

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

Tipo de estaca: escavada sem fluído

CAA (classe de agressividade ambiental): II

Cobrimento nominal: 3 cm

Resistência à compressão característica do concreto: 25 MPa

Diâmetro da estaca: 30 cm

Quantidade de barras longitudinais: 6

Agregado utilizado: basalto

Comprimento da estaca: 5 m

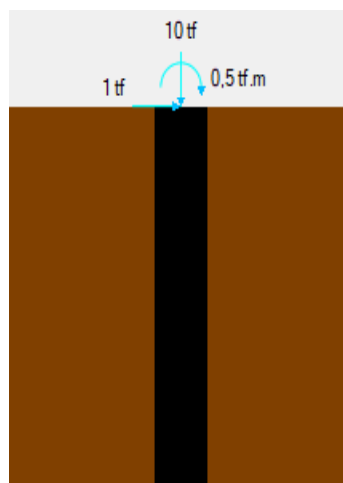
Força normal característica de compressão (Nk): 10 tf

Força lateral característica aplicada no topo da estaca: 1 tf

Momento fletor característico aplicado no topo da estaca: 0,5 tf.m

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

Figura 1 - Sollicitações características na estaca



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

3 DADOS DE SONDAGEM

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	6	Argila siltosa	15,55	4,15	1,97	36,05	0,00	1,80
2	14	Argila siltosa	36,29	13,83	5,01	36,05	0,00	1,80
3	10	Argila siltosa	25,92	20,74	4,67	88,93	33,93	9,67
4	50	Argila siltosa	129,59	55,29	18,49	144,20	65,35	17,26
5	60	Argila siltosa	129,59	89,85	21,94	180,25	81,68	21,58

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).

4 DIMENSIONAMENTO À FLEXPRESSÃO

Com base na seguinte expressão, é possível avaliar se uma estaca é longa ou curta:

$$T = \left(\frac{E_{cs} \cdot I_c}{\eta_h} \right)^{1/5}$$

Onde:

η_h é a constante do coeficiente de reação horizontal (definido como 0,32 MN/m³);

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto adotado igual a 28980,00 MPa;

I_c é o momento de inércia da seção da estaca que vale 39760,78 cm⁴.

Aplicada a equação, tem-se:

$$T = 2,05 \text{ m}$$

Como o comprimento da estaca é menor ou igual a 4.T, a estaca foi dimensionada como estaca curta pelo Método Russo. Os seguintes parâmetros foram utilizados na aplicação do método:

$$K_v = 233,15 \text{ MN/m}^3$$

$$\gamma_{nat} = 17,00 \text{ kN/m}^3$$

$$k_a = 0,23$$

$$k_p = 4,30$$

$$\sigma_{adm} = 12,00 \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

K_v é o coeficiente de reação vertical do solo na cota de apoio da estaca;

γ_{nat} é o peso específico natural do solo;

k_a é o coeficiente de empuxo ativo;

k_p é o coeficiente de empuxo passivo;

σ_{adm} é a tensão admissível do solo na cota de apoio da estaca, adotado como 20% do valor de NSPT nesta profundidade.

Aplicado o Método Russo, os seguintes resultados e verificações foram efetuados

a) Deslocamentos no topo e giro da estaca

$$\Delta_x = \frac{2 \cdot H_d}{K_l \cdot l \cdot D} + (2/3) \cdot l \cdot \alpha$$
$$K_l = \frac{\eta_h \cdot l}{D}$$
$$\alpha = \frac{2 \cdot H_d \cdot l + 3 \cdot M_0}{(1/12) \cdot K_l \cdot l^3 \cdot D + (3/16) \cdot K_v \cdot A_b \cdot D^2}$$
$$\Delta_y = \frac{N_d}{K_v \cdot A_b}$$

Onde:

Δ_x é o deslocamento horizontal no topo da estaca;

Δ_y é o deslocamento vertical no topo da estaca;

H_d é o esforço lateral de cálculo aplicado no topo da estaca, adotado como 14,00 kN;

K_l é coeficiente de reação horizontal na cota de apoio da estaca;

l é o comprimento da estaca;

D é o diâmetro da estaca;

α é o giro da estaca;

A_b é área da seção da estaca;

N_d é o esforço normal de cálculo tomado igual a 140,00 kN;

M_0 é o momento fletor de cálculo aplicado no topo da estaca tomado igual a 7,00 kN.m.

