

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

6

8

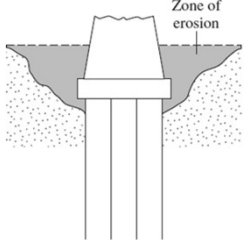
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

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)

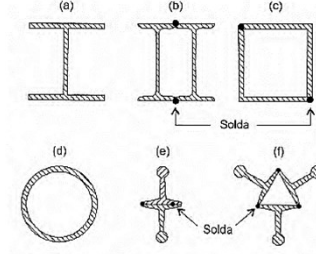

9

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

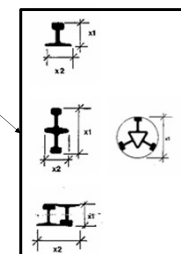
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP


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
Beneficiar 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	H 200 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 250 mm	59,0	1000
	H 300 mm	73,0	1200
	H 350 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-50	152,4	136,5	68,2	14,3
	TR-57	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, dispensam 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

$P \leq R_f + R_p$
 $P \leq R_f$
 $P \leq R_f + R_p$ desconsiderada
 $P \leq R_p$

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, Strauss.

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	25 x 25	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 28	500	600	
	φ 33	700	800	
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 circular	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

saprólito

rocha

SUPERFÍCIE RESISTENTE VARIÁVEL

Fonte: Infraestrutura Engenharia, 2022 e Aula Aoki COBRAMSEG 2018

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

24


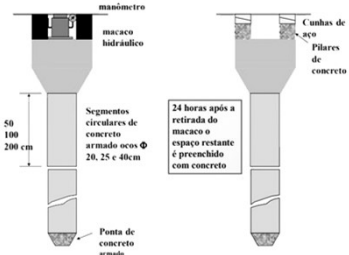
24

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


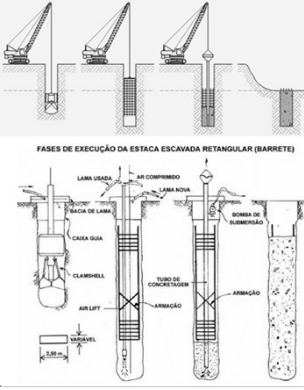
25

USP POLI USP

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

SEM DESLOCAMENTO

Barrete

CLAMSHELL

FASES DE EXECUÇÃO DA ESTACA ESCAVADA RETANGULAR (BARRETE)

1. LAMA USADA
2. LAMA NOVA
3. BOMBA DE SUÇÃO
4. AR COMPRIMIDO
5. AR LIFT
6. ARMAÇÃO

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


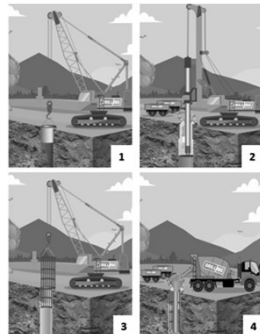
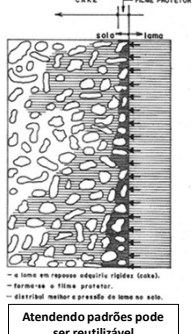
27

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

Obra: Ponte sobre o Rio Orinoco

Atendendo padrões pode ser reutilizável

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


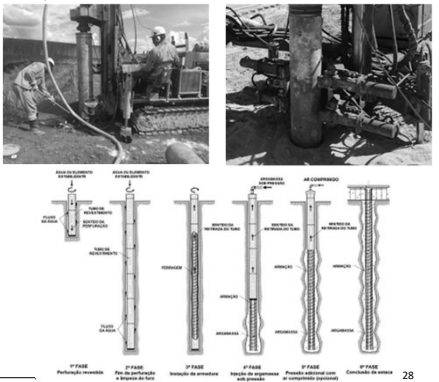
26

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

1. FASE: Partição com o CLAMSHELL
2. FASE: Põe de partida a Bateria de Raiz
3. FASE: Injeção de argamassa
4. FASE: Passada a armadura ao longo do comprimento
5. FASE: Conclusão da obra

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 1300 2500	50 60 70 90 125 175	30 30 35 40 40 40	20 20 20 25 30 30	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; corrosão 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	35 40 52 60 70	50 70 130 170 200	100 120 150 180 210	60 60 80 80 85	30 35 40 40 45	5 a 15 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 seccionamento 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."

Equations for Group Efficiency of Friction Piles

Name	Equation
Converse-Ladd equation	$\eta = 1 - \left[\frac{(n_p - 1) \alpha_p (n_p - 1) \alpha_p}{90 n_p} \right]$ where $\alpha_p (\text{deg}) = \tan^{-1} (0.04/d)$
Em Angles Group Action equation	$\eta = 1 - \frac{d}{90 n_p} [n_p (n_p - 1) + n_p (n_p - 1) + \sqrt{n_p (n_p - 1) (n_p - 1)}]$
Solomon-Kennedy equation (Solner and Kennedy, 1944)	$\eta = \left[1 - \frac{11d}{7(d-1)} \frac{n_p + n_p - 2}{n_p + n_p - 1} \right] + \frac{0.3}{n_p + n_p}$ where d is in ft

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 (concreto simples)	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 N.A. Execução muito artesanal.	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.	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 $n^{\circ}estacas = \frac{P1_d + P2_d}{Q_{adm} \text{ ou } R_{adm}} \cdot \frac{1}{\eta}$

P_d : 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

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

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