

# PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS CRAVADAS – MÉTODO UFRGS

Bianca de Oliveira Lobo - Milititsky Consultoria Geotécnica

Fernando Schnaid - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Edgar Odebrecht - Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Marcelo Júlio Langone - Transpetro

**RESUMO** – Neste trabalho apresentam-se os conceitos teóricos, um exemplo de cálculo e a análise de precisão do método UFRGS de previsão de capacidade de carga de estacas cravadas. Ao contrário de outras metodologias consagradas na prática de engenharia, de natureza essencialmente empíricas, o método UFRGS é estruturado em conceitos da dinâmica e faz uso dos princípios de conservação de energia envolvidos na cravação do amostrador SPT. A energia absorvida pelo solo, calculada a partir do número de golpes  $N_{spt}$  (ou diretamente da medida correspondente de penetração do amostrador) é convertida analiticamente em uma força dinâmica de reação do solo à penetração. A força dinâmica permite determinar as resistências unitárias mobilizadas no amostrador SPT (modelo) e, a partir destas, estimar as resistências unitárias mobilizadas na estaca (protótipo). A aplicabilidade e precisão da metodologia na previsão de capacidade de carga de estacas cravadas metálicas e pré-moldadas de concreto armado é comprovada, através de um banco de dados composto por provas de carga estáticas instrumentadas (Langone, 2012).

## 1 – INTRODUÇÃO

A prática brasileira de projetos de fundações, fortemente baseada na medida de penetração do ensaio SPT, adaptou os métodos tradicionais desenvolvidos para o cone através de abordagens de natureza estatística, estabelecendo correlações entre as medidas de  $N_{spt}$  e a capacidade de carga de estacas (e.g. Aoki & Velloso, 1975; Decourt & Quaresma, 1978; Velloso, 1981). Estes métodos, consagrados na prática de engenharia, consideram empiricamente fatores como tipo de estaca, procedimentos de instalação, tipo de solo, entre outros, tendo sua aplicabilidade restrita às práticas construtivas regionais e às condições específicas dos casos históricos utilizados em seu estabelecimento.

Pesquisas desenvolvidas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), permitiram o estabelecimento de uma interpretação racional do ensaio SPT a partir na energia transferida ao solo durante a penetração do amostrador (Odebrecht, 2003; Odebrecht et al, 2004; Odebrecht et al, 2005). A utilização de conceitos físicos na interpretação de ensaios SPT abre uma gama de alternativas para o desenvolvimento de metodologias de cálculo de maior rigor conceitual como a estimativa de propriedades de solos e capacidade de carga de fundações.

Neste contexto, em 2005 foi desenvolvida uma nova metodologia de previsão de capacidade de carga de estacas, denominado de Método UFRGS (Lobo, 2005; Lobo et. al. 2009). Nesta abordagem, a energia transferida ao solo durante a penetração do amostrador SPT é utilizada no cálculo da força dinâmica  $F_d$  de reação do solo, que, uma vez decomposta, permite análises comparativas entre as resistências unitárias mobilizadas no amostrador SPT (modelo) e as mobilizadas na estaca (protótipo). Estes conceitos de força e energia, combinados à teoria de capacidade de carga e à expansão de cavidades (Vésic, 1972), são aplicados na previsão das condições limites de desempenho de estacas.

## 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A capacidade de carga de estacas pode ser calculada a partir da resistência à penetração quasi-estática de um elemento no solo (elemento cônico para medir a resistência de ponta  $q_c$  e atrito lateral  $f_s$ ) ou a partir do número de golpes necessários à cravação dinâmica de um amostrador,  $N_{spt}$ . Em resumo, as diversas metodologias de cálculo existentes (e.g. Aoki & Velloso, 1975; Decourt & Quaresma, 1978; Velloso, 1981; entre outros) buscam estimar a resistência *unitária de ponta da estaca* ( $q_p$ ):

$$q_p = \frac{q_c}{F_1} = \frac{k_p \cdot N_{spt}}{F_1} = \frac{F_{d,p} / a_p}{F_1} \quad (1)$$

e o *atrito lateral unitário* ( $f_l$ ):

$$f_l = \frac{f_s}{F_2} = \frac{k_s \cdot q_c}{F_2} = \frac{k_s \cdot k_n \cdot N_{spt}}{F_2} = \frac{F_{d,l} / a_l}{F_2} \quad (2)$$

sendo  $k_p$ ,  $k_s$  e  $k_n$  fatores que expressam a dependência do tipo de solo e  $F_1$  e  $F_2$  fatores de correção para os efeitos de escala e mecanismos de interação distintos observados entre a estaca (protótipo) e o modelo (cone ou SPT) e  $a_p$  e  $a_l$  a seção transversal e área lateral do amostrador SPT.

Note que ao adotar a força dinâmica de ponta  $F_{d,p}$  e de atrito lateral  $F_{d,l}$  para representar a reação do solo mobilizada durante a cravação do amostrador SPT, elimina-se a influência do tipo de solo ( $k_p$ ,  $k_s$  e  $k_n$ ) na previsão das resistências unitárias, pois na medida que se utilizam conceitos físicos da dinâmica e o princípio de conservação de energia combinados à teoria de capacidade de carga e expansão de cavidades, considera-se explicitamente os efeitos da rigidez e resistência do solo bem como a eficiência do ensaio SPT (*i.e.* perdas decorrentes do processo de propagação de ondas nas hastes decorrentes do impacto do martelo).

A estrutura conceitual desenvolvida para a determinação da força dinâmica  $F_d$  postula que a energia transmitida ao solo na cravação do amostrador SPT é função da altura de queda teórica do martelo  $H$  (no caso do sistema brasileiro de 75 cm) acrescida da penetração permanente  $\Delta\rho$ . Como consequência, esta energia passa a ser função de 3 fatores: altura de queda e massa do martelo  $M_m$ , tipo de solo - que determina a magnitude da penetração média por golpe do amostrador,  $\Delta\rho = 30\text{cm}/N_{spt}$ ) e geometria (comprimento e seção) da composição de hastes - que determina a massa da composição  $M_h$ . Assim, a *energia potencial gravitacional do sistema* ( $EPG_{m+h}^{sistema}$ ), considerando simultaneamente martelo, haste e solo, é expressa como (Odebrecht et al, 2004):

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3[\eta_1(H + \Delta\rho)M_m g + \eta_2(M_h g \Delta\rho)] \quad (3)$$

sendo  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  os coeficientes de eficiência do martelo, da composição de hastes e do sistema, respectivamente. Estes coeficientes devem ser obtidos por calibração do ensaio SPT através de célula de carga e acelerômetros. Como primeira estimativa, pode-se adotar para o sistema brasileiro de acionamento manual do martelo os valores:  $\eta_1 = 0,76$ ;  $\eta_2 = 1$  e  $\eta_3 = 1 - 0,0042L$  (Odebrecht et al 2004), onde  $L$  representa o comprimento de hastes do topo da composição ao amostrador. A calibração local dos equipamentos para medir  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_3$  é prática recomendável.

