Capacidade de Carga - Estacas

Modelo de Ruptura Estaca – Solo

Um grupo de estacas forma um complexo sistema por ser formado pelo conjunto de estacas próximas entre si interagindo com o solo, altamente hiperestático pelas condições de contorno, além de ser ligado no topo pelo bloco rígido que normalmente está em contato com o solo. A transferência de cargas ocorre através das interações entre a estrutura (estacas + blocos de coroamento + superestruturas) e os solos adjacentes.

Os mecanismos envolvidos na transferência de carga dependem do modo como a estaca for carregada, ou seja, por esforço axial, lateral, de torção ou pela combinação destes. Estes serão mais complexos quanto mais complicado for o sistema de carregamento.

No SISEs serão consideradas apenas as estacas verticais carregadas axialmente e submetidas a esforços de compressão. Para estacas lançadas com pequenas inclinadas também será feita essa consideração.

A transferência da carga de compressão Ni recebida pela estaca i para o solo, se dá basicamente em duas parcelas:

- ao longo do fuste, devido ao pequeno movimento relativo entre a estaca e o solo, em função do carregamento aplicado, o qual provoca o surgimento de tensões de cisalhamento que dão origem a reação (força) Pl;

- na base da estaca, devido à pressão de contato com o solo, que também depende do movimento vertical da estaca, o qual provoca o surgimento de tensões que dão origem à reação (força) Pp.

A determinação do diagrama de transferência de carga ao longo da estaca-solo depende intimamente de como o sistema comporta no estado de ruptura. Existem vários métodos para a estimativa de ruptura do sistema estaca-solo. Escolheram-se para o SISEs os métodos Aoki-Velloso (1975) e Decóurt-Quaresma (1978), que atualmente são os utilizados e estudados no Brasil.

A seguir são descritos os métodos de cálculo de capacidade de carga lateral e de ponta que estão implementados no SISEs. Na tabela 9.1, indica-se os métodos que são recomendados para cada tipo de estaca, conforme indicado na literatura.

Tabela 9.1 - Métodos indicados para cada tipo de estaca

Método / Tipo de Estaca	Aoki & Velloso (1975)	Decourt & Quaresma (1978)	Antunes & Cabral - SEFE III (1996)	Philipponnat (1986)	Pedro Paulo Velloso (1981)	Alonso (1996)	David Cabral (1986)
Franki	Sim	—	—	Sim	Sim	—	—
Pré-moldada concreto	Sim	Sim	—	—	Sim	—	—
Metálica	Sim	—	—	—	Sim	—	—
Escavada	Sim	Sim	—	Sim	Sim	—	—
Raiz	Sim	Sim	—	—	Sim	—	Sim
Strauss	Sim	—	—	Sim	Sim	—	—
Hélice contínua	Sim	Sim	Sim	—	—	Sim	Sim
Injetada	—	Sim	—	—	—	—	—
Estacão	—	—	—	Sim	Sim	—	Sim
Barrete	—	—	—	Sim	Sim	—	Sim

Método Aoki-Velloso

Este método, com base nos resultados semi-empíricos, estima o diagrama de ruptura do sistema estaca – solo. Inicialmente foi concebido com base nos ensaios de penetração estática CPT, mas através da correlação podem ser utilizados os dados do índice à penetração dinâmica SPT, o mais empregado na atualidade.

$$PR = PL + PP$$

$$PL = \sum U \cdot \Delta l \cdot r_l$$

$$PP = A \cdot r_p$$

PR: Carga de ruptura do sistema estaca-solo;

PL: Carga de ruptura lateral do fuste da estaca;

PP: Carga de ruptura na base da estaca.

Para:

U: perímetro da seção transversal do fuste da estaca

rl: atrito lateral específico;

A: área da ponta da estaca;

