

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Aula 5. Estacas: tipos, escolha e projeto geométrico

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

1

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

INTRODUÇÃO

Estacas são executadas apenas por equipamentos ou ferramentas, sem descida de operários;

Podem ser utilizadas para o melhoramento de solos para aterros, ex: estacas de jet grouting e colunas de brita;

Proporcionar escoramento lateral a certas estruturas ou resistir a forças laterais (estacas inclinadas ou cortinas de estacas)

Aspectos importantes a se avaliar:

- Efeito de grupo
- Efeito Tschebotarioff
- Atrito negativo

Fundações

Melhoramento de solos

Contenção

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

3

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

INTRODUÇÃO

- Fundações profundas;
- Transferem esforços axiais de compressão: ponta e lateral;
- Ruptura: estrutural ou do solo;
- $R_c = R_p + R_l$ (Resistência de ponta + Atrito lateral);
- Estacas também podem suportar esforços de tração ou horizontais;
- Fator de Segurança (F.S.) de 1,5 a 3,0;
- Redução de recalques em camadas superficiais compressíveis (transferência para camadas mais profundas, redução dos recalques);

Condição de fundação profunda

$$H \geq 2B \text{ e } \geq 3m$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

2

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

Quando uma ou mais camadas superiores do solo são altamente compressíveis e muito fracas para suportar a carga transmitida pela superestrutura, as estacas são usadas para transmitir a carga para rocha subjacente ou uma camada de solo mais forte.

Fonte: Vesic (1977)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

4

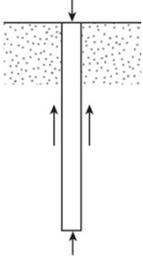
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

A camada de rocha sã ou impenetrável não são encontrados a uma profundidade razoável, estacas são utilizadas para a transmissão gradual das cargas no solo. Resistência principalmente do atrito na interface solo-estaca.



Fonte: Vesic (1977)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

5

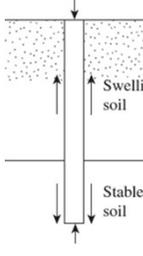
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

Presença de solos colapsíveis e/ou expansivos. As estacas podem se estender além da zona ativa, em que ocorrem as dilatações e retrações pela variação do teor de umidade (danos severos em fundações rasas).



Fonte: Vesic (1977)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

7

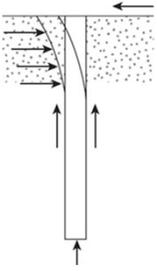
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

Submetidas a solicitações horizontais, resistência por flexão enquanto ainda suportam a carga vertical. (Contenções, estruturas altas sujeitas a ação do vento ou sísmica).



Fonte: Vesic (1977)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

6

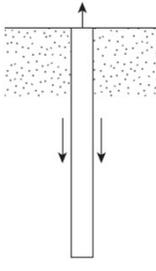
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

Estruturas submetidas a forças de soerguimento (tração), como torres de transmissão, plataformas offshore e lajes subterrâneas abaixo do nível freático.



Fonte: Vesic (1977)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

8

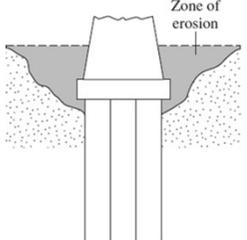
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

USO DE ESTACAS

Quando utilizar?

Condições que requerem estacas em fundações:

Encontros de pontes e pilares são geralmente construídos sobre fundações de estacas para evitar a perda de capacidade de carga que uma fundação rasa pode sofrer por causa da **erosão do solo erosão superficial**.



Fonte: Vesic (1977)

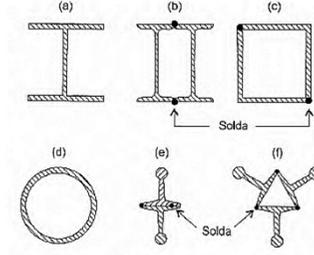
9

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTACAS METÁLICAS

As estacas metálicas ou estacas de aço são encontradas em diversas formas, desde perfis (laminados ou soldados) a tubos (de chapa calandrada e soldada ou sem costura).

Os tipos de aço mais utilizados seguem os padrões ASTM A36 (tensão de escoamento 250 MPa) e A572 Grau 50 (tensão de escoamento 345 MPa).



