Governo do Estado do Rio de Janeiro
Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade - SEAS
Instituto Estadual do Ambiente - INEA
Diretoria de Recuperação Ambiental - DIRRAM

MEMORIAL DE CÁLCULO

ENCONTRO DE PONTES SOBRE RIO BENGALAS MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO, RJ

Setembro de 2024

inea instituto estadual do ambiente | Secretaria do Ambiente e Sustentabilidade | GOVERNO DO ESTADO RIO DE JANEIRO | Rio 20 30

Avenida Venezuela, 110 – Praça Mauá – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 20081-312
Tels.: (21) 2332-5302 / 2332-5196
www.inea.rj.gov.br

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

1. Introdução

Esta memória de cálculo apresenta o dimensionamento detalhado de um bloco de fundação com 6 estacas raiz, seguindo as diretrizes estabelecidas nas normas ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto) e NBR 6122:2019 (Projeto e execução de fundações). O objetivo é fornecer um dimensionamento robusto, seguro e otimizado para a estrutura de fundação proposta.

2. Dados de entrada

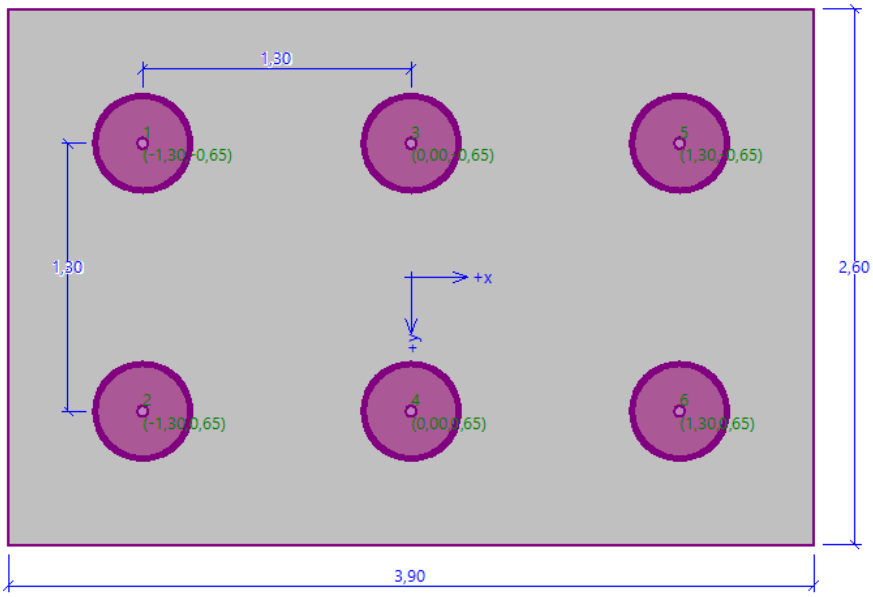
2.1. Dimensionamento do bloco

- Dimensões do bloco: x = 3,9 m; y = 2,6 m; z = 2,2 m
- Número de estacas: 6
- Diâmetro das estacas: 0,45 m
- Comprimento das estacas: 10 m
- Bloco parcialmente enterrado: 1,1 m (metade da altura)
- Cobrimento 5 cm

2.1.1. Espaçamento entre estacas

- Espaçamento em x: 1,30 m
- Espaçamento em y: 1,30 m

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.



2.2. Materiais

2.2.1. Concreto (C40)

- fck = 40,00 MPa
- fct,m = 3,51 MPa
- Ecm = 35400,00 MPa
- G = 13300,00 MPa

2.2.2. Armadura (CA-50)

- fyk = 500,00 MPa (armadura longitudinal e transversal)

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

2.3. Características do solo

- Tipo de solo: Areia siltosa
- NSPT médio (estimado) = 20 golpes
- Ângulo de atrito (φ) = 32°
- Coesão (c) = 0 kPa
- Peso específico (γ) = 18 kN/m³

2.4. Nível do Lençol freático

- O nível d'água está tocando a face inferior do bloco.

2.5. Cargas Atuantes

- Rx = (-224,264; -26,676) kN
- Ry = (-281,089; 209,298) kN
- Rz = (1685,415; 4000,376) kN

As cargas atuam no centro da face superior do bloco, onde está localizado o apoio da ponte. Consideraremos as cargas mais elevadas para o dimensionamento, visando maior segurança.

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

3. Cálculo da Capacidade de Cargas das Estacas

3.1. Método de Aoki – Velloso

3.1.1. Cálculo iterativo para determinar o comprimento:

Para calcular a capacidade de carga das estacas, utilizaremos o método de Aoki-Velloso (1975), que é amplamente utilizado no Brasil para estacas em solos arenosos.