Δl : trecho onde se admite rl constante, sugere-se adotar para cada 1 metro

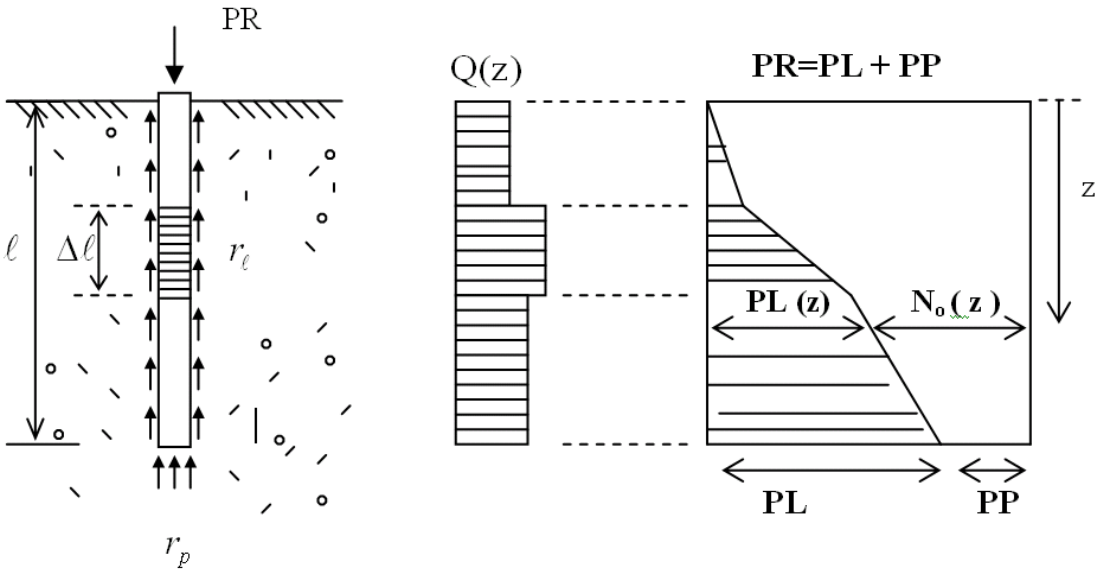


Figura 9.1 – Carga de ruptura do contato estaca – solo.

$N_0(z)$ é o diagrama de esforço normal na profundidade z no fuste da estaca.

Segundo Aoki e Velloso (1975):

$$r_p = \frac{qc}{F1} \cong \frac{K.N_{SPT}}{F1}$$

$$r_l = \frac{fs}{F2} \cong \frac{\alpha.K.N_{SPT}}{F2}$$

N_{SPT} é o número de SPT obtido nas sondagens à percussão ao longo da profundidade onde será instalado a estaca. O é o atrito lateral específico de um trecho do comprimento da estaca e depende do solo e tipo da estaca empregada. Os valores de e K mais prováveis para os solos da cidade de São Paulo são apresentados na tabela abaixo:

Tipo de Terreno	K (MPa)	$\alpha(\%)$				
Areia	1,00	1,4		Tipo de estaca	F1	F2
Areia siltosa	0,80	2,0		Franki	2,50	5,00
Areia silto argilosa	0,70	2,4		Pré-moldadas	1,75	3,50
Areia argilosa	0,60	3,0		Escavadas	3,00	6,00
Areia argilo siltosa	0,50	2,8				
Silte	0,40	3,0				
Silte arenoso	0,55	2,2				
Silte areno argiloso	0,45	2,8				
Silte argiloso	0,23	3,4				
Silte argilo arenoso	0,25	3,0				
Argila	0,20	6,0				
Argila arenosa	0,35	2,4				
Argila areno siltosa	0,30	2,8				
Argila siltosa	0,22	4,0				
Argila silto arenosa	0,33	3,0				

Tabela 9.1 – Valores dos coeficientes do Método Aoki-Velloso, ALONSO (1983).

Para estacas pré-moldadas de pequeno diâmetro, o valor F1=1,75 mostrou-se muito conservador. Por isso, Aoki (1985) faz nova proposição para o coeficiente empírico:

$F_1 = 1 + \frac{D}{0,80}$, onde D = diâmetro do fuste da estaca em metros.

$$F_2 = 2\,F_1$$

Aoki (1996) comenta que o coeficiente F_2 pode variar entre uma a duas vezes o valor de F_1 e que, portanto, $F_2 = 2\,F_1$ é a hipótese mais conservadora. Para estacas escavadas, segundo Aoki (1976) dependendo do maior ou menor grau de perturbação introduzido no terreno pelo processo empregado, F_2 varia entre 4,5 e 10,5 (com $F_2 = 2\,F_1$). Segundo Velloso (1978) apud ABMS (2000) podem ser adotados valores $F_1 = 3,5$ e $F_2 = 7,0$ para estacas escavadas com lama bentonítica.

