

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

### Aula 6. Dimensionamento de Estacas

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

### Programa da aula

- Capacidade de carga de fundações em estacas;
  - Métodos teóricos;
  - Métodos semiempíricos;
  - Fórmulas dinâmicas.
- Prova de carga estática (PCE)
- Controle de execução.
- Grupo de Estacas;
- Estacas sob carregamentos especiais.

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

### Revisão – Tipos de estacas

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

### Revisão – Tipos de estacas

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

### Revisão – Tipos de estacas

**9. Ômega**

**10. Estação**

**11. Raiz**

**12. Barrete**

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

### Capacidade de carga

Considerando uma estaca qualquer de comprimento L:

- (A) Mobilização do atrito lateral**
  - $P < P_1$ : Mobilização parcial para cada segmento da estaca (características geotécnicas das camadas e profundidade);
  - $P = P_1$ : Mobilização máxima do atrito lateral.
- (B) Mobilização da resistência de ponta**
  - $P = P_2$ : Mobilização máxima da resistência de ponta.

Iminência de se deslocar incessantemente para baixo.  
 **$P_2 \rightarrow$  Capacidade de carga do elemento de fundação**

Nesse caso, ruptura nítida. Há também ruptura física e ruptura convencional ( $\rho = 0,1\theta \rightarrow$  PCE)

Adaptado de Cintra e Aoki (2010)

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

### Capacidade de carga

Capacidade de carga axial

Métodos teóricos

Métodos empíricos

Métodos semiempíricos

Métodos estáticos

Fórmulas dinâmicas

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

### Métodos estáticos • Equilíbrio:

$$Q_{ult} + W = Q_{p,ult} + Q_{l,ult}$$

$Q_{ult}$  = capacidade de carga total da estaca;  
 $W$  = peso próprio da estaca  $\rightarrow$  Normalmente desprezado  
 $Q_{p,ult}$  = capacidade de carga da ponta;  
 $Q_{l,ult}$  = capacidade de carga do fuste (atrito lateral).

$$Q_{ult} = Q_{p,ult} + Q_{l,ult}$$

$$Q_{ult} = A_b \cdot q_{p,ult} + U \sum \tau_{l,ult} \cdot \Delta l$$

$A_b$  = área da base;  
 $q_{p,ult}$  = resistência de ponta unitária;  
 $U$  = perímetro da estaca;  
 $\tau_{l,ult}$  = resistência lateral unitária;  
 $\Delta l$  = trecho em que  $\tau_{l,ult}$  se aplica.

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

### Métodos teóricos

- Diversas tentativas não eficazes para equacionar a ruptura para fundações profundas;
- Uso com cautela das formulações teóricas para previsão de capacidade de carga.

Ruptura das diversas soluções teóricas: (a) Terzaghi; (b) De Beer, Jáky e Meyerhof; (c) Vesic; (d) Skempton, Yassin e Bishop. [Adaptado de 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

### Métodos teóricos

**Método α:**

- Enfoque em tensões totais
- Atrito lateral unitário tem relação com a resistência não drenada:  $\tau_{l,ult} = \alpha \cdot S_u$

$\alpha \rightarrow$  Curvas de Tomlinson (1957,1994). Levam em conta a consistência da argila e a natureza da camada sobrejacente.

**Método β:**

- Enfoque em tensões efetivas;
- Burland (1973): “uma vez que a zona de maior distorção em torno do fuste é delgada, o carregamento ocorre em condições drenadas”.  $\tau_{l,ult} = \sigma'_h \tan \delta$
- $\sigma'_h$  – tensão horizontal efetiva que atua na estaca;
- $\delta$  – ângulo de atrito efetivo entre a argila e o fuste.
- Sabendo que  $\sigma'_h = K \cdot \sigma'_{vo}$   $\tau_{l,ult} = K \cdot \sigma'_{vo} \cdot \tan \delta$
- $\tau_{l,ult} = \beta \cdot \sigma'_{vo} \rightarrow \beta = K \tan \delta$

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

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

### Métodos teóricos

#### Resistência de ponta em areias puras

- A resistência de ponta na iminência de ruptura pode ser interpretada como a capacidade de carga de uma fundação direta de mesma base.
- Algumas considerações resultam em:  $R_p = q^* \cdot N_q^* \cdot A_p$

$q^*$  - Sobrecarga máxima;  
 $N_q^*$  - Fator de capacidade de carga;  
 $A_p$  - Área da ponta.

