



MEMORIAL DE CÁLCULO

**DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE ESTACA SOB
FLEXO-COMPRESSÃO**

1 INTRODUÇÃO

Este documento demonstra os cálculos numéricos do dimensionamento de uma estaca de concreto armado sob flexo-compressão.

2 DADOS GERAIS – ESTACAS D31CM

Tipo de estaca: raiz

CAA (classe de agressividade ambiental): II

Cobrimento nominal: 5 cm

Resistência à compressão característica do concreto: 20 MPa

Diâmetro da estaca: 31 cm

Quantidade de barras longitudinais: 5

Agregado utilizado: granito

Comprimento da estaca: 7 m

Força normal característica de compressão (Nk): 36 tf

Força lateral característica aplicada no topo da estaca: 1 tf

Momento fletor característico aplicado no topo da estaca: 2 tf.m

O esquema de solicitação da estaca é apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Solicitações características na estaca

No item 3 informações referentes à sondagem do solo são apresentadas.

3 DADOS DE SONDAAGEM

A estimativa da capacidade de carga obtida pelos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma é apresentada na Tabela 1. O fator de segurança global adotado foi igual a 2.

Tabela 1 - Capacidade de carga Aoki-Velloso (1) x Décourt-Quaresma (2)

Prof. (m)	NSPT	Solo	Rp,adm (1) (kN)	RI,adm (1) (kN)	Radm (1) (tf)	Rp,adm (2) (kN)	RI,adm (2) (kN)	Radm (2) (tf)
1	0	Argila arenosa	0,00	0,00	0,00	5,66	0,00	0,28
2	4	Argila arenosa	11,10	3,68	1,48	4,85	0,00	0,24
3	5	Argila arenosa	13,87	8,29	2,22	10,24	19,72	3,00
4	10	Argila arenosa	27,74	17,49	4,52	19,94	43,83	6,38
5	22	Areia	174,35	51,23	22,56	121,52	65,74	16,19
6	83	Areia	396,26	127,93	52,42	163,79	101,90	23,87

7	83	Areia	396,26	204,62	60,09	210,81	171,80	36,97
---	----	-------	--------	--------	-------	--------	--------	-------

Onde:

$R_{p,adm}$ é a resistência de ponta admissível;

$R_{l,adm}$ é a resistência lateral admissível;

R_{adm} é a resistência total admissível; no caso de Décourt-Quaresma este valor é obtido de forma diferente do método de Aoki-Velloso, verifique se necessário.

Com base nos dados de sondagem e estaca, o dimensionamento estrutural foi feito utilizando curvas de interação M-N com implementações de recomendações normativas da ABNT NBR 6118 (2023).

4 DIMENSIONAMENTO À FLEXO-COMPRESSÃO

Com base nos diagramas de solicitações, o seguinte par M-N foi definido para o dimensionamento da estaca (unidades em kN e m):

$$M_d = 43,87 \text{ kN.m}$$

$$N_d = 504,00 \text{ kN}$$

Análogo ao cálculo de pilares de concreto armado, a área de aço necessária (A_s) para uma estaca sob flexo-compressão pode ser definida com auxílio da seguinte equação:

$$A_s = \frac{\omega_{calc} \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

Em que:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{yd} \leq \left[\frac{f_{yk}}{\gamma_s} ; 0,2\% \cdot E_s \right]$$

Onde:

A_s é a área de aço longitudinal;

Y_c é o coeficiente de minoração para o concreto, adotado igual a 1,6 conforme ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;

Y_s é o coeficiente de minoração para o aço, adotado igual a 1,15;

A_c é a área da seção da estaca;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão;

f_{yk} é a resistência ao escoamento característica do aço longitudinal (50 kN/cm²);

f_{yd} é a resistência ao escoamento de cálculo do aço;

ω_{calc} é a taxa mecânica de armadura, obtida por curvas de interação M-N;

E_s é o módulo de elasticidade do aço, adotado como 210000 MPa.

Com uso de curvas de interação M-N, os seguintes valores foram obtidos:

$$\omega_{calc} = 0,677$$

$$A_s = 15,21 \text{ cm}^2$$

A área mínima de aço é definida como 0,4% da área da seção da estaca:

$$A_{s,min} = 3,02 \text{ cm}^2$$

Como área necessária foi definido o maior valor entre $A_{s,min}$ e A_s :

$$A_{s,nec} = 15,21 \text{ cm}^2$$

Conforme a ABNT NBR 6122 (2022) item 8.6.2, para atender de forma simplificada à verificação de fissuração em estacas sob flexão, o dimensionamento considerou a espessura de sacrifício de 2 mm no diâmetro das barras longitudinais.