É necessário frisar que os métodos semi-empíricos para o cálculo da capacidade de carga só podem ser aplicados aos tipos de estacas e regiões geotécnicas para os quais foram estabelecidos. Nas outras regiões onde falta caracterização científica, o importante é o levantamento do perfil do solo através da sondagem e determinação do tipo de solo pelo método tato-visual por profissionais experientes e com rigor técnico.

Para o cálculo da carga admissível deverá ser usado um coeficiente de segurança de no mínimo 2:

$$P_{adm} = \frac{PR}{2}$$

Método Décourt-Quaresma

Este método, ao contrário do método Aoki-Velloso (1975), parte diretamente dos ensaios SPT. Ele foi inicialmente estabelecido em 1978 para estacas pré-moldadas de cravação, mas os autores afirmam que também podem ser aplicados para outras estacas como escavadas, Strauss, Franki, etc. Este método foi revisto em 1982, 1987 e 1996 apud ABMS (2000).

O atrito lateral específico rl é obtida pela fórmula empírica:

$$r_l = \frac{N}{3} + 1 \quad (tf/m^2),$$

onde 3 ≤ N≤50 em função do número de SPT;

Ou em sistema internacional:

$$r_l = 10\left(\frac{N}{3} + 1\right) \quad (\text{kPa})$$

O atrito lateral específico deverá ser multiplicado pela área de contato do fuste da estaca-solo para cada metro de profundidade. O somatório das capacidades laterais ao longo do fuste fornecerá a capacidade lateral acumulada PL.

Inicialmente os valores de número de SPT foram estabelecidos como sendo 3 o mínimo e 15 o máximo. Mas em 1982, o limite superior foi estendido para 50 para estacas de deslocamentos (cravação), embora seja difícil cravar estacas com solos granulares e número de SPT maior que 20. O interessante nesse método, é que para a estimativa de atrito lateral de ruptura, não se distingue o tipo de solo como ocorre em Aoki-Velloso (1975). Mais adiante, veremos que com a introdução de coeficientes β no cálculo de carga admissível é que diferencia entre solos argilosos, siltosos, arenosos e tipo de estaca utilizada.

Já na resistência da ponta da estaca é estimado segundo tipo de solo:

$$PP = r_p \ \mathrm{A_b}$$

onde: Ab é a área da base da estaca;

rp = C Np (tensão de ruptura da base);

N_p é a média entre os valores de número de SPT na profundidade da ponta da estaca em estudo, o imediatamente acima e o imediatamente abaixo;

C é um fator característico do solo, ajustado através de 41 provas de carga realizadas em estacas pré-moldadas de concreto. Nas provas de carga que não atingiram a ruptura, utilizou-se a carga de ruptura convencional correspondente ao recalque de 10% do diâmetro da estaca). Seus valores básicos são:

C= 12 tf/m² para as argilas;

C= 20 tf/m² para os siltes argilosos;

C= 25 tf/m² para os siltes arenosos;

C= 40 tf/m² para as areias.

Décourt (1996) introduziu os coeficientes α e β segundo o tipo de solo e estaca:

Tipo de solo	Escavada a seco	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Injetadas (raiz)	Injetadas(sob pressão)
Valores típicos de α					
Argilas	0,85	0,85	0,30*	0,85*	1,00*
Siltes**	0,60	0,60	0,30*	0,60*	1,00*
Areias	0,50	0,50	0,30*	0,50*	1,00*
Valores típicos de β					
Argilas	0,80*	0,90*	1,00*	1,50*	3,00*

Siltes**	0,65*	0,75*	1,00*	1,50*	3,00*
Areias	0,50*	0,60*	1,00*	1,50*	3,00*

* Valores sugeridos diante do reduzido número de dados disponíveis;

** Pode ser considerado também como solos intermediários.

Tabela 9.2 – Coeficientes do Método Décourt-Quaresma, ALONSO (1983).