Como o trabalho efetivamente entregue ao solo é conhecido - equação (3) - é possível calcular o valor da força dinâmica ( $F_d$ ) média de reação do solo (Odebrecht et al, 2004; Schnaid et al, 2005; Schnaid,2009):

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = W_s = F_d \Delta \rho \quad (4)$$

$$F_d = \frac{\Delta EPG_{m+h}^{sistema}}{\Delta \rho} \quad (5)$$

É interessante observar que o termo “força dinâmica” não é empregado em sua definição clássica: força que varia de intensidade ao longo do tempo, mas como uma força média no tempo, resultante da reação do solo durante um incremento na cravação do amostrador, devido à ação de um golpe do martelo.

A utilização das equações (3) a (5) apresentam ainda importante consequência prática no que se refere à realização dos ensaios. Computada a energia utilizada para cravar o amostrador no solo ( $\Delta EPG_{m+h}^{sistema}$ ), qualquer sistema de cravação (com acionamento automático ou manual do martelo) pode ser utilizado para medir a resistência à penetração do amostrador SPT, desde que devidamente calibrado através de acelerômetros e células de carga.

### 3 - FORMULAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA - MÉTODO UFRGS

A capacidade de carga de uma estaca é obtida pelo equilíbrio estático entre a carga aplicada, o peso próprio da estaca e a resistência oferecida pelo solo. Este equilíbrio pode ser expresso pela equação (6):

$$Q_U + W = Q_L + Q_p \quad (6)$$

onde  $Q_U$  representa a capacidade de carga total de uma estaca,  $W$  o peso próprio,  $Q_p$  a capacidade de carga da ponta ou base e  $Q_L$  a capacidade de carga do fuste. Desprezando o peso próprio da estaca, a capacidade de carga é expressa como função de dois termos, um relativo à resistência de ponta e outro ao atrito lateral. Deste modo, a equação (6) pode ser reescrita como:

$$Q_U = A_p \cdot q_p + U \int_0^L f_i \cdot d_L = A_p \cdot q_p + U \cdot \sum_0^L f_{i,j} \cdot \Delta L \quad (7)$$

onde  $A_p$  representa a área de ponta ou base da estaca,  $q_p$  a resistência unitária de ponta,  $U$  o perímetro da estaca,  $f_{i,i}$  o atrito lateral unitário e  $\Delta L$  o trecho do comprimento da estaca ao qual  $f_{i,i}$  se aplica.

Sabendo-se que na equação (7) os fatores determinantes da capacidade de carga de estacas são as parcelas unitárias de resistência de ponta  $q_p$  e de atrito lateral  $f_i$ , o método UFRGS estabelece uma correlação entre  $q_p$  e  $f_i$  da estaca com os valores de  $q_p$  e  $f_i$  mobilizados durante o processo de cravação do amostrador SPT no solo. Para tal, é necessário decompor a força dinâmica  $F_d$  medida no ensaio SPT, calculada pela equação (5) em duas parcelas, uma relativa às forças cisalhantes mobilizada ao longo das faces interna e externa e outra relativa às forças normais mobilizadas na ponta do amostrador.

$$F_d = F_{d,l} + F_{d,p} \quad (8)$$

onde  $F_{d,l}$  e  $F_{d,p}$  são as forças dinâmicas lateral e de ponta, respectivamente.

Como o mecanismo de interação solo-amostrador é complexo, foram adotadas por Lobo (2005) algumas hipóteses simplificadoras para decomposição desta força em suas componentes de atrito lateral e de resistência de ponta:

- a) Considerando que a resistência de ponta de estacas é normalmente associada a estratos resistentes (à exceção de estacas flutuantes), nos quais ocorre o embuchamento da ponta do amostrador durante o processo de cravação, mobilizando-se simultaneamente resistência de ponta e tensões cisalhantes em torno da área lateral externa, conforme ilustra a Figura 1a. Utilizando conceitos da teoria da expansão de cavidades aplicados à cravação de amostradores de ensaios SPT em solos resistentes, Lobo (2005) indica, como um valor referencial, que 70% de mobilização da força dinâmica ( $F_d$ ) advém da resistência de ponta mobilizada. Desta forma, a resistência unitária de ponta mobilizada pelo amostrador SPT ( $q_{p,spt}$ ) pode ser escrita como:

$$q_{p,spt} = \frac{F_{d,p}}{a_p} = \frac{0,7 \cdot F_d}{a_p} \quad (9)$$

onde,  $a_p$  representa a área de ponta do amostrador (20,42 cm<sup>2</sup>).

Esta hipótese é corroborada pela inspeção sistemática de inúmeros amostradores SPT, nos quais se observa um baixo nível de recuperação de amostras em solos resistentes e através de modelagem numérica dos mecanismos de penetração (Lobo, 2008);

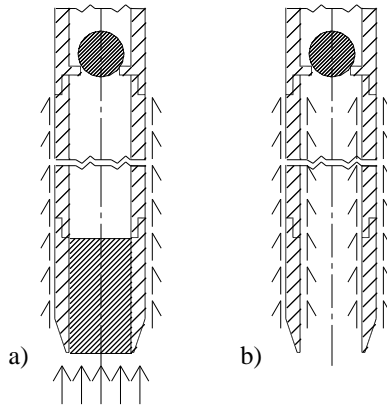
- b) Considerando que, até atingirem a profundidade de assentamento, as estacas cravadas ultrapassam camadas pouco resistentes nas quais a cravação do amostrador ocorre predominantemente com ponta aberta (sem embuchamento), conforme ilustra a Figura 1b.

Nestes casos, ao penetrar no solo, o amostrador é continuamente preenchido de material sem que haja embuchamento da sua ponta. Neste processo, o mecanismo de mobilização da resistência é controlado pelas tensões tangenciais geradas ao longo da área lateral, tanto interna quanto externa ao amostrador.