O arranjo adotado conforme a área necessária ($A_{s,nec}$) foi: 5 Ø 25 mm.

A Verificação de espaçamento entre barras longitudinais na seção da estaca não foi feita.

5 COMPRIMENTO DA ARMADURA LONGITUDINAL

O comprimento da armadura longitudinal foi definido como o maior comprimento obtido entre:

- 1 - Comprimento mínimo exigido pela ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;
- 2 - Profundidade em que a tensão de compressão simples na estaca é superior ou igual a 6 MPa, como exigido pela ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;
- 3 - Comprimento em que o concreto não resiste à cortante imposta [há a necessidade de armadura longitudinal para suporte dos estribos];
- 4 - Comprimento em que há a existência de momento fletor.

Por se tratar de uma estaca do tipo raiz, o comprimento da armadura deve ser integral. Logo, as demais verificações foram dispensadas.

6 ARMADURA DE CISALHAMENTO

O dimensionamento ao cisalhamento foi feito de acordo com o Modelo de cálculo I apresentado no item 17.4.2.2 da NBR 6118 (2023). Por simplificação, o valor de V_c foi tomado igual a V_{c0} , adoção que caminha a favor da segurança. O valor do esforço cortante de cálculo (kN) vale:

$$V_{sd} = 21,72 \text{ kN}$$

6.1 Verificação das diagonais comprimidas

Deve ser satisfeita a condição $V_{sd} \leq V_{Rd2}$. A equação a seguir define o valor de V_{Rd2} . Foi adotada altura útil de 24,12 cm.

$$V_{Rd} = 0,27 \cdot (1 - f_{ck}/250) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

Onde:

V_{Rd2} é a cortante resistente de cálculo;

d é a altura útil da seção da estaca;

b_w é a menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil; foi adotada igual ao valor do diâmetro da estaca.

O valor de VRd2 é assim definido:

$$V_{Rd2} = 232,17 \text{ kN}$$

O valor de Vsd não superou VRd2, logo a verificação foi satisfeita.

6.2 Definição da armadura de cisalhamento

A armadura de cisalhamento tem valor mínimo caso o valor de Vsd não supere o valor definido na seguinte equação:

$$V_{Rd,min} = V_{sw,min} + V_c$$

Em que:

$$V_{sw,min} = 0,9 \cdot (A_{sw,min}/100) \cdot d \cdot f_{ywd}$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} \leq 435 \text{ MPa}$$

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

$$A_{sw,min} = \frac{20 \cdot f_{ctm} \cdot b_w}{f_{ywk}} \text{ [considerado espaço de 100 cm]}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}, \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot [f_{ck} + 8]), \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

Onde:

Vc é a parcela de cortante resistida pelo concreto;

vsw,min é a parcela de cortante resistida pela armadura mínima de cisalhamento;

fctd é a resistência de cálculo do concreto à tração direta;

fctm é a resistência média do concreto à tração;

fctk,inf é a resistência à tração inferior do concreto;

f_{yw} é a resistência característica ao escoamento do aço do estribo;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço do estribo (não superior a 435 MPa);

$A_{sw,min}$ é a armadura mínima de cisalhamento.

Aplicando as equações, os resultados seguintes foram obtidos:

$$f_{ctm} = 0,22 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ctk,inf} = 0,15 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{yw} = 50,00 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ctd} = 0,10 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c = 43,39 \text{ kN}$$

$$f_{ywd} = 43,50 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{sw,min} = 2,74 \text{ cm}^2/m$$

$$V_{sw,min} = 25,88 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,min} = 69,27 \text{ kN}$$

O valor de V_{sd} não superou o valor de $V_{Rd,min}$, logo a armadura de cisalhamento tem valor mínimo igual a $A_{sw,min}$. A armadura de cisalhamento adotada foi: Ø 6,3 mm c/14,47 cm.