Décourt (1982) propõe a utilização de quatro coeficientes parciais de segurança referentes às seguintes incertezas: Fp (de parâmetros do solo), Ff (da formulação adotada), Fd (das deformações excessivas) e Fc (das cargas). Para o atrito lateral sugere os valores Fp =1,10 ; Ff =1,00 ; Fd =1,00 ; Fc =1,20 , cuja multiplicação resulta γl =1,10 x 1,00 x 1,00 x 1,20 =1,32, adota-se γl =1,30 e para resistência da ponta Fp=1,35 ; Ff =1,00 ; Fd =2,50 ; Fc =1,20 , cuja multiplicação resulta γp =1,35 x 1,00 x 2,50 x 1,20 =4,05, adota-se γp =4,00.

Então, os coeficientes de segurança "globais" referentes às parcelas de atrito lateral será 1,3 e para a parcela de ponta fica igual a 4,0. Assim a carga admissível deve atender simultaneamente a:

$$P_{adm} = \frac{\beta \cdot PL}{1{,}3} + \frac{\alpha \cdot PP}{4{,}0}$$

$$P_{adm} = \frac{PR}{2} = \frac{\beta \cdot PL + \alpha \cdot PP}{2}$$

Dentre os dois resultados, deverá escolher a menor dos dois, por exemplo:

$$P_{adm} = \frac{\beta\, PL}{1{,}3} + \frac{\alpha\, PP}{4{,}0} = \frac{0{,}5_x 18tf}{1{,}3} + \frac{0{,}5_x 42tf}{4{,}0} \cong 12tf$$

$$P_{adm} = \frac{PR}{2} = \frac{\beta\, PL + \alpha\, PP}{2} = \frac{0{,}5 \cdot 18tf + 0{,}5 \cdot 42tf}{2} = 15tf$$

Dado uma estaca escavada a seco num solo arenoso , com PL=18 tf e PP=42 tf, tem-se:

Então, 12tf (a menor) será adotada como carga admissível para as condições do solo e tipo de estaca deste exemplo.

Vale lembrar que estas expressões de cargas admissíveis são de uso exclusivo quando a ruptura lateral (PL) e ruptura na ponta (PP) são estimadas pelo método Decóurt-Quaresma, não fazendo sentido aplicar no método Aoki-Velloso ou nos outros métodos.

Método Antunes e Cabral SEFE III

Tipos de Estacas indicadas: hélice

Método para estimativa de capacidade de carga de estacas, conforme proposto por Antunes e Cabral no SEFE III em 1996 (Seminário de Engenharia e Fundações Especiais e Geotecnia). Este método é bastante empregado para estacas do tipo hélice.

Define-se então o atrito lateral específico ao longo do fuste por:

$$r_l(i) = \frac{b_1(i) \cdot N_{SPT}(i)}{100} \quad (kgf/cm^2)$$

Onde a carga de ruptura lateral ao longo do fuste da estaca é dada por:

$$PL = \sum_{i=1}^{L_{estaca}} r_l \cdot U \cdot 100 \quad (kN)$$

Com:

β_1: coeficientes tabelados para areia, silte e argila, fornecido em porcentagem de kgf/cm^2, conforme tabela 9.3;
r_l é computado em kgf/cm^2 ;
U é perímetro da estaca, em metros;

A parcela de tensão de ruptura da ponta é dada por:
$r_p = b_2 \cdot N_{SPT} \ (kgf/cm^2)$

E a carga de ruptura na base da estaca fica:
$PP = r_p \cdot A \cdot 100 \ (kN)$

Onde:
β_2: coeficientes tabelados para areia, silte e argila, fornecido em kgf/cm^2, conforme tabela 9.3;
A: área da ponta da estaca, em metros quadrado;

Tipo de Solo	β_1 (% de kgf/cm^2)	β_2 (kgf/cm^2)
Areia	4	2
Silte	2,5	1
Argila	2	1

Tabela 9.3: Valores dos coeficientes β_1 e β_2.