Para  $\phi = 40^\circ$ :  $N_q^* < 100$  para Terzaghi (1943) e  $N_q^* \approx 1000$  para De Beer (1945).

Descrédito da utilização de fórmulas teóricas

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

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

### Métodos semiempíricos

**Baseados no CPT**

- Semelhança entre a estaca e o ensaio de cone;
- Para solos arenosos (Kérisel, 1961; Vesic, 1963 e 1965)  $\rightarrow$  **Efeitos de escala;**
- Não foram observados efeitos de escala para argilas rijas e siltes fofos (observados nas argilas duras).

Interpretação do ensaio de cone segundo De Beer: mecanismos de ruptura do cone e de uma estaca com a mesma penetração numa camada resistente [Adaptado de Velloso e Lopes, 2010]

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

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

### Métodos semiempíricos → CPT

**Método de De Beer (1971 – 1972)**

- Interpretação do perfil do ensaio de cone.

Perfis de resistência de ponta do cone e de uma estaca, segundo De Beer [Adaptado de Velloso e Lopes, 2010].

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

13

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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Aoki-Velloso (1975)**

- Da condição de equilíbrio (Slide 6), tem-se:

$$Q_{ult} = Q_{p,ult} + Q_{l,ult}$$

$$Q_{ult} = A_b \cdot q_{p,ult} + U \sum \tau_{l,ult} \cdot \Delta l \rightarrow \text{Em que } q_{p,ult} \text{ e } \tau_{l,ult} \text{ são as variáveis geotécnicas.}$$

Inicialmente, as variáveis foram correlacionadas com os valores de resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) e do atrito lateral unitário ( $f_s$ ) → Cone mecânico.

$$q_{p,ult} = \frac{q_c}{F_1} \rightarrow \text{Em que } F_1 \text{ é fator de correção para efeito de escala.}$$

$$q_{l,ult} = \frac{f_s}{F_2} \rightarrow \text{Em que } F_2 \text{ é fator de correção para influência do tipo de estaca.}$$

Para correlacionar com  $N_{SPT}$  foram introduzidos o coeficiente K, que depende do tipo de solo, e a razão de atrito ( $\alpha$ ):

$$q_c = K \cdot N_{SPT}$$

$$f_s = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT}$$

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

14

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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Aoki-Velloso (1975)**

Com as correlações com SPT, tem-se:

$$q_{p,ult} = \frac{K \cdot N}{F_1} \rightarrow Q_{ult} = A_b \frac{K \cdot N}{F_1} + \frac{U}{F_2} \sum \alpha \cdot K \cdot N \cdot \Delta l$$

$$q_{l,ult} = \frac{\alpha \cdot K \cdot N}{F_2}$$

Fatores  $F_1$  e  $F_2$  [Adaptado de Cintra e Aoki (2010)]

Tipo de estaca	$F_1$	$F_2$
Franki	2,50	$2F_1$
Metálica	1,75	$2F_1$
Pré-moldada	$1+D[m]/0,80$	$2F_1$
Escavada	3,0	$2F_1$
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	$2F_1$

Coefficiente K e razão de atrito

Tipo de solo	k (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\alpha$ (%)
Areia	10,0	1,4%
Areia Siltosa	8,0	2,0%
Areia silto-argilosa	7,0	2,4%
Areia argilosa	6,0	3,0%
Areia argilo-siltosa	5,0	2,8%
Silte	4,0	3,0%
Silte arenoso	5,5	2,2%
Silte areno-argiloso	4,5	2,8%
Silte argiloso	2,3	3,4%
Silte argilo-arenoso	2,5	3,0%
Argila	2,0	6,0%
Argila arenosa	3,5	2,4%
Argila areno-siltosa	3,0	2,8%
Argila siltosa	2,2	4,0%
Argila silto-arenosa	3,3	3,0%