Como $V_{sd} \leq 0,67 \cdot V_{Rd,2}$, o espaçamento máximo entre os estribos vale:

$$s_{max} \leq [0,6 \cdot d ; 30] = 14,47 \text{ cm}$$

O espaçamento adotado entre os estribos respeitou o valor máximo

7 DADOS GERAIS – ESTACAS D50

Tipo de estaca: raiz

CAA (classe de agressividade ambiental): II

Cobrimento nominal: 5 cm

Resistência à compressão característica do concreto: 20 MPa

Diâmetro da estaca: 50 cm

Quantidade de barras longitudinais: 8

Agregado utilizado: granito

Comprimento da estaca: 7 m

Força normal característica de compressão (Nk): 70 tf

Força lateral característica aplicada no topo da estaca: 3 tf

Momento fletor característico aplicado no topo da estaca: 6 tf.m

O esquema de solicitação da estaca é apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Solicitações características na estaca

Metodo de capacidade de carga
Método Décourt-Quaresma
Resist. total adm. (tf) 70
Esforço normal Nk (tf) 70
Esforço lateral Hk (tf) 3
Momento fletor Mk (tf.m) 6
70 tf
3 tf 6 tf.m

No item 3 informações referentes à sondagem do solo são apresentadas.

8 DADOS DE SONDAAGEM

A estimativa da capacidade de carga obtida pelos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma é apresentada na Tabela 1. O fator de segurança global adotado foi igual a 2.

Tabela 1 - Capacidade de carga Aoki-Velloso (1) x Décourt-Quaresma (2)

Prof. (m)	NSPT	Solo	Rp,adm (1) (kN)	RI,adm (1) (kN)	Radm (1) (tf)	Rp,adm (2) (kN)	RI,adm (2) (kN)	Radm (2) (tf)
1	0	Argila arenosa	0,00	0,00	0,00	14,72	0,00	0,74
2	4	Argila arenosa	28,87	5,94	3,48	12,62	0,00	0,63
3	5	Argila arenosa	36,08	13,36	4,94	26,64	31,81	5,84
4	10	Areia	206,17	38,10	24,43	101,71	70,69	15,96
5	22	Areia	453,57	92,53	54,61	316,13	106,03	32,12
6	83	Areia	1030,84	216,23	124,71	426,08	164,35	46,59
7	83	Areia	1030,84	339,93	137,08	548,41	277,09	70,05

Onde:

Rp,adm é a resistência de ponta admissível;

RI,adm é a resistência lateral admissível;

R,adm é a resistência total admissível; no caso de Décourt-Quaresma este valor é obtido de forma diferente do método de Aoki-Velloso, verifique se necessário.

Com base nos dados de sondagem e estaca, o dimensionamento estrutural foi feito utilizando curvas de interação M-N com implementações de recomendações normativas da ABNT NBR 6118 (2023).

9 DIMENSIONAMENTO À FLEXO-COMPRESSÃO

Com base nos diagramas de solicitações, o seguinte par M-N foi definido para o dimensionamento da estaca (unidades em kN e m):

$$M_d = 153,45 \text{ kN.m}$$

$$N_d = 980,00 \text{ kN}$$

Análogo ao cálculo de pilares de concreto armado, a área de aço necessária (A_s) para uma estaca sob flexo-compressão pode ser definida com auxílio da seguinte equação:

$$A_s = \frac{\omega_{calc} \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

Em que:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{yd} \leq \left[\frac{f_{yk}}{\gamma_s} ; 0,2\% \cdot E_s \right]$$

Onde:

A_s é a área de aço longitudinal;

γ_c é o coeficiente de minoração para o concreto, adotado igual a 1,6 conforme ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;

γ_s é o coeficiente de minoração para o aço, adotado igual a 1,15;

A_c é a área da seção da estaca;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão;

f_{yk} é a resistência ao escoamento característica do aço longitudinal (50 kN/cm²);

f_{yd} é a resistência ao escoamento de cálculo do aço;

ω_{calc} é a taxa mecânica de armadura, obtida por curvas de interação M-N;

Es é o módulo de elasticidade do aço, adotado como 210000 MPa.

Com uso de curvas de interação M-N, os seguintes valores foram obtidos:

$$\omega_{calc} = 0,288$$

$$A_s = 16,80 \text{ cm}^2$$

A área mínima de aço é definida como 0,4% da área da seção da estaca:

$$A_{s,min} = 7,85 \text{ cm}^2$$

Como área necessária foi definido o maior valor entre $A_{s,min}$ e A_s :

$$A_{s,nec} = 16,80 \text{ cm}^2$$

Conforme a ABNT NBR 6122 (2022) item 8.6.2, para atender de forma simplificada à verificação de fissuração em estacas sob flexão, o dimensionamento considerou a espessura de sacrifício de 2 mm no diâmetro das barras longitudinais.