Método Philipponnat

Método semi-empírico. Correlacionado com CPT. O atrito lateral específico ao longo do fuste é dado pela relação:

$$r_l\ (i) = \frac{\alpha_f \ . \ \bar{q}_c(i)}{\alpha_s}$$

A carga de ruptura lateral ao longo do fuste da estaca é dada por:

$$PL = \sum_{i=1}^{L_{estaca}} r_l \cdot U \cdot 1000 \quad (kN)$$

A parcela de tensão de ruptura da ponta é dada por:

$$r_p = \alpha_p \cdot q_{cm}$$

E a carga de ruptura na base da estaca fica:

$$PP = r_p \cdot A \cdot 1000 \ (kN)$$

Com qc sendo calculado conforme indicado no método Aoki-Velloso:

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

Onde

U: perímetro da estaca, em metros;
A: área da ponta da estaca, em metros quadrado;
K: coeficientes do Método Aoki-Velloso (tabela 9.1), com K definido em MPa;
$q_c(i)$ é o valor de q_c em cada cota (i) de sondagem ao longo do fuste;
q_{cm} é a média da região compreendida entre 3 vezes o diâmetro acima e abaixo da cota i;
Os coeficientes α_f, α_s e α_p são indicados nas tabelas 9.4, 9.5 e 9.6, respectivamente.

Philipponnat (1986) - Alfa f

TIPO DE ESTACA		Alfa f	rl máx. (kPa)
ESCAVADA	Broca (Circular - Pequeno ø)	0,85	100
	Circular em geral	0,85	100
	Circular/Retangular com Lama Betonítica	0,85	100
PRÉ-MOLDADA	Cravada (Circular ou Quadrada)	0,6	120
	Prensada (Circular ou Quadrada)	0,75	80
FRANKI	Fuste Apiloado	1,25	120
	Fuste Vibrado	1,25	120
OUTRAS	STRAUSS	1,25	100
	HELICE	1,25	100
	RAÍZ	1,25	100
	METÁLICA	1,1	120
	INJETADA	1,25	120
	NÃO PADRÃO	0,5	100

Tabela 9.4: Valores de α_f, Garcia (2006).

Philipponnat (1986) - Alfa s

Nº	SOLO	Alfa s
1	Areia: conforme SPT	*
2	Areia: qc < 8MPa	100
3	Areia: 8 MPa < qc < 12 MPa	150
4	Areia: qc > 12 MPa	200
5	Silte	60
6	Argila	50

Inserir Remover

OK Cancelar

Tabela 9.5: Valores α_s em cada camada, Goulart (2001).

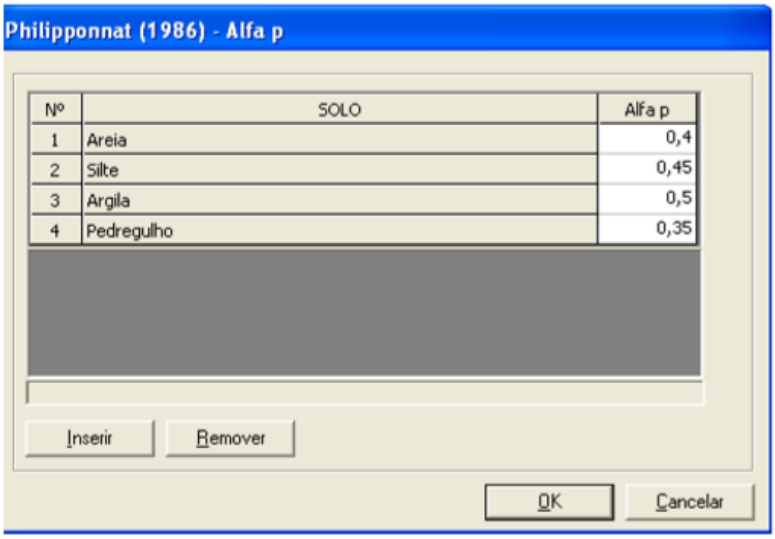


Tabela 9.6: Valores de α_p, Albuquerque (1996).

Método Pedro Paulo Velloso

Método semi-empírico. Correlacionado com CPT.

O atrito lateral específico ao longo do fuste é indicado por:

$$r_l = \alpha \cdot l \cdot f_c$$

A carga de ruptura lateral ao longo do fuste da estaca fica expressa por:

$$PL = \sum_{i=1}^{L_{estaca}} r_l \cdot U \cdot 10 \ \ (kN)$$

Onde

α: coeficiente indicado na tabela 9.7;

λ: coeficiente indicado na tabela 9.8;

fc é o atrito lateral medido no ensaio de cone, relacionado com o SPT por: $f_c = a' \cdot N_{SPT}^{b'}$, com Nspt obtido em cda camada do fuste;

a' e b' : tabela 9.10;

U: perímetro da estaca.