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

15

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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Décourt-Quaresma (1978, 1982)**

- Da condição de equilíbrio (Slide 6), tem-se:

$$Q_{ult} = Q_{p,ult} + Q_{l,ult}$$

$$Q_{ult} = A_b \cdot q_{p,ult} + U \sum \tau_{l,ult} \cdot \Delta l \rightarrow \text{Em que } q_{p,ult} \text{ e } \tau_{l,ult} \text{ são as variáveis geotécnicas.}$$

Para o método de Décourt-Quaresma (1978, 1982), a variação do solo ao longo do fuste é considerada apenas na média do  $N_{SPT}$ , ou seja, o atrito lateral unitário representa o fuste por inteiro:  $Q_{ult} = A_b \cdot q_{p,ult} + U \cdot \tau_{l,ult} \cdot \Delta L$

Para o atrito lateral, tem-se:

$$\tau_{l,ult} = 10 \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) \text{ [kPa]}$$

$N_L$  – Média do  $N_{SPT}$  ao longo do fuste

- $3 \leq N_{SPT} \leq 50$
- Para estaca Strauss e tubulão a céu aberto:  $3 \leq N_{SPT} \leq 15$
- Não considera os  $N_{SPT}$  usados para cálculo da 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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Décourt-Quaresma (1978, 1982)**

- Para a resistência de ponta, tem-se:

$$Q_{p,ult} = C \cdot N_p$$

C – Coeficiente característico do solo

$N_p$  – Valor médio do  $N_{SPT}$  na ponta (considera o  $N_{SPT}$  na cota da ponta, o imediatamente superior e o imediatamente inferior).

Valores do coeficiente C

Tipo de solo	C [kPa]	
	Estaca cravada	Estaca escavada
Argila	120	100
Silte argiloso	200	120
Silte arenoso	250	140
Areia	400	200

[Adaptado de Velloso e Lopes (2010); Cintra e Aoki (2010)]

Então, a carga total de ruptura é:

$$Q_{ult} = A_b \cdot C \cdot N_p + U \cdot \Delta L \cdot 10 \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right)$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 17

17

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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Décourt-Quaresma (1978, 1982)**

- Considerações sobre coeficientes de segurança:

$$F = F_p \cdot F_f \cdot F_d \cdot F_w$$

Os coeficiente são relativos a:

- $F_p$  – parâmetros do solo [1,1 para  $Q_L$  e 1,35 para  $Q_p$ ];
- $F_f$  – formulação adotada [ $F_f = 1,0$ ];
- $F_d$  – evitar recalques excessivos [1,0 para  $Q_L$  e 2,5 para  $Q_p$ ];
- $F_w$  – carga de trabalho da estaca [ $F_w = 1,2$ ].

O produto dos coeficientes resulta em:

$$F_{ponta} \approx 4,0 \text{ e } F_{atrito} \approx 1,3$$

$$Q_{adm} = \frac{Q_{p,ult}}{4,0} + \frac{Q_{L,ult}}{1,3}$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 18

18

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

### Métodos semiempíricos → SPT

**Método Décourt-Quaresma (1978, 1982)**

- Contribuição de Décourt (1996) →  $Q_{ult} = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot \Delta L$

Valores de  $\alpha$

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Escavada (geral)	Escavada (bentonita)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões	
Argila	0,85	0,85	0,3	0,85	1,0	
Solos intermediários	0,6	0,6	0,3	0,6	1,0	
Areia	0,5	0,5	0,3	0,5	1,0	

Valores de  $\beta$

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Escavada (geral)	Escavada (bentonita)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões	
Argila	0,8	0,9	1,0	1,5	3,0	
Solos intermediários	0,65	0,75	1,0	1,5	3,0	
Areia	0,5	0,6	1,0	1,5	3,0	

[Adaptado de Cintra e Aoki (2010)]

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 19

19

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

### Fórmulas dinâmicas

- A estimativa da capacidade de carga da estaca é feita com base na observação da sua resposta à cravação;
- De maneira geral:

$$Q_{trab} = \frac{R}{F}$$

Em que R é a resistência à cravação e F é o coeficiente de correção [2 a 10 – depende da fórmula]

- As primeiras fórmulas dinâmicas baseavam-se no princípio de conservação da energia.

$$W \cdot h = R \cdot s$$

Sendo: W – Peso do martelo;  
h – Altura de queda;  
s – Penetração da estaca (ou **nega**).