O arranjo adotado conforme a área necessária ($A_{s,nec}$) foi: 8 Ø 20 mm.

A Verificação de espaçamento entre barras longitudinais na seção da estaca não foi feita.

10 COMPRIMENTO DA ARMADURA LONGITUDINAL

O comprimento da armadura longitudinal foi definido como o maior comprimento obtido entre:

1 - Comprimento mínimo exigido pela ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;

2 - Profundidade em que a tensão de compressão simples na estaca é superior ou igual a 6 MPa, como exigido pela ABNT NBR 6122 (2022), item 8.6.3;

3 - Comprimento em que o concreto não resiste à cortante imposta [há a necessidade de armadura longitudinal para suporte dos estribos];

4 - Comprimento em que há a existência de momento fletor.

Por se tratar de uma estaca do tipo raiz, o comprimento da armadura deve ser integral. Logo, as demais verificações foram dispensadas.

11 ARMADURA DE CISALHAMENTO

O dimensionamento ao cisalhamento foi feito de acordo com o Modelo de cálculo I apresentado no item 17.4.2.2 da NBR 6118 (2023). Por simplificação, o valor de V_c foi tomado igual a V_{c0} , adoção que caminha a favor da segurança. O valor do esforço cortante de cálculo (kN) vale:

$$V_{sd} = 66,12 \text{ kN}$$

11.1 Verificação das diagonais comprimidas

Deve ser satisfeita a condição $V_{sd} \leq V_{Rd2}$. A equação a seguir define o valor de V_{Rd2} . Foi adotada altura útil de 43,37 cm.

$$V_{Rd} = 0,27 \cdot (1 - f_{ck}/250) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

Onde:

V_{Rd2} é a cortante resistente de cálculo;

d é a altura útil da seção da estaca;

b_w é a menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil; foi adotada igual ao valor do diâmetro da estaca.

O valor de V_{Rd2} é assim definido:

$$V_{Rd2} = 673,32 \text{ kN}$$

O valor de V_{sd} não superou V_{Rd2} , logo a verificação foi satisfeita.

11.2 Definição da armadura de cisalhamento

A armadura de cisalhamento tem valor mínimo caso o valor de V_{sd} não supere o valor definido na seguinte equação:

$$V_{Rd,min} = V_{sw,min} + V_c$$

Em que:

$$V_{sw,min} = 0,9 \cdot (A_{sw,min}/100) \cdot d \cdot f_{ywd}$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} \leq 435 \text{ MPa}$$

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

$$A_{sw,min} = \frac{20 \cdot f_{ctm} \cdot b_w}{f_{ywk}} \text{ [considerado espaço de 100 cm]}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}, \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot [f_{ck} + 8]), \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

Onde:

V_c é a parcela de cortante resistida pelo concreto;

$v_{sw,min}$ é a parcela de cortante resistida pela armadura mínima de cisalhamento;

f_{ctd} é a resistência de cálculo do concreto à tração direta;

f_{ctm} é a resistência média do concreto à tração;

$f_{ctk,inf}$ é a resistência à tração inferior do concreto;

f_{ywk} é a resistência característica ao escoamento do aço do estribo;

f_{ywd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço do estribo (não superior a 435 MPa);

$A_{sw,min}$ é a armadura mínima de cisalhamento.

Aplicando as equações, os resultados seguintes foram obtidos:

$$f_{ctm} = 0,22 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ctk,inf} = 0,15 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ywk} = 50,00 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ctd} = 0,10 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c = 125,82 \text{ kN}$$

$$f_{ywd} = 43,50 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{sw,min} = 4,42 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$V_{sw,min} = 75,06 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,min} = 200,89 \text{ kN}$$

O valor de V_{sd} não superou o valor de V_{Rdmin} , logo a armadura de cisalhamento tem valor mínimo igual a $A_{sw,min}$. A armadura de cisalhamento adotada foi: Ø 6,3 mm c/14,00 cm.

Como $V_{sd} \leq 0,67 \cdot V_{Rd2}$, o espaçamento máximo entre os estribos vale:

$$s_{max} \leq [0,6 \cdot d ; 30] = 26,02 \text{ cm}$$

O espaçamento adotado entre os estribos respeitou o valor máximo.

7 REFERÊNCIAS

ALONSO, Urbano Rodrigues. Dimensionamento de fundações profundas. 2 ed. São Paulo:Blucher, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

FERNANDO STROISCH
ENG. CIVIL CREA-SC 062522-0
RESPONSÁVEL TÉCNICO