Tipo de estaca	α
Cravada	1
Escavada	0,5

Tabela 9.7: Valores de α, Moura (1997).

Tipo de estaca	α
Compressão	1
Tração (não definido no Sises)	0,7

Tabela 9.8: Valores de λ, Moura (1997).

A parcela de tensão de ruptura da ponta é expressa por:

$$r_p = \alpha \cdot b \cdot q_{cm}$$

A carga de ruptura na base é indicada por:

$$PP = r_p \cdot A \cdot 10 \ \ (kN)$$

Onde

α: coeficiente indicado na tabela 9.7;

$$b = 1{,}016 - 0{,}016 \cdot \frac{D}{d}$$ (estacas comprimidas, com D em metros)

β=0 (estacas tracionadas);

Se $\text{Se } \beta < 0 \rightarrow \beta = 1$ (estacas comprimidas, isto acontece se $D \geq 2{,}3\text{m}$;

D: diâmetro do fuste da estaca;

A: área da ponta da estaca;

d = 0,0356 m = diâmetro da ponta do cone do CPT;

qc é a resistência de ponta é dada por: $q_c = a \cdot N_{SPT}^{b}$

a, b: tabela 9.10;

$$q_{cm} = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2}$$

De modo que qc1 é a média de qc de NSUP*D acima da ponta e qc2 é a média de qc de NINF*D abaixo da ponta.
Default: Nsup = 8, Ninf = 8, ver tabela 9.9.

Pedro Paulo Velloso (1981)	
a - b - a' - b'	
Limite inferior de bulbo	8
Limite superior de bulbo	8

Tabela 9.9 Valores de bulbo definidos em arquivos de critérios.

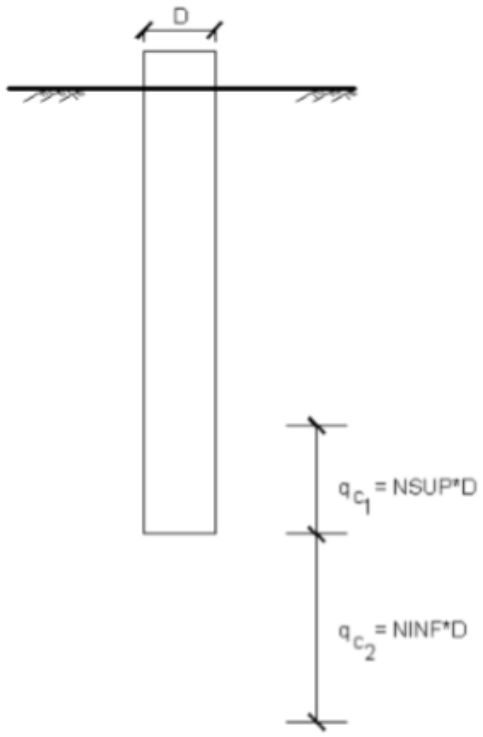
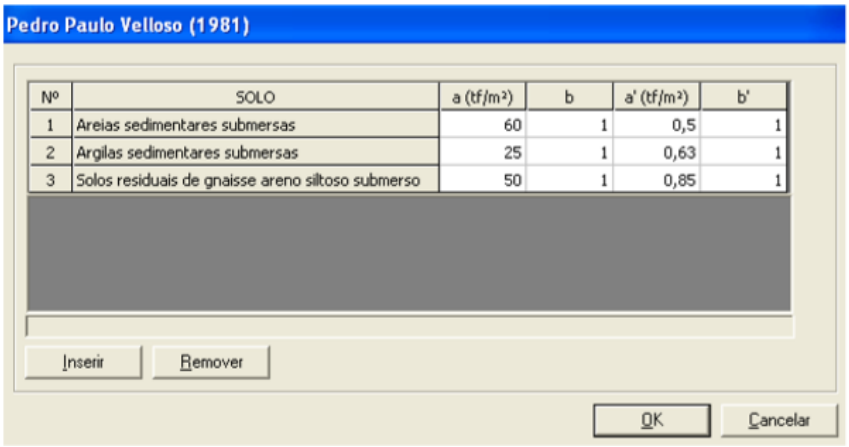


Figura 9.2 - Critério de cálculo de carga de ponta



Pedro Paulo Velloso (1981)

Nº	SOLO	a (tf/m²)	b	a' (tf/m²)	b'
1	Areias sedimentares submersas	60	1	0,5	1
2	Argilas sedimentares submersas	25	1	0,63	1
3	Solos residuais de gnaisse areno siltoso submerso	50	1	0,85	1

Inserir Remover

OK Cancelar

Tabela 9.10: Parâmetros de correlação entre o CPT e SPT de Moura (1997).