Estacas de aço (seções transversais): (a) perfil de chapas soldadas; (b) perfis I laminados, associados (duplo); (c) perfis tipo cantoneira, idem; (d) tubos; (e) trilhos associados (duplo); (f) idem (triplo)



Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010

11

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

TIPOS DE ESTACAS

Classificação pelo material

Metálicas



Desvantagens
Flambagem;
Ruído na cravação;
Vibração;
Reduzida resistência de ponta;
Custo;
Corrosão.

Vantagens
Pouca perturbação;
Rapidez construtiva;
Facilidade de emendas;
Elevado controle;
Resistência à flexão

Concreto



Pré-moldadas ou in loco

Desvantagens
(pré-moldado) limitação de transporte, cortes e emendas (in loco) controle menor (maior consumo de concreto) (pré-moldada) dimensionamento limitado ao mercado (in loco) sujeito a falhas executivas (vazios, erros,...)

Vantagens
Cobrimento: redução da influência do nível freático; (in loco) Preenchimento dos vazios do solo; maior adesão; (in loco) adequação ao local; (pré-moldada) grandes comprimentos (50 m); (pré-moldada) rapidez construtiva

Madeira



Desvantagens
Baixa utilização atual (incremento de carga); Comprimento reduzido (entre 12 e 15 m); Suscetibilidade ao nível freático e ataques biológicos;

Vantagens
Boa durabilidade e resistência ao choque; Bom controle; Resistência elevada (tabela com valores indicativos); Grande aplicabilidade em obras temporárias;

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010

10

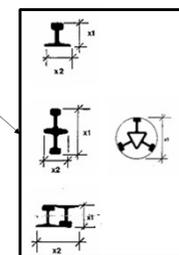
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTACAS METÁLICAS

Estacas de perfis de aço mais utilizadas

| Tipo de Estaca | Tipo / Dimensão | peso/metro (kg/m) | Carga máx (kN) |
|---|-----------------|-------------------|----------------|
| Trilhos usados $\sigma = 80 \text{ MPa}$ | TR 25 | 24,6 | 200 |
| | TR 32 | 32,0 | 250 |
| | TR 37 | 37,1 | 300 |
| | TR 45 | 44,6 | 350 |
| | TR 50 | 50,3 | 400 |
| (verificar grau de desgaste e alinhamento) | 2 TR 32 | 64,0 | 500 |
| | 2 TR 37 | 74,2 | 600 |
| | 3 TR 32 | 96,0 | 750 |
| | 3 TR 37 | 111,3 | 900 |
| Perfis I e H - Aço A36 | I 8" (203 mm) | 27,3 | 300 |
| | I 10" (254 mm) | 37,7 | 400 |
| | I 12" (305 mm) | 50,6 | 600 |
| | I 14" (356 mm) | 75,4 | 800 |
| $\sigma = 120 \text{ MPa}$ | 2 I 12" | 121,2 | 1200 |
| | H 6" (152 mm) | 37,1 | 400 |
| Perfis H - Aço A572 | H 200 mm | 46,1 | 700 |
| | H 200 mm | 59,0 | 1000 |
| | H 250 mm | 73,0 | 1200 |
| | H 310 mm | 93,0 | 1500 |
| | H 310 mm | 117,0 | 2000 |

σ = tensão de trabalho (adotada como 0,5 f_y para peças novas)



| Dimensões | Trilhos | A | B | C | D |
|---|---------|-------|-------|------|------|
|  | TR-37 | 122,2 | 122,2 | 62,7 | 13,6 |
| | TR-45 | 142,9 | 130,2 | 65,1 | 14,3 |
| | TR-60 | 152,4 | 136,5 | 68,2 | 14,3 |
| | TR-67 | 168,3 | 139,7 | 69,0 | 15,9 |

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010

12

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTACAS METÁLICAS

Corrosão

- Estacas metálicas inteiras e permanentemente enterradas, salvo em casos excepcionais, dispõem de qualquer proteção contra a corrosão. Em cálculos de capacidade de carga estrutural, admite-se que a corrosão inutilize apenas uma espessura de sacrifício, de acordo com a norma.
- Estacas metálicas com trecho desenterrado, no ar ou na água, exigem uma proteção. Por segurança, faz-se a proteção desde a cota de erosão até o bloco de coroamento. Quando a estaca é constituída por um perfil I, H, ou trilhos, faz-se um encamisamento com concreto. Para estaca tubular, arma-se o trecho acima da cota de erosão.