A força dinâmica ( $F_d$ ) mobilizada se equivale, portanto à força dinâmica lateral ( $F_{d,l}$ ) e a resistência lateral unitária mobilizada pelo amostrador SPT pode ser expressa como:

$$f_{l,spt} = \frac{F_d}{a_l} \quad (10)$$

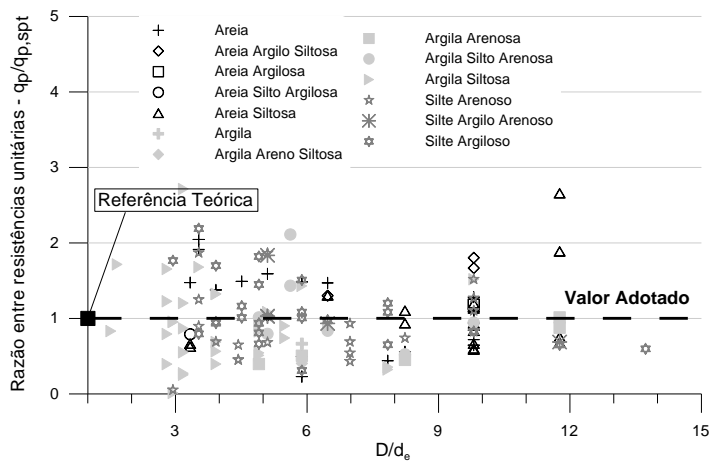
onde  $f_{l,spt}$  representa a resistência lateral unitária no amostrador SPT e  $a_l$  a área lateral do amostrador (área lateral externa + área lateral interna =  $\pi \cdot 30 \cdot (5,1 + 3,5) = 810,5$  cm<sup>2</sup>, sendo 30 cm a penetração média do amostrador). Neste cálculo considera-se o valor de atrito lateral unitário  $f_{l,spt}$  como representativo do atrito mobilizado tanto nas faces interna como externa do amostrador.



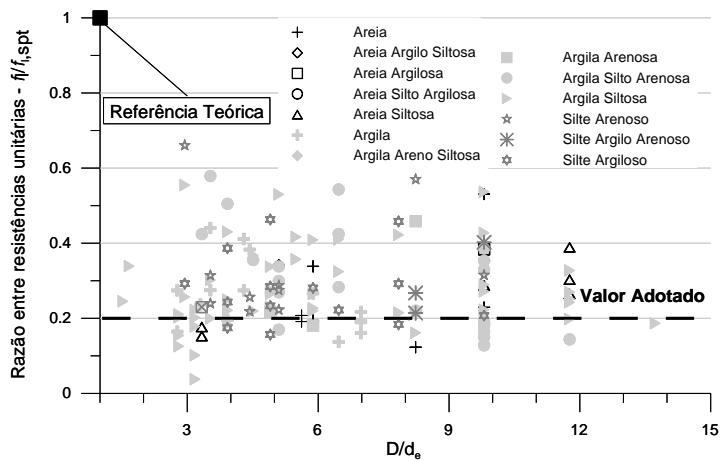
**Fig. 1** - Hipóteses adotadas na separação da força dinâmica mobilizada pelo amostrador: (a) solos resistentes e (b) solos pouco resistentes.

Finalmente, deve-se reconhecer que, para aplicar os valores das resistências unitárias mobilizadas pelo amostrador SPT diretamente na previsão da capacidade de carga de estacas, conforme sugerido nas equações (9) e (10) deve-se verificar a possível influência de efeitos de escala dos elementos do solo.

Durante o desenvolvimento do método UFRGS, foi utilizado o banco de dados de provas de carga em estacas cravadas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, composto por 272 casos. Resultados típicos são apresentados nas Figs. 3 e 4, nas quais são apresentadas as relações normalizadas de resistência de ponta *versus* diâmetro e atrito lateral *versus* diâmetro respectivamente, onde  $d_e$  é o diâmetro externo do amostrador e  $D$  é o diâmetro da estaca. Note que as Figs. 2 e 3 são convenientemente expressas em termos adimensionais e que a razão entre tensões unitárias é independente do tipo de solo. A dispersão dos resultados observada nestas figuras é atribuída a erros de medidas nas provas de carga, representatividade das sondagens, problemas de interpretação das informações das sondagens, limitação de informações geotécnicas, imprecisão na extrapolação da carga de ruptura, ausência de controle da energia de cravação do amostrador, entre outros.



**Fig. 2** - Razão entre resistências unitárias de ponta *versus* razão entre diâmetros.



**Fig. 3** - Razão entre resistências unitárias laterais *versus* razão entre diâmetros.

Apesar da significativa dispersão, verifica-se que os valores de resistência de ponta estão dispersos em torno da unidade sugerindo que, neste caso, a relação de tensões é pouco sensível aos efeitos de escala e ciclos de cravação e que, portanto, a equação (9) pode ser aplicada à estimativa de carga de ponta de estacas cravadas utilizando-se as medidas do ensaio SPT. O mesmo não acontece para o atrito lateral, verificando-se que a razão entre as tensões cisalhantes mobilizadas na estaca e no amostrador é da ordem de 0,2 (ver Fig. 3). Com base nesta evidência, o valor do atrito lateral unitário da estaca expresso pela equação (10) deve ser reduzido para levar em consideração os efeitos de escala:

$$f_l = \frac{0,2 \cdot F_d}{a_l} \quad (11)$$

É interessante observar que os métodos de previsão de capacidade de carga de estacas baseados no ensaio de cone também fazem uso de um fator de redução aplicado à  $q_c$ , valor este que situado na faixa de 1/30 à 1/300 (De Ruiter & Beringem, 1979; Bustamante & Gianceselli, 1982).

Aplicando os valores das resistências unitárias  $f_l$  e  $q_p$  expressos pelas equações (9) e (11) na equação (7), pode-se facilmente estimar a capacidade de carga de estacas metálicas através da força dinâmica mobilizada no ensaio SPT:

$$Q_u = Q_L + Q_p = \frac{0,2 \cdot U}{a_l} \Sigma F_d \cdot \Delta L + 0,7 \cdot F_d \frac{A_p}{a_p} \quad (12)$$

A extrapolação da equação (12) para estacas não-metálicas depende de fatores empíricos que considerem os efeitos de instalação da estaca no solo. Sabendo-se que a capacidade de carga de uma estaca é relacionada com seu processo construtivo, devem-se estabelecer ajustes à equação (12) para considerar os diferentes tipos de estacas. Estes ajustes são representados pelos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  aplicados às resistências laterais e de ponta, respectivamente:

$$Q_u = \alpha \cdot Q_L + \beta \cdot Q_p \quad (13)$$

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos através de correlações estatísticas entre os valores previstos pelo método e valores medidos em provas de carga estática para diferentes tipos de estacas.

As análises de regressão linear realizadas por Lobo (2005) produziram valores  $\alpha=1,5$  e  $\beta=1,1$  para estacas cravadas de concreto armado. Estes coeficientes ligeiramente superiores aos coeficientes unitários (metálicas) que refletem o atrito unitário concreto-solo superior ao atrito unitário aço-solo.

### 3 - EXEMPLO DE CÁLCULO - MÉTODO UFRGS

Para ilustrar a aplicabilidade do método UFRGS, será apresentado a seguir um exemplo de cálculo da capacidade de carga de uma estaca pré-moldada de concreto armado com seção transversal de 23x23cm e 12m de comprimento em uma planilha de cálculo *Microsoft Excel*. A Fig.4 apresenta o perfil de sondagem do local de implantação da estaca.