**Perdas de energia!!**

- Atrito do martelo nas guias;
- Atrito dos cabos;
- Repique do martelo;
- Def. elástica do cepo e do coxim [ $c_c$ ];
- Def. elástica da estaca [ $c_s$ ];
- Def. elástica do solo [quake –  $c_s$ ].

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 20

20

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

### Fórmulas dinâmicas

- Incorporação das perdas de energia:  $\eta Wh = Rs + X$

Em que:  $\eta$  – Fator que representa as perdas de energia no bate-estacas (ou no martelo);

$X$  – Perdas de energia no choque e nas deformações elásticas.

- Incorporação da Lei do Choque de Newton  $\rightarrow$  A perda de energia no choque entre dois corpos é dada por:

$$\frac{(1 - e^2)M_1M_2(v_1 - v_2)^2}{2(M_1 + M_2)}$$

Em que:  $P$  – peso da estaca;

$e$  – coeficiente de restituição no choque.

$$X = \frac{(1 - e^2)WPh}{W + P}$$

Para  $\eta = 0$ :

$$\frac{W + e^2P}{W + P} Wh = Rs$$

Considerando corpo 1 = martelo e corpo 2 = estaca:  
 $M_1 = W/g$ ;  $M_2 = P/g$ ;  $v_1 = \sqrt{2gh}$ ;  $v_2 = 0$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 21

21

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

### Fórmulas dinâmicas

Fórmula de Janbu (1953)

$$Rs = \frac{Wh}{C' \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C'}} \right)}$$

onde:  $C' = 0,75 + 0,15 \frac{P}{W}$  e  $\lambda = \frac{WhL}{AE_p S^2}$

$A$  – área da seção transversal da estaca;

$E_p$  – módulo de Young do material da estaca;

$L$  – comprimento da estaca;

$\rightarrow$  Autor recomenda  $F = 2$ .

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 22

22

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

### Prova de Carga Estática

- ABNT NBR 6122:2019: "É obrigatória a execução de provas de carga estáticas de desempenho [...] em obras que tiverem um número de estacas superior ao valor especificado na coluna (B) da Tabela 6".
- 1% do número total de estacas (arredondado para cima), com pelo menos 1 prova de carga.
- Pode ser feito ensaio de carregamento dinâmico (PDA) na proporção 1 PCE : 5 PDA
- Estaca Piloto x Estacas da obra

Perde uma estaca, mas a PCE é feita antes do projeto geotécnico.

Tipo de estaca	A Tensão de trabalho abaixo da qual não serão obrigatórias provas de carga, desde que o número de estacas da obra seja inferior à coluna (B), em MPa $\sigma_{td}$	B Número total de estacas da obra a partir do qual serão obrigatórias provas de carga $n \geq n_0$
Pré-moldada *	7,0	100
Madeira	–	100
Aço	0,5 $f_{yk}$	100
Hélice, hélice de deslocamento, hélice com trado segmentado (monitoradas)	5,0	100
Estacas escavadas com ou sem fluido $\phi \geq 70$ cm	5,0	75
Raz * ≤ $\phi$ 310 mm – 15,0 ≥ $\phi$ 400 mm – 13,0		75
Microestaca *	15,0	75
Trado vazado segmentado	5,0	50
Franki	7,0	100
Escavadas sem fluido $\phi < 70$ cm	4,0	100
Strauss	4,0	100

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 23

23

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

### Prova de Carga Estática

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 24

24

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

### Prova de Carga Estática

Polido *et al* (2019). Capacidade de Carga Geotécnica de Estacas de Perfil Metálico com Base em Provas de Carga à Compressão. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9, São Paulo.