| Classe do solo | Espessura de sacrifício (mm) |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Solos naturais e aterros controlados | 1,0 |
| Argila orgânica | 1,5 |
| Solos turfosos | 3,0 |
| Aterros não controlados | 2,0 |
| Solos contaminados* | 3,2 |

*Solos agressivos deverão ser estudados especificamente

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010 e NBR 6122

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

13

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTACAS DE MADEIRA

Cravação

Cravação de estacas de madeira na Ria de S. Jacinto para sustentação de casa de apoio a cultura de ostras.

Fonte: AG Terraplanagens e Demolições

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

15

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTACAS DE MADEIRA

- Árvores mais utilizadas: Eucalipto, aroeira, peroba do campo (rosa);
- Sujeitas a alternâncias de secura e umidade, quase todas as madeiras são destruídas rapidamente (Costa, 1956; Tomlinson, 1994).
- o rebaixamento do lençol d'água para a execução de fundações e infraestruturas em terrenos vizinhos, ainda que temporário, pode comprometer a segurança de obras suportadas por estacas de madeira.

3.900 estacas de madeira (tipo eucalipto) justapostas preenchidas com geobags para proteção das resacas marítimas e da erosão na Praia do Canto do Morro das Pedras, Florianópolis.

Estacas de madeira (a) sem e (b) com reforço da ponta (ponteira)

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010 e NBR 6122

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

14

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

TIPOS DE ESTACAS

Classificação pela solicitação

$P \leq R_f + R_p$ (Atrito e ponta)
 $P \leq R_f$ (Atrito)
 $P \leq R_f + R_p$ (Flutuante)
 R_p desconsiderada (Flutuante)
 $P \leq R_p$ (Ponta)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

16

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

TIPOS DE ESTACAS

Mobilização progressiva

$$F = a \cdot R_L + b \cdot R_p$$

$a = 100\% \rightarrow$ recalques = 5 e 10 mm
 $b = 100\% \rightarrow$ recalques = 10% . ϕ (estacas cravadas)
 30% . ϕ (estacas escavadas)

$$R_L = U \cdot \Sigma(r_L \cdot \Delta L)$$

$$R_p = r_p \cdot A_p$$

U é o perímetro da estaca
A_p é a área da seção transversal da ponta ou base da estaca
 ϕ é o diâmetro

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

TIPOS DE ESTACAS

Classificação por processo executivo

Estacas Cravadas com Grande Deslocamento

Aquelas introduzidas no solo sem a retirada do solo, grande deslocamento do solo adjacente a estaca.
ex: Estacas pré-moldadas de concreto e madeira, Franki, Vibrex.

Estacas Cravadas com Pequeno Deslocamento

Também introduzidas no solo sem a retirada do solo, porém provocando um pequeno deslocamento do solo adjacente a estaca, estacas esbeltas.
ex: Estacas metálicas, mega.

Estacas Escavadas - Sem Deslocamento

Executadas no solo sem a retirada do solo adjacente a estaca. Não provocam assim nenhum deslocamento adjacente.
ex: Escavadas em geral: trado mecânico, broca (trado manual), **Hélice contínua**, Raiz, Injetada, Straus.

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

TIPOS DE ESTACAS

Grande deslocamento

- Moldadas "in-situ" cravando um tubo com ponta fechada para formar um vazio que é preenchido com concreto à medida que o tubo é retirado
- Pré-fabricadas: maciças ou ocas, fechadas na ponta, cravadas no terreno e deixadas em posição

Pequeno deslocamento

Vários sistemas

- Perfis metálicos, I, H, tubos abertos (desde que não haja embuchamento)
- Estacas aparafusadas

Sem deslocamento

O furo é executado por perfuração ou escavação; o furo é preenchido com concreto. As paredes da perfuração são:

- Não suportadas
 - Temporariamente
 - Por encamisamento
 - Permanente (por encamisamento)
- Suportadas
 - Temporariamente
 - Por lama
 - Permanente (por encamisamento)