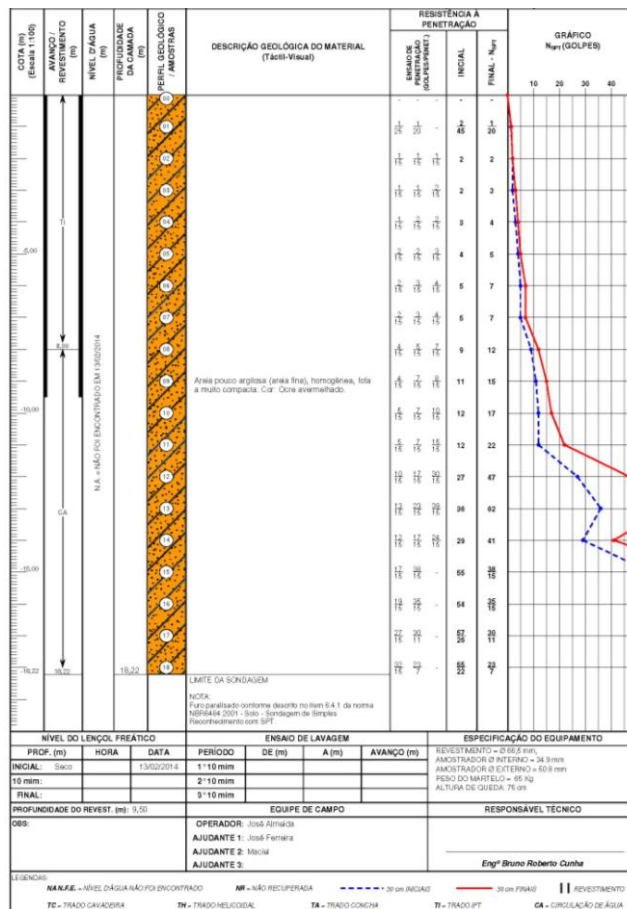


Fig. 4 - Perfil de Sondagem SPT (Fonte: Brasecol Engenharia e Fundações)

A rotina de cálculo inicia-se com a determinação da penetração média por golpe do amostrador ( $\Delta\rho=30\text{cm}/N_{\text{spt}}$ ).

É importante mencionar que no exemplo apresentado (ver Tabela 1) a 1,0m de profundidade, durante a execução do ensaio SPT foram aplicados 2 golpes e o amostrador SPT penetrou 45cm. Neste caso, a penetração média por golpe ( $\Delta\rho$ ) é de  $45\text{cm}/2=22,5\text{cm}$ . Note também que foi adotado como limite superior  $N_{\text{spt}}=40$  golpes, conforme sugerido por Lobo (2005) para estacas cravadas pré-moldadas.

Na sequência, devem-se ser inseridos dos coeficientes de eficiência do martelo ( $\eta_1$ ), da composição de hastes ( $\eta_2$ ) e do sistema ( $\eta_3$ ), conforme discutido na seção 2. No exemplo apresentado Tabela 1 foram inseridos os valores de eficiência sugeridos por Odebrecht et. al. (2004):  $\eta_1= 0,76$ ;  $\eta_2= 1$  e  $\eta_3= 1-0,0042L$ , onde L(comprimento de hastes) foi estimado como ( $L=z+1,0\text{m}$ ).

Conhecendo-se o valor medido da penetração média do amostrador por golpe e a eficiência do ensaio, é possível estimar a força dinâmica média de reação do solo à cravação do amostrador SPT ( $F_d$ ), conforme as equações (3) e (5).

Após a determinação da força dinâmica média de reação do solo ( $F_d$ ), aplicam-se as equações (12) e (13) para a estimativa da capacidade de carga da estaca. Na Tabela 1 é apresentada a previsão da capacidade de carga de uma estaca pré-moldada de concreto armado de 23x23cm, com comprimento cravado de 12,0m.

No exemplo apresentado, a estaca pré-moldada de concreto armado de 23x23cm com 12,0m cravados apresenta como capacidade de carga por atrito lateral 56tf e 79tf de ponta, totalizando 135,5 tf de carga total na ruptura. A partir dos valores indicados, devem ser aplicados fatores de segurança parciais ou global de acordo com as prescrições da NBR6122/2010 - Projeto e Execução de Fundações, experiência do projetista.

Tabela 1 - Exemplo de Cálculo - Aplicação do Método UFRGS.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	Ensaio SPT - NBR6484/2001						Método UFRGS					
3	Massa Martelo - Mm (Kg)= 65											
4	Altura de queda - H (m)= 0,75											
5	Massa Haste Mh (kg/m)= 3,23											
6	Eficiências - Valores		$\eta_1 = 0,76$				Seção (cm)		U (m)		Ap (m2)	
7	Sugeridos por Odebrecht		$\eta_2 = 1,00$				23x23		0,92		0,0529	
8	et. al. (2004)		$\eta_3 = 1-0,0042$				Pré-moldada		$\alpha$		$\beta$	
9							Concreto		1,5		1,1	
10	Z(m)	N-SPT	$\Delta\rho$ (cm)	n1	n2	n3	Fd (KN)	ZFd (KN)	QL(tf)	QP(tf)	Qu(tf)	
11	1	2/45cm	22,5	0,76	1,00	0,992	2,14	2,14	0,7	-	-	
12	2	2	15,0	0,76	1,00	0,987	2,96	5,11	1,7	6,2	7,9	
13	3	3	10,0	0,76	1,00	0,983	4,17	9,28	3,2	8,3	11,5	
14	4	4	7,5	0,76	1,00	0,979	5,37	14,65	5,0	10,7	15,7	
15	5	5	6,0	0,76	1,00	0,975	6,56	21,21	7,2	13,9	21,1	
16	6	7	4,3	0,76	1,00	0,971	8,91	30,13	10,3	16,2	26,5	
17	7	7	4,3	0,76	1,00	0,966	8,91	39,03	13,3	21,6	34,9	
18	8	12	2,5	0,76	1,00	0,962	14,72	53,76	18,3	27,8	46,1	
19	9	15	2,0	0,76	1,00	0,958	18,17	71,93	24,5	35,4	59,9	
20	10	17	1,8	0,76	1,00	0,954	20,43	92,36	31,5	43,0	74,5	
21	11	22	1,4	0,76	1,00	0,950	26,12	118,48	40,3	61,9	102,3	
22	12	40	0,8	0,76	1,00	0,945	46,64	165,12	56,2	79,2	135,5	
23	13	40	0,8	0,76	1,00	0,941	46,47	211,59	72,1	92,7	164,7	
24	14	40	0,8	0,76	1,00	0,937	46,29	257,88	87,8	92,5	180,3	
25												

#### 4 - A VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Langone (2012) realizou um estudo da precisão das estimativas do método UFRGS com o intuito de averiguar, ajustar e validar seu uso na prática de engenharia. A análise baseia-se em um banco de dados de provas de cargas estáticas instrumentadas constituído de 25 casos em estacas metálicas e 10 casos em



estacas pré-moldadas. É importante ressaltar que, as provas de carga analisadas por Langone (2012) não foram utilizadas no desenvolvimento do método UFRGS.