→ Estacas em perfil metálico: HP 250X62

**EPM5:** L=16m; Ponta em argila marinha mole ( $N_{SPT} = 1$ );

**EPM4:** L=23,5m; Ponta em argila mole ( $N_{SPT} = 4$ ); Instrumentada em profundidade.

**Resumo de Resultados:**

- $P_{RUP} = 1100 \text{ kN}$
- $P_1 = 1033 \text{ kN}$  (94%)
- $P_p = 67 \text{ kN}$  (6%)
- $P_{RUP} = 830 \text{ kN}$

25

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

### Prova de Carga Estática

Polido *et al* (2019). Capacidade de Carga Geotécnica de Estacas de Perfil Metálico com Base em Provas de Carga à Compressão. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9, São Paulo.

#### Métodos de cálculo x Prova de Carga

Método	Resistência total		Atrito lateral	
	PR (kN)	PR / PR <sub>PCl</sub>	PL (kN)	PL / PL <sub>PCl</sub>
<b>Prova de Carga Instrumentada</b>	<b>1100</b>	-	<b>1033</b>	-
Decourt e Quaresma (1982) mod. Decourt (1996)	1092	1,0	1057	1,0
Aoki e Velloso (1975) mod. por Monteiro (1997)	1137	1,0	1046	1,0
Teixeira (1996)	974	0,9	941	0,9

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

26

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

### Prova de carga instrumentada

Sondagem instrumentada

**Armadura** **Tubos**

Danilo França – Dissertação de mestrado EPUSP – 2011

27

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

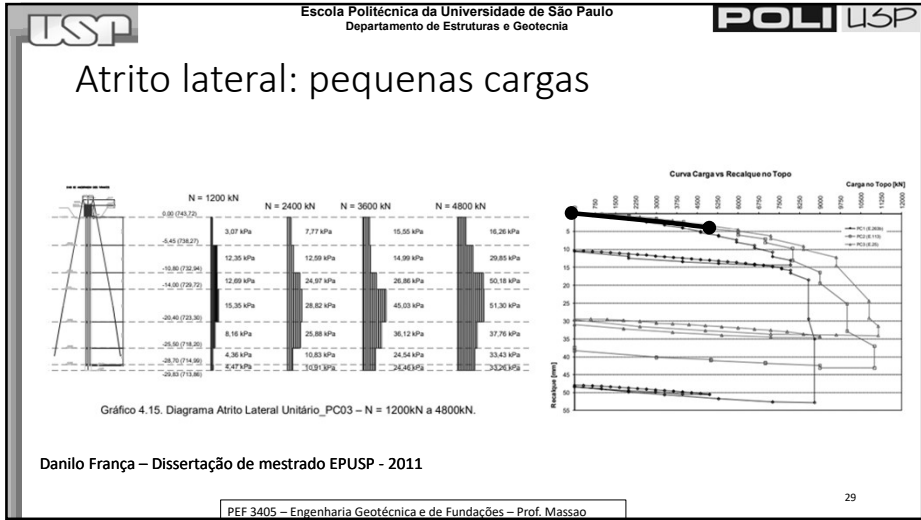
### Transferência de carga

**Curva Carga vs Recalque no Topo**

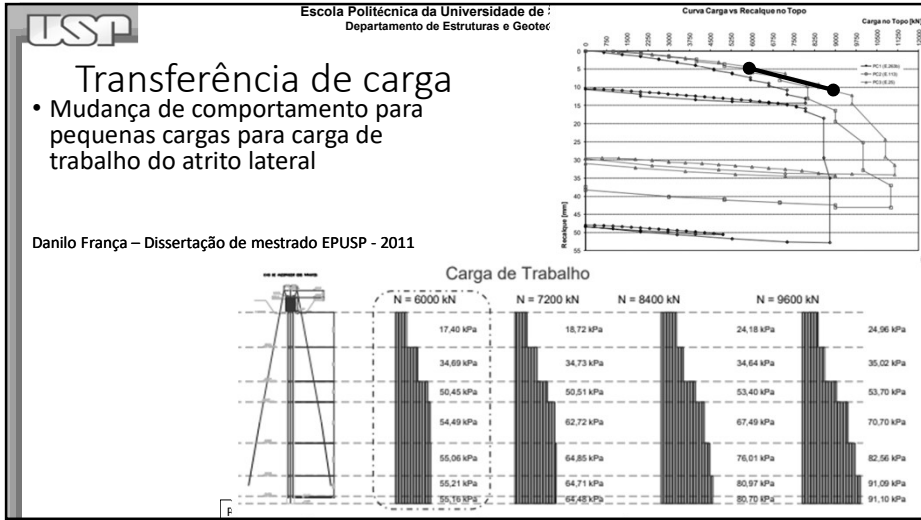
**Diagrama de Transferência de Carga PC 3 (E25)**