Maciças: Madeira, Premoldadas de concreto
 Ocas (ponta fechada, cheias ou não, após a cravação): Tubulares de aço, Tubulares de concreto

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2002

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

GRANDE DESLOCAMENTO

Pré-moldadas de concreto/Madeira

Estacas pré-moldadas de concreto (seções transversais típicas): (a) quadrada maciça, (b) quadrada oca, (c) circular oca, e (d) octogonal oca

| Tipo de estaca | Dimensão (cm) | Carga (kN) | | Obs. |
|---------------------------------|---------------|------------|---------|---|
| | | axial | lateral | |
| Pré-moldada vibrada quadrada | 22 x 22 | 300 | 450 | Disponíveis até 8m. Podem ser emendadas. |
| | 25 x 25 | 450 | 600 | |
| | 30 x 30 | 600 | 900 | |
| Pré-moldada vibrada circular | φ 22 | 300 | 450 | Disponíveis até 10m. Podem ser emendadas. Podem ser furo central. |
| | φ 25 | 450 | 600 | |
| | φ 30 | 600 | 900 | |
| Pré-moldada protendida circular | φ 30 | 300 | 350 | Disponíveis até 12m. Podem ser emendadas. Podem ser furo central. |
| | φ 25 | 500 | 600 | |
| | φ 33 | 800 | 900 | |
| Pré-moldada centrífuga | φ 20 | 250 | 300 | Disponíveis até 12m. Podem ser emendadas. Com furo central (ocas) e paredes de 8 a 12 cm. |
| | φ 26 | 400 | 500 | |
| | φ 33 | 600 | 750 | |
| | φ 42 | 900 | 1150 | |
| | φ 60 | 1300 | 1700 | |

φ = tensão de trabalho (depende, naturalmente, da armadura e da qualidade do concreto)

Fonte: ALVES E LOPES, 2004, e APL Engenharia

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

GRANDE DESLOCAMENTO

Franki

Características das estacas tipo Franki

| | Diâmetro da estaca (mm) | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 300 | 350 | 400 | 450 | 520 | 600 | 700 |
| Volume de base (litros) | 90 | 180 | 270 | 360 | 450 | 600 | 600 |
| Mínima | 90 | 180 | 270 | 360 | 450 | 600 | 750 |
| Normal | 180 | 270 | 360 | 450 | 600 | 750 | 900 |
| Usual | 270 | 360 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1050 |
| Especial | 360 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1050 | |
| Carga de trabalho a compressão (kN) | | | | | | | |
| Usual | 450 | 650 | 850 | 1100 | 1500 | 1950 | 2600 |
| Máxima | 800 | 1200 | 1600 | 2000 | 2600 | 3100 | 4500 |
| Carga de trabalho a tração (kN) | | | | | | | |
| Usual | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 |
| Máxima | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 |
| Força horizontal máxima (kN) | | | | | | | |
| Usual | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 |
| Máxima | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 |

Fonte: ALVES E LOPES, 2004

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e de Fundações - Prof. Massao

21

21

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

MEDIÇÃO DE CRAVAÇÃO

Repique: Deslocamento elástico

Nega: valor do deslocamento permanente médio obtido nos 10 últimos golpes do processo de cravação.

Fórmulas dinâmicas

$$e_f \cdot W \cdot h = R_d \cdot s + EP$$

W: peso do martelo de cravação;
H: altura de queda do martelo de cravação;
R_d: resistência dinâmica do solo à cravação da estaca;
s: nega;
e_f: eficiência do martelo;
EP: energia perdida no impacto entre o martelo e a estaca.

$$R = \frac{R_d}{FC}$$

R: é a carga de trabalho da estaca;
FC: é o fator de correlação entre resistência dinâmica e comportamento estático.