Além da comparação entre as previsões do método UFRGS e as cargas mobilizadas durante as provas de carga instrumentadas, Langone (2012) avaliou a dispersão e acurácia do método quando comparado com metodologias consagradas na prática da engenharia brasileira como o método de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

Para cada tipo de estaca analisada, Langone (2012) gerou 3 (três) gráficos de dispersão, um deles correspondendo carga medida *versus* prevista para o atrito lateral, para a resistência de ponta e para a carga total mobilizada, pelo método UFRGS e pelos métodos semi-empíricos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

Para uma melhor apresentação dos resultados, foram geradas 3 linhas auxiliares com inclinações 2:1, 1:1 e 1:2 simbolizando previsões subestimadas em duas vezes, exatas e superestimadas em duas vezes, respectivamente.

Langone (2012) também diferenciou as provas de carga em dois grupos, em função da confiabilidade na definição da carga de ruptura: i) provas de carga que atingiram, no mínimo, 90% do recalque necessário para a ruptura convencional estabelecido pela NBR 6122/2010, denominada “UFRGS rompida” e, ii) provas de carga que não atingiram o recalque mínimo de 90% do recalque necessário para a ruptura convencional estabelecida pela NBR 6122/2010, denominada “UFRGS extrapolada”. No caso (ii), a carga de ruptura foi obtida através da extrapolação da curva carga-recalque pelo método de Van der Veen.

#### 4.1 ESTACAS METÁLICAS

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os diagramas de dispersão gerados por Langone (2012) do banco de dados composto por 25 provas de carga estáticas instrumentadas realizadas em estacas metálicas.

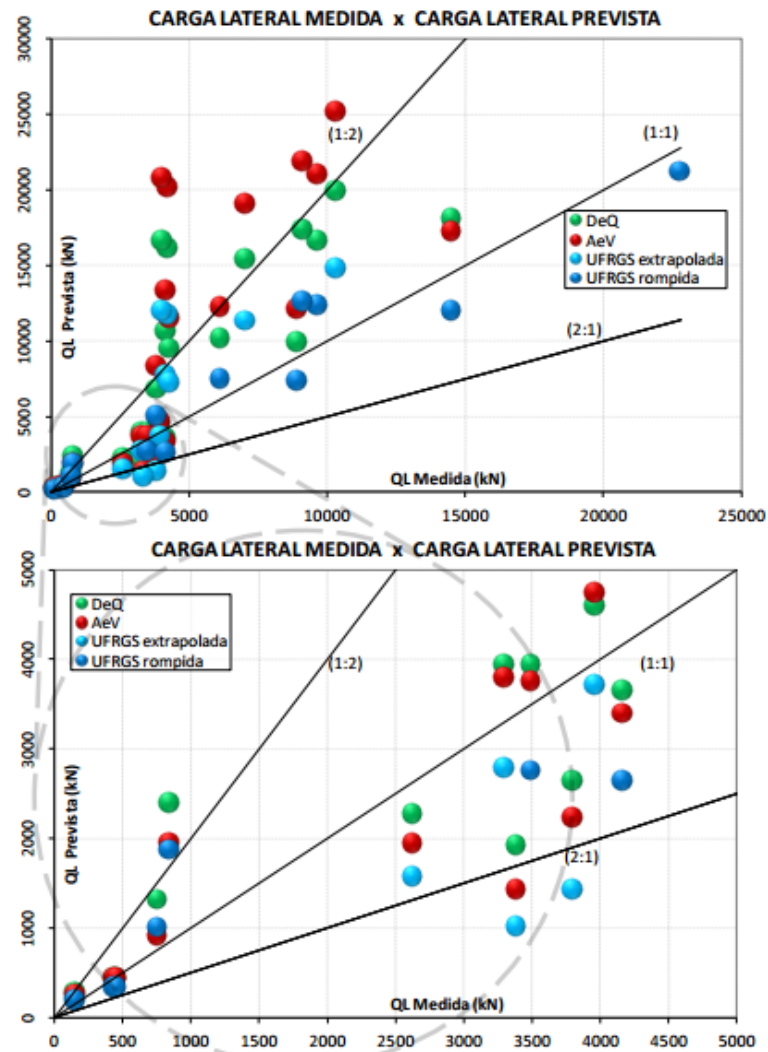
Dos diagramas apresentados e análises estatísticas realizadas (ver Tabela 2), Langone (2012) concluiu que, para estacas metálicas com grande mobilização de carga lateral ( $QL > 500tf$ ), a parcela de atrito lateral prevista pelo método UFRGS forneceu previsões mais próximas dos valores medidos do que os métodos semi-empíricos.

No entanto, no caso de estacas com menor mobilização de carga por atrito lateral, o método UFRGS e os métodos semi-empíricos apresentam resultados similares, tendo o método UFRGS apresentado tendência mais conservadora na maioria dos casos.

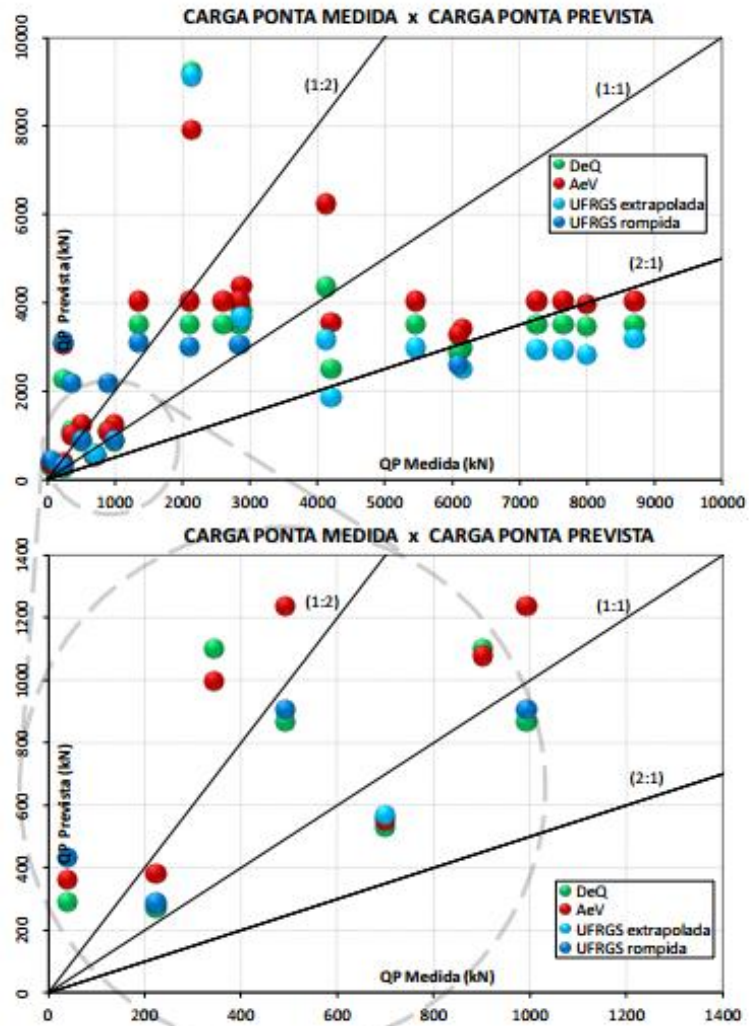
Para a previsão da resistência de ponta de estacas metálicas, o método UFRGS forneceu valores compatíveis aos semi-empíricos, tendendo a ser levemente conservador.