Danilo França – Dissertação de mestrado EPUSP – 2011

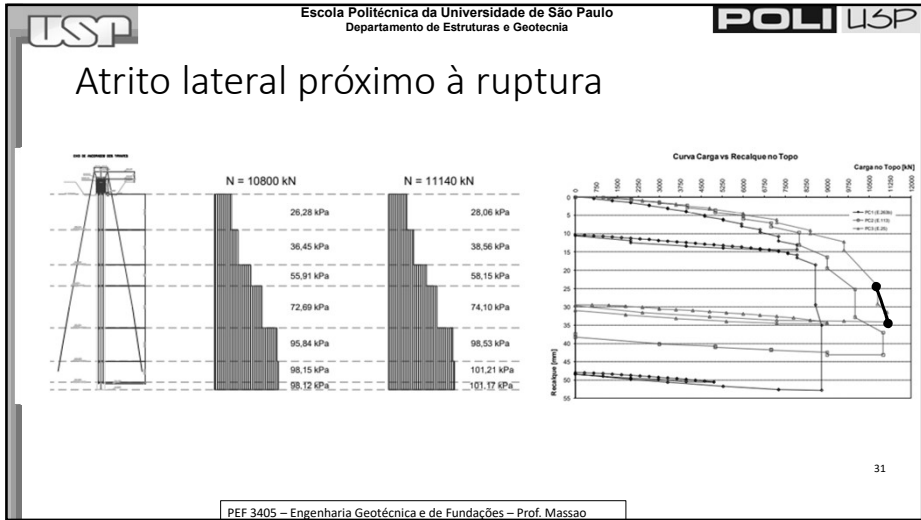
28



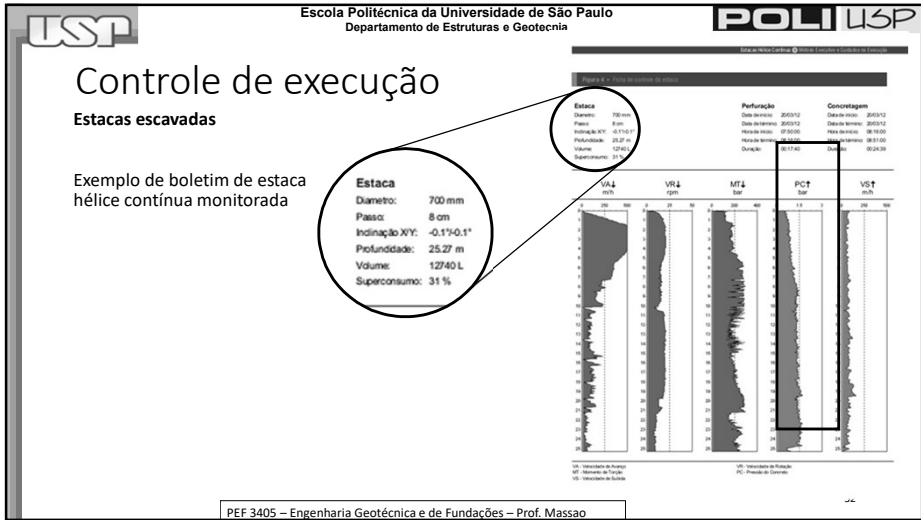
29



30



31



32



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

## Controle de execução

**Estacas cravadas**

- Nega → Medida de penetração permanente de uma estaca. Em geral medida por uma série de 10 golpes.
- Repique elástico → Parcela elástica da penetração de uma estaca.