Fonte: Aoki, 1986

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e de Fundações - Prof. Massao

23

23

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

GRANDE DESLOCAMENTO

Ômega

1. Displacement test advanced by constant displacement force control
2. After test requires desired depth, constant depth pressure through the test stem
3. Grouting continues to test to selected static resistance level
4. After test is removed, retaining is normal to full grout column

Fonte: Franki Foundation, 2020 e BERKEL APG-D (2022)

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e de Fundações - Prof. Massao

22

22

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

PEQUENO DESLOCAMENTO

Estacas metálicas

Caso real

superfície do terreno
terro
solo sedimentar
residual maduro
saprolito
rocha

SUPERFÍCIE RESISTENTE VARIÁVEL

Fonte: Infraestrutura Engenharia, 2022 e Aula Aoki COBRAMSEG 2018

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e de Fundações - Prof. Massao

24

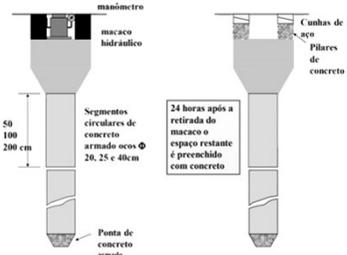
24

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

PEQUENO DESLOCAMENTO

Mega
Grande utilização em reforço estrutural

24 horas após a retirada do macaco o espaço restante é preenchido com concreto

Fonte: *Reforça Engenharia*, 2022

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

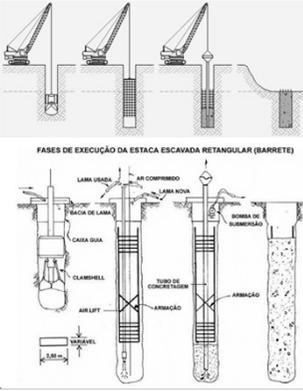
25

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

SEM DESLOCAMENTO

Barrete

FASES DE EXECUÇÃO DA ESTACA ESCAVADA RETANGULAR (BARRETE)



PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

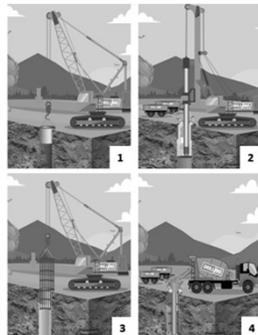
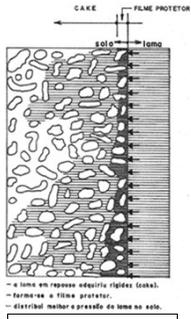
27

USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

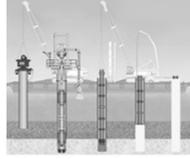
SEM DESLOCAMENTO

Estaca escavada
Pode utilizar fluidos estabilizantes (lama bentonítica), estacas de grande diâmetro

Atendendo padrões pode ser reutilizável

Escavação em rocha

Obra: Ponte sobre o Rio Orinoco

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

26

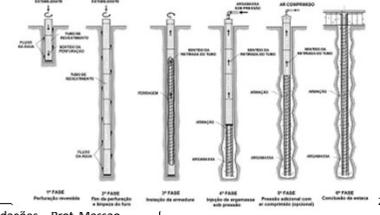
USP POLI USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia

SEM DESLOCAMENTO

Raiz
Utilização de argamassa e armadura ao longo de todo o comprimento



PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

28

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SEM DESLOCAMENTO

Strauss
Perfuração através de balde sonda, com uso parcial ou total de revestimento recuperável e posterior concretagem.