No que diz respeito à estimativa da resistência total (atrito lateral e ponta), o método UFRGS apresentou menor dispersão quando comparado com métodos os métodos semi-empíricos clássicos.

A partir da comparação das previsões do método UFRGS com os métodos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), Langone (2012) conclui: “...o método UFRGS apresenta resultados mais próximos do comportamento medido da estaca e levemente inferior quando comparado com métodos usuais, gerando assim, maior segurança no projeto”.



**Fig. 5** – Carga lateral medida versus carga lateral prevista – Estacas Metálicas (Fonte: Langone, 2012)



**Fig. 6** – Carga de ponta medida versus carga de ponta prevista – Estacas Metálicas (Fonte: Langone, 2012)

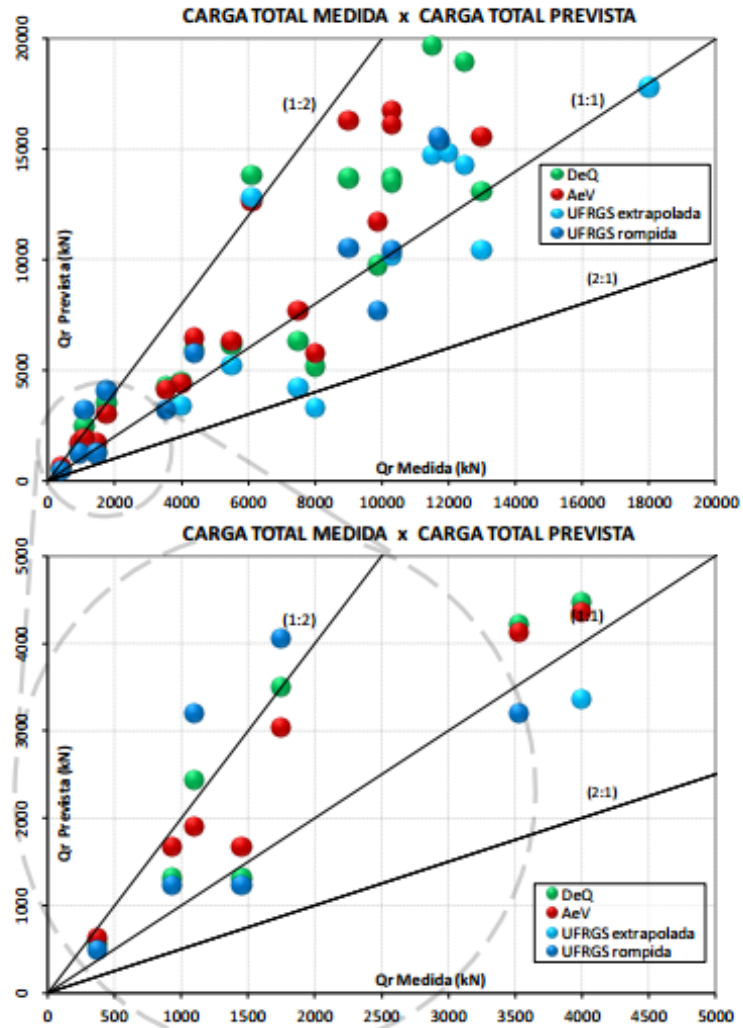


Fig. 7 – Carga total medida versus carga total prevista – Estacas Metálicas (Fonte: Langone, 2012).

Tabela 2 - Análise estatística para a previsão de capacidade de carga de estacas metálicas (Langone, 2012)

Método UFRGS			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	1,2	2,3	1,2
Desvio Padrão	0,7	3,2	0,5

Método Aoki-Velloso			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	1,9	2,4	1,7
Desvio Padrão	1,2	2,8	0,5

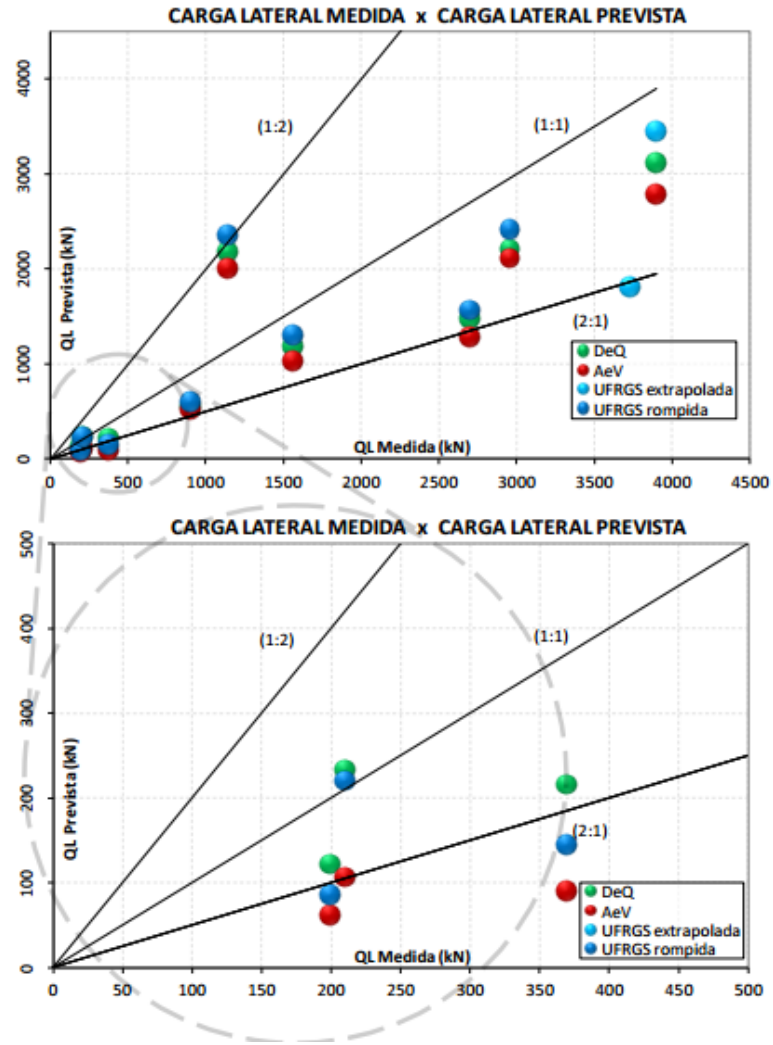
Método Décourt-Quaresma			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	1,7	2,0	1,5
Desvio Padrão	0,9	2,2	0,5