A fórmula geral é:

$$Q = (k * N * Ap) / F1 + (\alpha * k * N * U * L) / F2$$

Onde:

Q = Capacidade de carga da estaca

k = Coeficiente que depende do tipo de solo (para areia siltosa, k = 600 kN/m²)

N = Valor médio do NSPT ao longo da estaca (adotaremos 20)

Ap = Área da ponta da estaca

F1 = Fator de correção da resistência de ponta (para estaca raiz, F1 = 2,0)

α = Razão de atrito lateral (para areia siltosa, α = 1,4%)

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

U = Perímetro da seção transversal da estaca

L = Comprimento da estaca

F2 = Fator de correção da resistência lateral (para estaca raiz, F2 = 2,0)

Cálculos:

$Ap = \pi * (0,45/2)^2 = 0,159\ m^2$

$U = \pi * 0,45 = 1,414\ m$

$Q = (600 * 20 * 0,159) / 2,0 + (0,014 * 600 * 20 * 1,414 * 10) / 2,0$

$Q = 955,75 + 1189,80$

$Q = 2145,55\ kN$

Capacidade de carga de uma estaca: 2145,55 kN

3.1.2.Dimensões das Estacas:

- Diâmetro: 0,45 m
- Comprimento: 10 m
- Capacidade de carga individual: 2145,55 kN

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

4. Verificação da Capacidade de carga do grupo de Estacas

4.1. Eficiência do Grupo de Estacas

Para calcular a eficiência do grupo de estacas, utilizaremos a fórmula de Converse-Labarre:

$\eta = 1 - (\arctan(D/s) * (m(n-1) + n(m-1))) / (90 * m * n)$

Onde:

- η = Eficiência do grupo
- D = Diâmetro da estaca
- s = Espaçamento entre estacas
- m = Número de linhas
- n = Número de colunas

$\eta = 1 - (\arctan(0,45/1,30) * (2(3-1) + 3(2-1))) / (90 * 2 * 3)$

$\eta = 1 - (19,12 * 7) / 540$

$\eta = 0,753$

4.2. Capacidade de Carga do Grupo

A capacidade de carga do grupo de estacas é calculada multiplicando a capacidade de carga individual pela eficiência e pelo número total de estacas:

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

Qgrupo = Q * η * número de estacas

Qgrupo = 0,753 * 6 * 2145,55 = 9691,55 kN

5. Verificação das Cargas Atuantes

Analisando as cargas atuantes fornecidas:

- Rx = (-224,264; -26,676) kN
- Ry = (-281,089; 209,298) kN
- Rz = (1685,415; 4000,376) kN

Considerando as cargas mais elevadas para cada direção:

- Rx = (-224,264; -26,676) kN
- Ry = (-281,089; 209,298) kN
- Rz = (1685,415; 4000,376) kN

Para verificar se o grupo de estacas suporta as cargas atuantes, consideraremos a carga vertical máxima (Rz):

Carga vertical máxima = 4000,376 kN < 9691,55 kN (Capacidade de carga do grupo)

A capacidade de carga do grupo é suficiente para suportar a carga vertical máxima.

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

As cargas horizontais (Rx e Ry) serão consideradas na distribuição das cargas nas estacas e no dimensionamento estrutural do bloco.

6. Distribuição das Cargas na Estacas

6.1. Cálculo do Centro de Gravidade do Grupo de Estacas

O centro de gravidade do grupo de estacas coincide com o centro geométrico do bloco, devido à simetria da disposição das estacas.

$Xg = 3,9/2 = 1,95$ m

$Yg = 2,6/2 = 1,30$ m

6.2. Cálculo dos Momentos de Inércia do Grupo

$Ix = \Sigma\, yi^2$

$Iy = \Sigma\, xi^2$

Onde xi e yi são as distâncias de cada estaca ao centro de gravidade do grupo.

$Ix = \Sigma(yi^2) = 2 * (0,65^2) + 2 * (0,65^2) + 2 * (1,30^2) = 4,42\ m^2$

$Iy = \Sigma(xi^2) = 2 * (0,65^2) + 2 * (1,95^2) = 8,45\ m^2$

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

6.3. Cálculo das Cargas nas Estacas

Dados:

h = 2,2 m (altura do bloco)

Rx,max = 224,264 kN

Ry,max = 281,089 kN

Mx = Ry,max * h = 281,089 * 2,2 = 618,396 kNm My = Rx,max * h = 224,264 * 2,2 = 493,381 kNm

Usando a fórmula: Pi = (Rz / n) ± (Mx * yi / Ix) ± (My * xi / Iy)

Dados:

Rz = 4000,376 kN

n = 6 (número de estacas)

Mx = 618,396 kNm

My = 493,381 kNm

Ix = 4,42 m²

Iy = 8,45 m²

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

Coordenadas das estacas em relação ao centro de gravidade:

Estaca 1: x1 = 1,95 m, y1 = 1,30 m

Estaca 2: x2 = 0,65 m, y2 = 1,30 m

Estaca 3: x3 = -0,65 m, y3 = 1,30 m

Estaca 4: x4 = 1,95 m, y4 = 0 m

Estaca 5: x5 = 0,65 m, y5 = 0 m

Estaca 6: x6 = -0,65 m, y6 = 0 m

Calculando para as estacas nos cantos (1 e 4):

Estaca 1: P1 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 1,30 / 4,42) + (493,381 * 1,95 / 8,45) P1 = 666,729 + 182,039 + 114,119 = 962,887 kN

Estaca 4: P4 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 0 / 4,42) + (493,381 * 1,95 / 8,45) P4 = 666,729 + 0 + 114,119 = 780,848 kN

Para completar, calcularemos as cargas nas outras estacas:

Estaca 2: P2 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 1,30 / 4,42) + (493,381 * 0,65 / 8,45) P2 = 666,729 + 182,039 + 38,040 = 886,808 kN

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

Estaca 3: P3 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 1,30 / 4,42) - (493,381 * 0,65 / 8,45) P3 = 666,729 + 182,039 - 38,040 = 810,728 kN

Estaca 5: P5 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 0 / 4,42) + (493,381 * 0,65 / 8,45) P5 = 666,729 + 0 + 38,040 = 704,769 kN

Estaca 6: P6 = (4000,376 / 6) + (618,396 * 0 / 4,42) - (493,381 * 0,65 / 8,45) P6 = 666,729 + 0 - 38,040 = 628,689 kN

A estaca mais solicitada é a Estaca 1, com uma carga de 962,887 kN.

Comparando com a capacidade de carga individual da estaca calculada anteriormente:

Capacidade de carga individual = 1549,68 kN Carga máxima atuante = 962,887 kN

7. Dimensionamento Estrutural da Estaca Raiz

7.1. Dimensionamento estrutural da Estaca Raiz

O dimensionamento estrutural da estaca raiz será baseado na carga máxima calculada anteriormente e nas características do material.

7.2. Dados da Estaca

- Diâmetro: 0,45 m
- Comprimento: 10 m

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

- Carga máxima: 962,887 kN (mantida do cálculo anterior)

7.3. Materiais

- Concreto: C40 (fck = 40 MPa)
- Aço: CA-50 (fyk = 500 MPa)

7.3.1. Capacidade de carga Estrutural

A capacidade de carga estrutural será calculada considerando a contribuição do concreto e do aço.

7.3.2. Capacidade do concreto

$Ac = \pi * (0,45^2) / 4 = 0,159\ m^2$

$Nc = 0,85 * fcd * Ac$

$fcd = fck / 1,4 = 40 / 1,4 = 28,57\ MPa$

$Nc = 0,85 * 28,57 * 0,159 * 1000 = 3855,72\ kN$

7.3.3. Armadura longitudinal mínima

Conforme a NBR 6122, a taxa de armadura longitudinal mínima para estacas raiz é de 0,5% da área da seção transversal.

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

As,min = 0,005 * Ac = 0,005 * 0,159 = 0,000795 m² = 7,95 cm²

7.3.4.Capacidade da armadura

Considerando a armadura mínima:

Ns = As,min * fyd

fyd = fyk / 1,15 = 500 / 1,15 = 434,78 MPa

Ns = 0,000795 * 434,78 * 1000 = 345,65 kN

7.3.5.Capacidade total da estaca

Nt = Nc + Ns = 3855,72 + 345,65 = 4201,37 kN

A capacidade total da estaca (4201,37 kN) é superior à carga máxima atuante (962,887 kN), portanto, está adequada.

7.4. Armadura Transversal

7.4.1.Espaçamento máximo

O espaçamento máximo dos estribos deve ser o menor entre:

- 20 cm
- O diâmetro da estaca

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

Portanto, adotaremos o espaçamento máximo de 20 cm.

7.4.2. Área de aço dos estribos

Considerando estribos de 8 mm:

$A_{sw} = \pi * (0,8^2) / 4 = 0,5 \text{ cm}^2$

7.4.3. Taxa de armadura transversal

$\rho_{sw} = A_{sw} / (s * b_w) = 0,5 / (20 * 45) = 0,00056$

Esta taxa é superior ao mínimo recomendado de 0,0005, portanto, está adequada.

7.4.4. Comprimento de Ancoragem

O comprimento de ancoragem básico para barras nervuradas em boa aderência é dado por:

$l_b = \varphi * f_{yd} / (4 * f_{bd})$

Onde:

$f_{bd} = 2,25 * f_{ctd}$

$f_{ctd} = 0,7 * 0,3 * f_{ck}^{(2/3)} / 1,4$

Calculando:

$f_{ctd} = 0,7 * 0,3 * 40^{(2/3)} / 1,4 = 1,45 \text{ MPa}$

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

fbd = 2,25 * 1,45 = 3,26 MPa

Considerando barras de 20 mm para a armadura longitudinal:

lb = 20 * 434,78 / (4 * 3,26) = 666,7 mm

Adotaremos um comprimento de ancoragem de 70 cm.