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 29

29

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

REFORÇO

Microestaca
Amplamente empregada para o reforço de fundações e proteção

Contenção em fachada na Avenida da Liberdade, Lisboa

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 31

31

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SEM DESLOCAMENTO

Hélice Contínua

Fonte: Soilmecc, 2022 e Dias, 2017

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 30

30

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SUMARIZAÇÃO

Tabela para anteprojeto e informacional

| TIPO DE ESTACA/ TUBULÃO | NÚMERO DE GOLPES DO "IMPENETRÁVEL" | OBSERVAÇÃO | CAPACIDADE DE CARGA | PRODUTIVIDADE | PROFUNDIDADE MÁXIMA | |
|--|------------------------------------|--|--|--------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Pré-moldada de concreto | $\phi < 30$ cm | 15 < N ≤ 25 | Cuidado com tensão de compressão ou tração excessiva na cravação | 25 a 170 tf | 50 m diários | 8 a 12 m, podendo ser emendadas |
| | $\phi \geq 30$ cm | 25 < N ≤ 35 | Cuidado com tensão de compressão ou tração excessiva na cravação | 25 a 170 tf | 50 m diários | 8 a 12 m, podendo ser emendadas |
| Perfil metálico | 25 < N ≤ 55 | Pode haver desvio na cravação | 20 a 200 tf | 50 m diários | 12 m, podendo ser emendada | |
| Strauss | 10 < N ≤ 25 | Nível d'água é limitante | 20 a 100 tf | 30 m diários | 20 a 25 m | |
| Franki | solo arenoso | 8 < N ≤ 15 | Cuidado com a transição de camadas moles | 60 a 400 tf | 40 m diários | Até 36 m |
| | solo argiloso | 20 < N ≤ 40 | Cuidado com execução em argila mole, pega | | | |
| Escavada/diafragma, sob lama bentonítica | 30 < N ≤ 80 | Cuidado com a limpeza do fundo da cava abastecimento de concreto e bota-fora, pega | 20 a 250 tf | 40 m diários | 35 m | |
| Tubulão | ar comprimido | 20 < N ≤ 60 | Cuidado com as normas de trabalho | 800 a 1000 tf | variável | 34 m abaixo do N.A. |
| | céu aberto | 20 < N ≤ 60 | Nível d'água é limitante | 150 a 1000 tf | variável | Limitado ao N.A. |
| Hélice contínua | 20 < N ≤ 45 | Abastecimento de concreto, bota-fora, solo mole | 25 a 390 tf | 150 a 400 m diário | até 30 m | |
| Ralz | N ≥ 60 (penetra na rocha sã) | Peculiaridades executivas, solo mole, pega | 10 a 180 tf | 30 m diários | - | |

Fonte: ABCP, 2008

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 32

32

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

SUMARIZAÇÃO

| ESTACAS | Tipo | Dimensões (cm) valor único e diâmetro | Carga de trabalho (kN) | eixo-eixo (cm) | divisa-estaca (cm) | borda-estaca (cm) | Comprimentos Disponíveis (m) | Vantagens | Desvantagens |
|---------|------------------------------|---|--|--|--|--|---------------------------------------|--|--|
| | Madeira | 15 a 30 | 100 a 300 | 60 | 30 | 20 | 3 a 15 | custo; durabilidade (abaixo do N.A.); resistência a esforços de tração e transporte | Apoiores acima do N.A.; necessidade de emendar cabças com concreto; baixas cargas; preço alto em zona urbana |
| | Pré-moldada de Concreto | 15x15 18x18 23x23 28x28 33x33 | 150 200 350 450 700 | 50 60 70 75 85 | 30 30 30 40 40 | 15 20 25 30 35 | 4 a 10 4 a 14 4 a 14 6 a 14 | Sem emenda praticamente qualquer solo (exceto com cascalhos grossos e matações); rapidez de execução; cargas variadas. | custo (em locais distantes dos grandes centros produtores); comprimento pré-determinado (mas permite emendas de boa qualidade); eventual dificuldade no transporte; vibração e ruído na cravação; peso dos elementos; necessidades de estocagem. |
| | Pré-Moldada de Concreto | 20 26 33 42 58 70 | 200 350 700 850 1200 1600 2500 | 50 60 70 90 100 125 150 175 | 30 30 30 35 40 40 40 40 | 20 20 20 20 20 20 20 | idem | idem; peso menor; concreto de melhor qualidade. | Idem, mas com custo um pouco maior. |
| | Perfis de aço | composição de perfil 1 ou C3; 25 possíveis; eixos | ~ 100 x 10 ³ kPa para aço ASTM A36 / MR-250 | variável | | | 20 a 30 | qualquer solo (exceto com matações); grande resistência para cravação e transporte; fácil emenda (solda). | Custo; conexão quando no solo acima do NA ou em lâmina d'água. |
| | Brocas | 20 25 30 | 40 60 80 | 60 70 80 | 25 20 25 | 20 20 25 | 3 a 6 | Fácil execução | Qualidade do concreto inviável abaixo do N.A. em areias e siltes, bem como em argilas orgânicas moles |
| | Escavadas com trado mecânico | 25 30 35 | 150 250 350 | 75 90 105 | 25 30 35 | 25 30 35 | 3 a 11 | comprimento variável | cargas muito baixas |
| | Tipo "Strauss" | 32 38 45 55 | 200 300 400 600 | 80 90 115 135 | 20 25 30 30 | 20 25 30 30 | máx. 15 a 20m, depende do equipamento | Custo; qualidade do concreto | risco de lavagem do concreto; risco de estrangulamento de fuste; Argilas orgânicas moles |
| | Tipo Franki Standard | 32 40 50 60 70 | 100 130 170 190 200 | 100 120 150 180 210 | 60 60 80 80 45 | 30 35 40 40 45 | 5 a 15 5 a 30 5 a 30 5 a 30 | Comprimento variável; Boa qualidade do concreto; Grandes cargas; (incl. não resistir); Atravessa solos resistentes | vibrações elevadas e ruído; risco de secionamento do fuste em argilas orgânicas moles, bem como em argilas duras. |