Método Alonso

Este método é baseado em medidas de ensaios de SPT-T (sondagem à percussão com medida de torque). Os valores de resistência empregados no método são de torque: Tmáx e Tmín (Tres). Detalhes sobre o ensaio de SPT-T, ver Peixoto (2001).

Conforme Magalhães (2005):

Se entrada de dados for por SPT, correlacionam-se estes com valores de torque (kgf.m) por:

$$T_{máx} = 1{,}2 \cdot N_{SPT}$$
$$T_{mín} = 1{,}0 \cdot N_{SPT}$$

Se entrada de dados for por adesão – atrito lateral (fs) em kPa, converte-se adesão para torque (kgf.m) da seguinte forma:

$$T_{máx} = 0{,}18418 \cdot f_{S_{MÁXIMA}}$$
$$T_{mín} = 0{,}18418 \cdot f_{S_{MÍNIMA}}$$

Se entrada de dados for por torque em (kgf.m), então:

$$r_l = \frac{\alpha_{Al} \cdot T_{máx}}{0{,}18418}$$

Se $r_1 >$ (limites tabela 6.1) → $r_1 = r_{1\,limite}$ (kPa)

A carga de ruptura lateral ao longo do fuste da estaca é dada por:

$$PL = \sum_{i=1}^{L_{estaca}} r_l \cdot U \cdot \Delta l \;\; (kN)$$

Com

α_{Al}: coeficiente de correção do atrito lateral, ver tabela 9.11;

U: perímetro da estaca;

Δl = 1m (considerando que a cada metro da camada rl seja constante);

Limite máximo de Torque (kgf.m)	40
Limite inferior de bulbo	8
Limite superior de bulbo	8
R limite (kPa)	250
Alfa Al	0,6
Beta Al -> Areia = 250 Argila = 150 Outros= 200	

Tabela 9.11: Valores de limites de rl e do coeficiente de correção (α_{Al}) por Alonso (1996) para estaca hélice contínua. (fonte Almeida Neto, 2002).

A parcela de tensão de ruptura da ponta é relacionada com o Tmín (Tres) por:

$$r_p = b_{Al} \cdot \frac{T_{mín}^{(1)} + T_{mín}^{(2)}}{2} \;\; (kPa)$$

E a carga de ruptura na base é expressa por:

$$PP = A \cdot r_p \;\; (kN)$$

Com β_{Al}: fator de correção, tabela 9.12;

$T_{mín}^{(1)}$: média aritmética dos valores de torque mínimo (kgf.m) no trecho Nsup*D, acima da ponta, adotando valores nulos caso comprimento da estaca < NsupD;

$T_{mín}^{(2)}$: média aritmética dos valores de torque mínimo (kgf.m) no trecho Ninf*D, abaixo da ponta.

Se $T_{mín}^{(1)ou(2)} > T_{critério} \xrightarrow{adota-se} T_{mín}^{(1)ou(2)} = T_{critério}$

As camadas abaixo da profundidade final da estaca recebem valores iguais da última camada, repetir valores para $T_{mín}^{(2)}$.

Como default: Nsup = 8 Ninf = 8

$$T_{critério} = 40 \ kgf.m$$

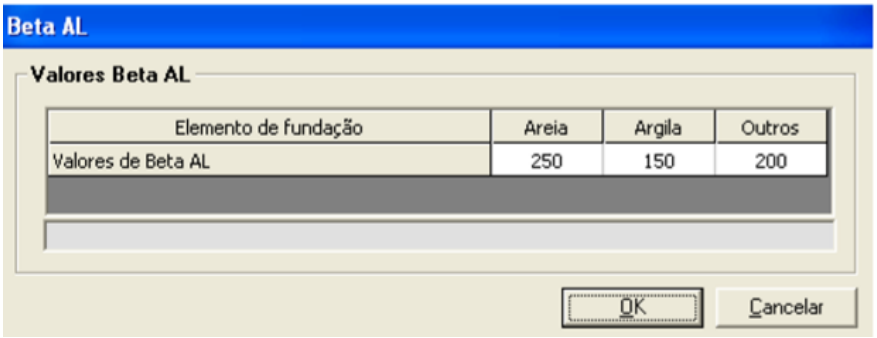


Tabela 9.12: Valores de β_{AI} (kPa/kgf.m), Magalhães (2005).