8. Dimensionamento Estrutural do Bloco

8.1. Dados de entrada

8.1.1. Dimensões do bloco

- Comprimento (x) = 3,9 m
- Largura (y) = 2,6 m
- Altura (z) = 2,2 m

8.2. Dimensionamento da armadura Principal

8.2.1. Altura útil do bloco

d = z - cobrimento - φestribo - φlongitudinal/2

Considerando cobrimento de 5 cm, estribo de 8 mm e armadura longitudinal de 20 mm:

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

d = 220 - 5 - 0,8 - 2/2 = 213,2 cm

8.2.2. Cálculo das Bielas e Tirantes

Força no tirante (Rst):

Rst = (R * a) / (2 * d)

Onde:

R = carga máxima na estaca = 962,887 kN

a = distância entre estacas = 1,95 m

Rst = (962,887 * 1,95) / (2 * 2,132) = 440,87 kN

8.2.3. Área de aço Necessária

As = Rst / fyd = 440,87 / 434,78 = 1014,01 mm² = 10,14 cm²

Adotaremos 5 barras de 16 mm (As,ef = 10,05 cm²)

8.3. Verificação da Resistência das Bielas

$\sigma cd = R / (Ae * sen^2\theta)$

Onde:

Ae = área da biela na base da estaca = $\pi * 0,45^2 / 4 = 0,159$ m²

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

θ = ângulo da biela com a horizontal = arctan(d/a) = arctan(2,132/1,95) = 47,5°

σcd = 962,887 / (0,159 * sen²47,5°) = 10,47 MPa

σcd,lim = 0,85 * αv2 * fcd

Onde:

αv2 = 1 - fck/250 = 1 - 40/250 = 0,84

σcd,lim = 0,85 * 0,84 * 28,57 = 20,37 MPa

Como σcd < σcd,lim, a resistência das bielas está verificada.

8.4. Armadura de Suspensão

As,susp = 0,20 * R / fyd = 0,20 * 962,887 / 434,78 = 443,01 mm² = 4,43 cm²

Adotaremos 4 barras de 12,5 mm (As,ef = 4,91 cm²)

8.5. Verificação ao Puncionamento

8.5.1. Perímetro Crítico

Para estacas, o perímetro crítico é definido a uma distância de 0,5d da face da estaca, onde d é a altura útil do bloco.

d = z - cobrimento - φestribo - φlongitudinal/2

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

d = 220 - 5 - 0,8 - 2/2 = 213,2 cm

Perímetro crítico:

u = π * (φestaca + d)

u = π * (45 + 213,2) = 811,9 cm = 8,119 m

8.5.2. Tensão Solicitante

A tensão solicitante é calculada considerando a carga máxima na estaca:

τsd = Fd / (u * d)

Onde:

Fd = carga máxima na estaca = 962,887 kN (valor calculado anteriormente)

τsd = 962,887 / (8,119 * 2,132) = 55,59 kN/m²

8.5.3. Tensão Resistente

A tensão resistente é calculada de acordo com a NBR 6118:

τRd = 0,13 * (1 + √(20/d)) * (100 * ρ * fck)^(1/3) + 0,10 * σcp

Onde:

ρ = As / (bw * d) = taxa de armadura de flexão

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.

As = área de aço da armadura de flexão (calculada anteriormente como 10,05 cm²)

bw = largura da seção crítica = 260 cm (largura do bloco)

σcp = tensão de compressão devido ao esforço normal (pode ser considerada zero para este caso)

ρ = 10,05 / (260 * 213,2) = 0,000182

τRd = 0,13 * (1 + √(20/213,2)) * (100 * 0,000182 * 40)^(1/3) + 0 = 322,85 kN/m²

8.5.4. Verificação

τsd = 55,59 kN/m² < τRd = 322,85 kN/m²

Como τsd < τRd, o bloco está seguro quanto ao puncionamento.

8.5.5. Dimensionamento da armadura contra colapso progressivo

As,cp = 0,5 * R / fyd = 0,5 * 962,887 / 434,78 = 1107,53 mm² = 11,08 cm²

Adotaremos 6 barras de 16 mm (As,ef = 12,06 cm²).

Eng.º Rafael Agenor dos Santos
Gerente
INEA/DIRRAM/GEROSMA
ID: 4373732-2

Adib José Francisco Junior
Resp. Técnico CREA RJ 152.925/D
HYDRA ENG. E SANEAMENTO LTDA.