## **4.2 ESTACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ARMADO**

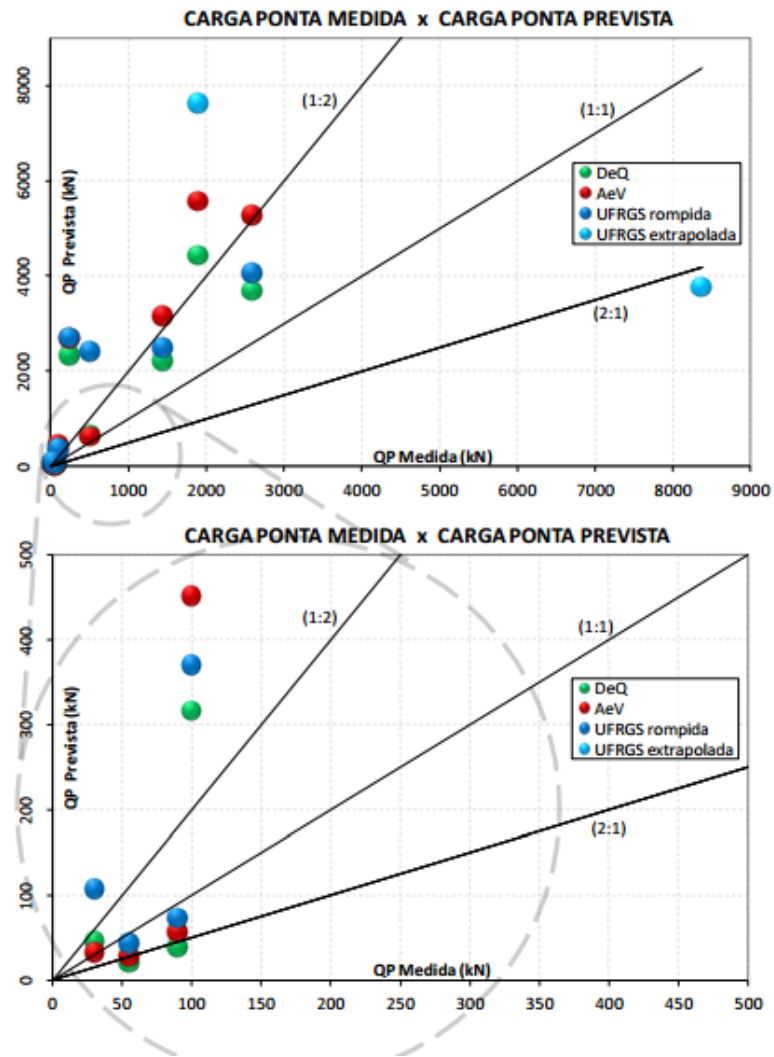
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os diagramas de dispersão gerados por Langone (2012) do banco de dados composto por 10 provas de carga estáticas instrumentadas realizadas em estacas pré-moldadas de concreto armado.

Dos diagramas apresentados e análises estatísticas realizadas (ver Tabela 3), Langone (2012) concluiu que, para estacas do tipo cravada pré-moldadas em concreto armado, os métodos UFRGS, Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978) apresentaram resultados bastante compatíveis entre si e, com tendência a subestimar as previsões de resistência por atrito lateral e superestimar a resistência de ponta.

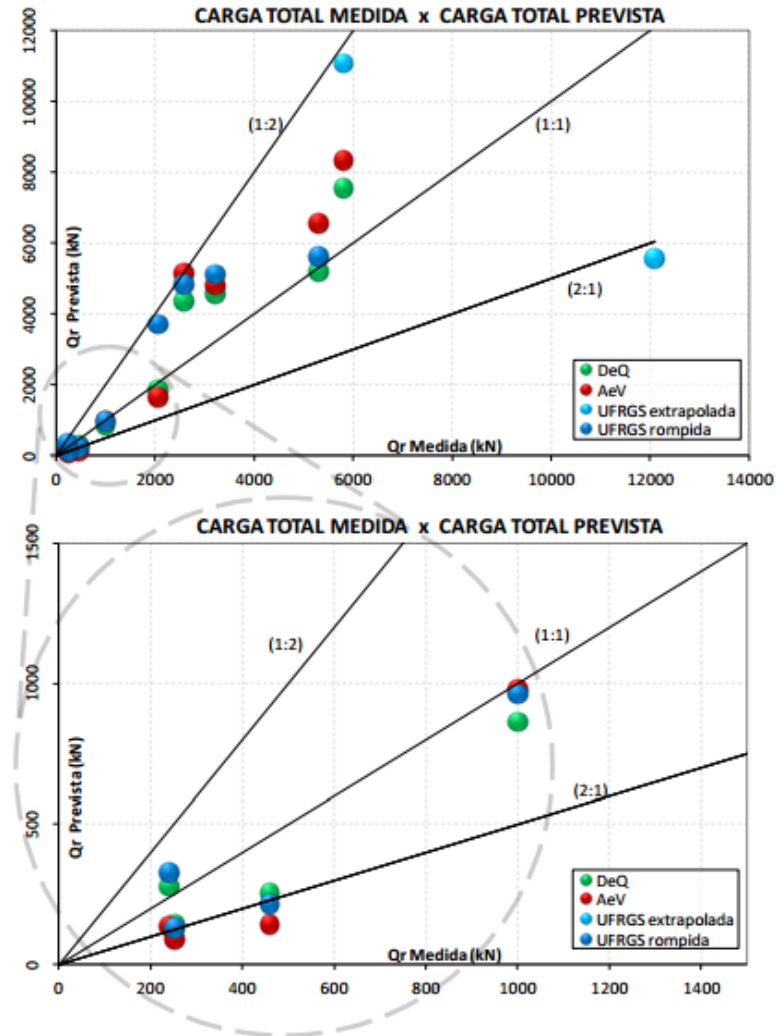
Para a carga total, observa-se tendência a superestimativa da carga total em todas as metodologias de cálculo devido à forte influência da carga de ponta. Esta dependência é justificada pela típica aplicação deste tipo de estaca em solos sedimentares de baixa resistência sobrepostos a camada competente, onde a ponta é embutida. No entanto, Langone (2012) ressalta que, esse grupo de análise apresenta apenas 10 provas de carga assim, as conclusões estão intimamente ligadas e dependentes da amostra estudada.