Aplicando as equações, os resultados seguintes foram obtidos:

$$K_l = 5,33 \text{ MN/m}^3$$

$$\alpha = 0,0095014575 \text{ rad}$$

$$\Delta_x = 0,0351715251 \text{ m}$$

$$\Delta_y = 0,0084950840 \text{ m}$$

b) Condições de estabilidade

As tensões de referência podem ser obtidas com o uso da seguintes equações:

$$\sigma'_a = K_l \cdot (l \cdot \alpha - \Delta_x)$$

$$\sigma_{a,b} = \frac{N_d}{A_b} \pm \frac{K_v \cdot D \cdot \alpha}{2}$$

A estabilidade é garantida se forem satisfeitas as condições seguintes:

$$\text{Verificação 1: } \sigma'_a < \gamma_{nat} \cdot l \cdot (K_p - K_a)$$

$$\text{Verificação 2: } \frac{\sigma_a + \sigma_b}{2} \leq \sigma_{adm}$$

$$\text{Verificação 3: } \sigma_b \leq 1,3 \cdot \sigma_{adm}$$

Aplicando as equações, os resultados seguintes foram obtidos:

$$\sigma'_a = 0,066 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 2,313 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = 1,648 \text{ MPa}$$

As verificações de estabilidade são aplicadas:

$$\text{Verificação 1 ----> } 0,066 < 0,346$$

$$\text{Verificação 2 ----> } 1,981 \leq 1,200$$

$$\text{Verificação 3 ----> } 1,648 \leq 1,560$$

A verificação de estabilidade não foi satisfeita, logo é preciso revisar! O dimensionamento foi continuado mesmo com a verificação não sendo satisfeita.

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

$$M_d = 24,05 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_d = 140,00 \text{ kN}$$

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 3,1 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;

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:

$$\omega_{calc} = 0,274$$

$$A_s = 3,71 \text{ cm}^2$$

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

$$A_{s,min} = 2,83 \text{ cm}^2$$

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

$$A_{s,nec} = 3,71 \text{ cm}^2$$

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: 6 Ø 12,5 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 5 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.

5.1 Comprimento mínimo normativo

Por se tratar de uma estaca escavada sem fluído, o comprimento mínimo de armadura deve ser de 2 m.

5.2 Comprimento por tensão de compressão simples

A tensão de compressão simples (σ_c) atuante na estaca vale:

$$\sigma_c = \frac{N_k}{A_c} = 1,41 \text{ MPa}$$

A tensão de compressão simples não superou o limite normativo de 5 MPa. Logo, essa verificação foi dispensada.

5.3 Comprimento referente à cortante e momento fletor

A profundidade a partir da qual o concreto resiste ao esforço cortante é de 0,00 m. Em relação à existência de momento fletor, a estaca deve ser armada até 5,00 m.

Com base nos critérios avaliados a estaca deve ser armada até 5,00 m.

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:

$$V_{sd} = 14,00 \text{ kN}$$

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 25,75 cm.

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot (1 - f_{ck}/250) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

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:

$$V_{Rd2} = 151,36 \text{ kN}$$

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

6.2 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:

$$f_{ctm} = 0,26 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ctk,inf} = 0,18 \text{ kN/cm}^2$$

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

$$f_{ctd} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c = 26,84 \text{ kN}$$

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

$$A_{sw,min} = 3,08 \text{ cm}^2/m$$

$$V_{sw,min} = 31,02 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,min} = 57,86 \text{ kN}$$

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: $\emptyset 6,3 \text{ mm}$ c/15,45 cm.

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

$$s_{max} \leq [0,6 \cdot d ; 30] = 15,45 \text{ cm}$$

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.