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

EFEITO DE GRUPO

Processo de interação entre as diversas estacas ou tubulões constituintes de uma fundação quando transmitem ao solo as cargas que lhes são aplicadas

"A carga admissível ou força resistente de cálculo de um grupo de estacas ou tubulões não pode ser superior à de uma sapata hipotética definida da seguinte forma: a sapata teria contorno igual ao do grupo e estaria apoiada numa cota superior à da ponta das fundações, sendo a diferença de cotas igual a 1/3 do comprimento de penetração das fundações na camada de suporte." (NBR6122:2019)

Equations for Group Efficiency of Friction Piles

| Name | Equation |
|---|--|
| Concrete-Larson equation | $\eta = 1 - \left[\frac{(n_p - 1)n_p}{90n_p} \right]$ |
| En Angles Group Action equation | $\eta = 1 - \frac{D}{90n_p} [n_p(n_p - 1)]$ |
| Solomon-Kennedy equation (Solner and Kennedy, 1944) | $\eta = \left[1 - \frac{11d}{3(d-1)} \frac{n_p + n_p - 2}{n_p + n_p} \right] + \frac{0.3}{n_p + n_p}$ |

Fonte: DAS, 2011 e VELLOSO E LOPES, 2010

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

SUMARIZAÇÃO

| ESTACAS | Tipo | DIMENSÕES (cm) | CARGA DE TRABALHO (kN) | COMPRIMENTOS DISPONÍVEIS (m) | ALGUMAS VANTAGENS | ALGUMAS DESVANTAGENS |
|---------|---|---|---|---|---|---|
| | Helice contínua | Diâmetro 30 a 100 | 40 a 400 | Até 24 m | - Fácil execução; - Alta produtividade; - Não causa vibração; - Serve para quase todos os tipos de terreno (exceto com cascalhos grossos e matações) | - Requer equipamento especial só disponível nas metrópoles; - Riscos executivos maiores em argilas orgânicas muito moles; - Dificuldade para descer armações (em especial as muito compridas) |
| | Pré-moldada de Concreto | Diâmetro 10 a 40 | Estimada admitindo-se $\sigma_{adm} = 10 \times 10^3$ kPa (concreto simples) | Função do equipamento de perfuração (há notícias de ser possível atingir até 100 m) | Cargas elevadas Qualquer tipo de solo e rocha. Serve também (principalmente) para serviços de sub-fundação, reforços. | Custo muito alto, difícil controle de qualidade (risco de redução da reação da ponta). Exige equipamentos especiais e operadores qualificados. |
| | Estacas escavadas mecanicamente (abaixo do N.A com auxílio de lama bentonítica) | Circular (estaca), diâmetro de 60 a 250 | Calculada admitindo-se $\sigma_{adm} = 4 a 5 \times 10^3$ kPa (carga de 800 a 20000 kN) | Função do equipamento de perfuração (há notícias de ser possível atingir até 60 m) | Alta carga de trabalho | Custo alto, controle rigoroso de execução para minimizar riscos de comportamento instabilizante (em especial, redução da reação da ponta). |
| | Estacas "Barrete" | Retangular 40 x 150 60 x 250 50 x 150 70 x 250 30 x 250 80 x 250 40 x 250 100 x 250 | Idem acima, cargas até 12500 kN | Idem acima | Idem acima, utiliza os equipamentos para paredes "diagrama, permitindo "sinergia" quando há tais paredes na obra. | Idem acima e maior dificuldade para atravessar "solos difíceis". |
| | TUBULÕES | | | | | |
| | A céu aberto | 60 cm (mínimo p/ escavação mecanizada); 70 cm p/ escavação manual | Calculada admitindo-se $\sigma_{adm} = 4 a 5 \times 10^3$ kPa (concreto simples) | - Mínimo 4 m - Máximo é função do perfil do subsolo | Custo baixo; logística e equipamento; alta carga de trabalho; permite atravessar qualquer solo ou rocha acima do NA. | Condições geotécnicas (solos pouco coesivos, NA em solos muito permeáveis). Execução muito artesanal. |
| | A ar comprimido | Externo: 120 cm mínimo (corresp. a 80cm interno) | $\sigma_{adm} = 6 a 10 \times 10^3$ kPa (cargas de 5000 a 12000 kN) | Mínimo - 6m; Máximo - 25 m abaixo do N.A. | Serve para qualquer tipo de solo ou rocha e atravessa qualquer obstáculo. | Custo muito alto. Condições de segurança do trabalho muito restritas para controlar risco. Produtividade baixa. |