K → Repique elástico;  
S → Nega;  
C<sub>2</sub> → Deformação elástica da estaca;  
C<sub>3</sub> → Deformação elástica do solo [quake]

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 33

33

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

## Controle de execução

Repique elástico <sup>LB2</sup>

[https://www.youtube.com/watch?v=MvFd2ShjR1s&ab\\_channel=SCACSolu%C3%A7%C3%B5esemEstruturaseEngenharia](https://www.youtube.com/watch?v=MvFd2ShjR1s&ab_channel=SCACSolu%C3%A7%C3%B5esemEstruturaseEngenharia)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 34

34

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

## Controle de execução

**Exemplo de boletim de cravação de estaca em perfil metálico**

ESTACA: 114 REPIQUE ELÁSTICO 2, 3

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 35

35

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

## Grupos de estacas

- Ligação estrutural no topo → bloco de coroamento
- Efeito de grupo

Massa de solo mobilizada pelo carregamento (a) de uma estaca isolada; (b) de um grupo

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 36

36

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

### Estaca sob carregamentos especiais - tração

- Típico das torres de transmissão → Arrancamento nas fundações [Estrutura leve; vento na estrutura; vento nos cabos; eventual ruptura]

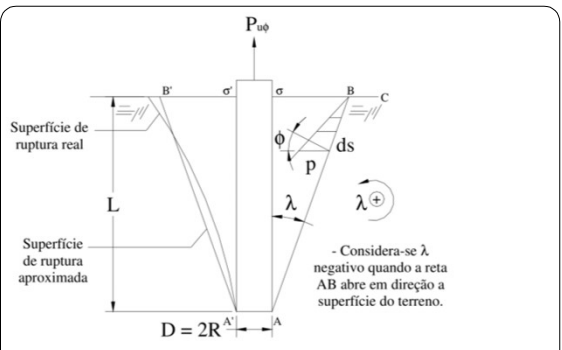



PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 37

37

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

### Mecanismo de ruptura de estacas solicitadas à tração



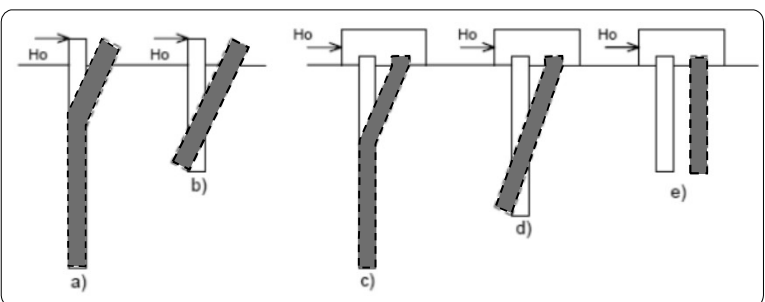
Distribuição das tensões devidas ao atrito (BIAREZ e BARRAUD, 1968)

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

### Estacas carregadas horizontalmente



- Formas de ruptura

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

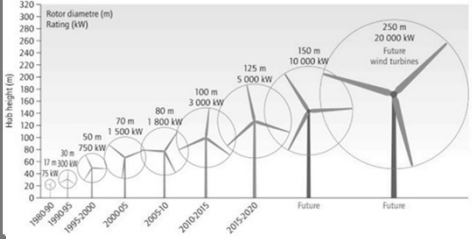
39

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

### Estaca sob carregamentos especiais - esforço horizontal e momentos fletores

- Típico de fundação de torres eólicas *onshore* e *offshore*

Previsão publicada pela EWEA em 2009:



Estruturas extremamente altas → carregamentos de vento incidentes transversalmente aos aerogeradores provocam esforços de momento elevadíssimos no bloco de fundações.

Exemplo: Aerogerador de 120 metros de altura com pá de 58 metros: **M = 150 MN.m !!!**

**Março, 2019:**  
GE anunciou uma torre eólica com 5,3MW de potência com pás de 77m (Diâmetro do rotor = 154m) e 160m de altura.

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

**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

41

41