**Fig. 8** – Carga lateral medida versus carga lateral prevista – Estacas pré-moldadas de concreto armado (Fonte: Langone, 2012)



**Fig. 9** – Carga de punta medida versus carga de punta prevista – Estacas pré-moldadas de concreto armado (Fonte: Langone, 2012)



**Fig. 10** – Carga total medida versus carga total prevista – Estacas Cravadas Pré-moldadas (Fonte: Langone, 2012)

Tabela 3 - Análise estatística para a previsão de capacidade de carga de estacas Pré-moldadas (Langone, 2012)

Método UFRGS			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	0,8	3,2	1,2
Desvio Padrão	0,5	3,1	0,6

Método Aoki-Velloso			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	0,7	2,9	1,0
Desvio Padrão	0,4	3,3	0,6

Método Décourt-Quaresma			
Estimado/Medido			
	QL	QP	QT
Média	0,8	2,4	1,0
Desvio Padrão	0,4	2,8	0,4



## 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram apresentados os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do método UFRGS de previsão de capacidade de carga de estacas. O método, ao contrário de outras metodologias consagradas na prática da engenharia de fundações, é estruturado em conceitos de dinâmica e faz uso dos princípios de conservação de energia envolvidos na cravação do amostrador SPT para, através de uma análise modelo (amostrador SPT) versus protótipo (estaca) prever a capacidade de carga de estacas.

Um exemplo de cálculo de capacidade de carga de estacas através do método UFRGS foi apresentado, ilustrando sua implementação em uma rotina de cálculo simples em plataformas de amplo acesso, como por exemplo o Microsoft Excel.

Embora a formulação apresentada seja bastante simples, não alterando a prática já consagrada de correlacionar o número de golpes  $N_{spt}$  à carga última da estaca, esta nova abordagem apresenta vantagens em relação a métodos semi-empíricos:

a) o uso de diferentes equipamentos e procedimentos utilizados na execução de ensaios SPT, resultantes de fatores locais e grau de desenvolvimento tecnológico regional, não interfere no método de previsão, desde que a eficiência de cada sistema de SPT seja devidamente aferida;

b) a energia transmitida pelo sistema martelo-haste-amostrador é função do tipo de solo e portanto o método captura a influência do solo na previsão da capacidade de carga da estaca. Logo, não há necessidade de introduzir coeficientes empíricos que dependam do tipo de solo, ao contrário das outras metodologias baseadas no ensaio SPT.

Por fim, foram apresentados os resultados da análise de confiabilidade e acurácia do método UFRGS, realizado por Langone (2012), para estacas cravadas metálicas e pré-moldadas através de um banco de dados composto por provas de carga estáticas instrumentadas. O método apresentou resultados compatíveis com as cargas de ruptura medidas, com tendência a subestimar a carga lateral e superestimar a carga de ponta.

A carga de ruptura prevista pelo método UFRGS para estacas metálicas apresentou resultados mais próximos do comportamento real, mais conservadores e de menor dispersão quando comparado com os métodos semi-empíricos clássicos.

Para o grupo avaliado de provas de carga em estacas pré-moldadas de concreto armado, a carga de ruptura prevista é fortemente dependente da carga de ponta, logo, as previsões tanto do método UFRGS quanto dos métodos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978) apresentaram ligeira tendência a superestimar a carga total.

Da análise de realizada, Langone (2012) conclui que o método UFRGS apresenta previsões com menor dispersão de resultados que os métodos semi-empíricos tradicionais, justificando sua utilização na prática de engenharia e, sugerindo a utilização de coeficientes de segurança diferenciados para a obtenção da carga admissível lateral e de ponta de estacas cravadas.

Reitera-se que o método UFRGS não tem como objetivo a redução da dispersão das previsões, pois estas são inerentes à engenharia de fundações. Através da aplicação de conceitos de energia e dinâmica na interpretação do ensaio SPT, busca estabelecer bases para abordagens de maior rigor conceitual, introduzindo nos cálculos os fatores intervenientes do tipo de equipamento, solo e estaca.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 6122 (2010) *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- Aoki, N.; Velloso, D. A. (1975) *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. V Congresso Panamericano de Mecanica De Suelos Y Cimentaciones – Passmfe, Buenos Aires, V5, p. 367-374.
- Bustamante, M; Gianceselli, L (1982) *Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT*. European Symposium on penetration testing, Amsterdam, v2, p 493-500.
- De Ruiter J.; Berigem F. L. (1979) *Pile Foundation for large north sea structures*. Maryne Geotechnology, v3(3), p. 276-314.
- Décourt, L.; Quaresma, A. R. (1978) *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - Cbmsef, Rio de Janeiro.
- Langone, M. J. (2012) *Método UFRGS de previsão de capacidade de carga em estacas: análise de provas de carga estáticas instrumentadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 152p.
- Lobo, B. O. (2005) *Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 121p.
- Lobo, B. O. (2009) *Mecanismos de Penetração Dinâmica em Solos Granulares*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 231p.
- Lobo, B. O.; Schnaid, F.; Odebrecht, O.; Rocha, M. M. (2009) *Previsão de Capacidade de Carga de Estacas através de conceitos de transferência de energia no SPT*. Revista Geotecnia, No 115, pp.5-20.
- Odebrecht, E. (2003) *Medidas de energia no ensaio SPT*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 230 p.
- Odebrecht E., M. M. Rocha, F. Schnaid, G. P. Bernardes (2004) *Transferência de energia no ensaio SPT: Efeito do comprimento de hastes e da magnitude de deslocamentos*. Revista Solos e Rochas, vol. 27:11, p.69-82.
- Odebrecht, E; Rocha, M. M; Schnaid, F; Bernardes, G. P. (2005) *Energy efficiency for standard penetration tests*. ASCE, v 131:10, p.1252-1263.
- Schnaid, F. (2009) *In situ testing in Geomechanics: the main tests*. Oxon: Taylor & Francis p329.
- Schnaid,F.; Lehane, B. M.; Fahey, M. (2005) *In situ test characterization of unusual geomaterials*. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Porto, v1, p.49-73.
- Velloso, P. P. C. (1981) *Estacas em solo: dados para a estimativa do comprimento*. Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia Rio de Janeiro.
- Vésic, A. S. (1972) *Expansion of cavities in infinite soil mass*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v98:SM 3 p. 265-290.