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

EFEITO TSCHBOTARIOFF

Aterro
Forças horizontais
Forças verticais
Camada compressível
Solo resistente

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PROJETO GEOMÉTRICO

Geometria comum para um grupo de estacas

3 pile 4 pile 5 pile 6 pile
7 pile 8 pile 9 pile
10 pile 11 pile 12 pile

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 37

37

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO DA EFICIÊNCIA

Regra de Feld
Reduz a capacidade de carga em 1/16 para cada estaca adjacente

$\eta = 16/16 - x/16 = 16/16 - 3/16 = 81,25\%$

Converse-Labarre

$$\eta = 1 - \theta \cdot \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \right]$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{B}{S} \right)$$

$n = 6$
 $m = 4$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 39

39

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PROJETO GEOMÉTRICO

- Compatibilização entre o C.G. do pilar e do bloco de estacas;
- Mesmo tipo de diâmetro no bloco;

Estacas pré-moldadas
 $d_{min} = 2,5 \cdot \varnothing_{estaca}$

Estacas in loco
 $d_{min} = 3,0 \cdot \varnothing_{estaca}$

Distância da borda do bloco
 $c \cong \frac{\varnothing_{estaca}}{2} + 15 \text{ cm}$

$$n^{\circ}estacas = \frac{P_d}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

→ Eficiência (Regra de Feld /Converse-Labarre)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 38

38

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PROJETO GEOMÉTRICO

Pilares Isolados

$$n^{\circ}estacas = \frac{P_d}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

Pilares associados

$$n^{\circ}estacas = \frac{P1_d + P2_d}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

Pd: carga estrutural de cálculo
Q_{adm}: capacidade de carga geotécnica da estaca
R_{adm}: capacidade de carga estrutural da estaca
η: eficiência

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 40

40

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PROJETO GEOMÉTRICO

Pilares alavancados

Excentricidade
 $e = a - \frac{b_{01}}{2} - f$

Equações de equilíbrio

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{P2} = 0 \rightarrow P_1 \cdot l - R_1 \cdot (l - e) = 0 \\ \sum V = 0 \rightarrow P_1 + P_2 - R_1 - R_2 = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} R_1 &= \frac{P_1 \cdot l}{l - e} \\ R_2 &= P_1 + P_2 - R_1 \end{aligned}$$

$\Delta P = R_1 - P_1$
 $R_2 = P_2 - \Delta P$
 $R_{2,d} = P_2 - \frac{\Delta P}{2}$

Pilares alavancados

$$n^{\circ}_1 = \frac{R_1}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta} \quad n^{\circ}_2 = \frac{P_2 - \Delta P / 2}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 41

41

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

MOMENTO EM ESTACAS

$$R_{est,j} = \frac{P_d}{n_e} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x_i^2}$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 43

43

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PROJETO GEOMÉTRICO

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 42

42

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Sugestões de leitura

- DAS, B., 2011, Principles of Foundation Engineering, Capítulo 11;
- CINTRA, J. C. A. e AOKI, N., 2010, Fundações por estacas projeto geotécnico;
- VELLOSO, D. A. e LOPES, F. R., 2011, FUNDAÇÕES, capítulos 10 e 11

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 44

44