Alonso (1996) enfatiza que estas correlações dependem do local, devendo realizar ensaios de SPT-T e correlacioná-los com SPT de forma estatisticamente adequada.

Método David Cabral

Método semi-empírico específico para estaca raiz. Deve-se conhecer e considerar a pressão de injeção (p) de aplicação de golpes de ar na resistência lateral da estaca. O atrito lateral específico ao longo do fuste é expresso por:

$$r_l = b_0 \cdot b_1 \cdot N_{SPT}$$

Com β_1: índice que depende do tipo de solo, ver tabela 9.13;

D: diâmetro do fuste da estaca em metros;

p: pressão de ar comprimido em kgf/cm²; (entre 0 e 4 kgf/cm²).

β_0 sendo dado por: Se estaca raiz, conforme Paschoalin Filho (2008):

Se estaca raiz, conforme Paschoalin Filho (2008):

$$b_0 = 1 + 0{,}11 \cdot p - D$$

Se $r_l > 200 \rightarrow r_l = 200 \ kN/m^2$

A carga de ruptura lateral ao longo do fuste da estaca é dada por:

$$PL = \sum_{i=1}^{L_{estaca}} r_l \cdot U(kN)$$

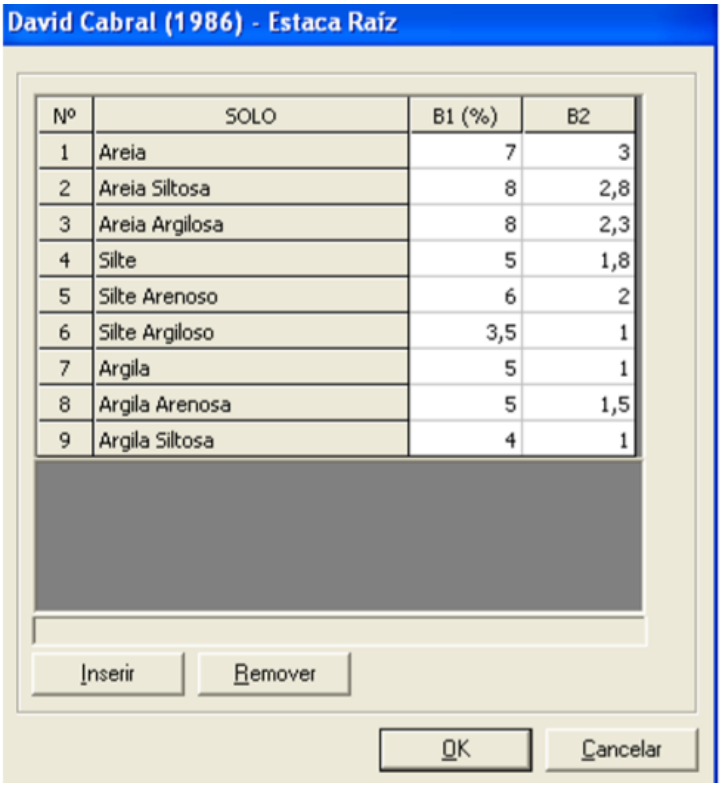
A parcela de tensão de ruptura da ponta é indicada por:

$$r_p = b_0 \cdot b_2 \cdot 100 \ (kPa)$$

E a carga de ruptura na base é expressa por:

$$PP = A \cdot r_p \ (kN)$$

com β_2: índice que depende do tipo de solo, ver tabela 9.13;



Nº	SOLO	B1 (%)	B2
1	Areia	7	3
2	Areia Siltosa	8	2,8
3	Areia Argilosa	8	2,3
4	Silte	5	1,8
5	Silte Arenoso	6	2
6	Silte Argiloso	3,5	1
7	Argila	5	1
8	Argila Arenosa	5	1,5
9	Argila Siltosa	4	1

Tabela 9.13: Índices β_1 e β_2 para estaca raiz, conforme Nogueira (2004).