cm}^2$ .

O valor do ângulo  $\theta_b$  relativo à biela AD é o mesmo que o já calculado  $\theta_A = 56,1^\circ$  (v. Equação 24), que é maior que  $40^\circ$ . Sendo assim, o valor da armadura de costura mínima (v. Equação 23) é  $A_{s,min}^{cos}/s = 0,0025 / \text{sen}^2 56,1^\circ \cdot 400 \text{ mm} = 1,45 \text{ mm}^2/\text{mm} = 14,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

O valor do ângulo  $\theta_b$  relativo à biela BD é igual a  $\theta_{BD} = \arctg(56 \text{ cm} / 27,6 \text{ cm}) = 63,8^\circ$  (v. Equação 25), que é maior que  $40^\circ$ . Com isto, o valor da armadura de costura mínima (v. Equação 23) é  $A_{s,min}^{cos}/s = 0,0025 / \text{sen}^2 63,8^\circ \cdot 400 \text{ mm} = 1,24 \text{ mm}^2/\text{mm} = 12,4 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

Adotando-se o maior valor, a armadura de costura mínima é  $A_{s,min}^{cos}/s = 14,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ , o que conduz a estribos horizontais de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 10,5 cm. A Figura 8 mostra os valores geométricos e de forças do consolo curto dimensionado neste trabalho com o uso do código ACI 318-19 (2019).

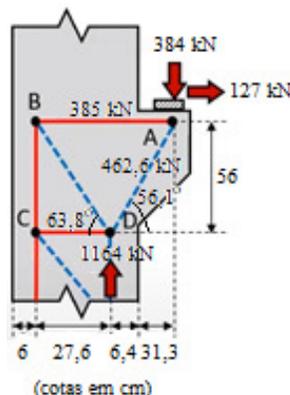


Figura 8 – Consolo curto deste trabalho com valores segundo o código americano.

A Tabela 1 agrupa, de forma resumida, os valores de tensão na biela  $\sigma_{bie}$ , tensão resistente  $\sigma_{Rd,máx}^{bie}$ , área de aço do tirante  $A_s^{tir}$  e área de aço de costura  $A_s^{cos}$ , segundo resultados oriundos do consolo curto analisado pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 9062 (2017) e o código ACI 318-19 (2019)

**Tabela 1 – Resultados de tensão e áreas de aço para o consolo curto analisado neste trabalho.**

Documento	$\sigma_{bie}$ (MPa)	$\sigma_{Rd,máx}^{bie}$ (MPa)	$A_s^{tir}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s^{cos}$ (cm <sup>2</sup> /m)
ABNT NBR 6118 (2014)	11,6	19,0	11,9	12,9
ABNT NBR 9062 (2017)	11,6	32,1	12,0	16,1
ACI 318 (2019)	9,1	30,6	10,3	14,5

Constata-se da Tabela 1 que as normas brasileiras propuseram um modelo de bielas e tirantes que leva a uma tensão na biela de concreto cerca de 27% maior que a da norma americana.

Os valores de tensão resistente da biela de concreto, conforme a Tabela 1, são diferentes entre si. A maior diferença ocorreu entre os valores calculados pelas normas brasileiras. Nota-se que a norma ABNT NBR 9062 (2017) conduziu a um valor em torno de 68,9 % superior ao da norma ABNT NBR 6118 (2014). Em relação ao valor calculado pelo código ACI 318-19 (2019), a tensão resistente da biela de concreto de acordo com a norma ABNT NBR 9062 (2017) foi ligeiramente superior em cerca de 5,9%.

Pode-se perceber da Tabela 1 que os valores de área de aço do tirante calculados de acordo com as normas brasileiras foram praticamente iguais. O código do ACI 318-19 (2019) conduziu ao menor valor de área de aço do tirante, que em média foi 13,8% inferior aos demais.

Os valores de área de aço de costura da Tabela 1, obtidos por meio das recomendações dos documentos utilizados neste trabalho, são distintos entre si. Verifica-se que o maior valor foi encontrado com o uso da norma ABNT NBR 9062 (2017), enquanto o menor valor, com o uso da norma ABNT NBR 6118 (2014).

### Conclusões

Os resultados de um consolo curto com carga direta e razão *a/d* igual a 0,54, obtidos de acordo com o uso de diferentes normas, mostraram que, em relação ao valor de tensão na biela de concreto, o código do ACI 318-19 (2019) é o menos conservador entre os documentos usados neste trabalho, pois conduziu a um menor valor entre os demais, assim como em se tratando da área de aço do tirante.

A norma ABNT NBR 9062 (2017) foi a mais conservadora entre os documentos avaliados, pois levou aos maiores valores de área de aço do tirante e de costura em relação aos demais calculados.

Constatou-se que as normas brasileiras divergem da norma americana, principalmente com relação ao valor proposto para a resistência da biela de concreto.

### Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-19. USA, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. ABNT NBR 6118. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado. ABNT NBR 9062. Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- CAMPOS, M. A. Comparação entre Diferentes Modelos de Cálculo para Consolos de Concreto Pré-moldado. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2010.