

# COMPORTAMENTO DE ESTACA CARREGADA LATERALMENTE, IMPLANTADA EM SOLO REFORÇADO COM SOLO-CIMENTO

## BEHAVIOR OF POUNDED PILE LATERALLY LOADED, INPLANTED IN REINFORCED SOIL, BY SOIL-CEMENT,

Ferreira, Cláudio Vidrih, *Unesp - Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, Brasil,*  
*vidrih@feb.unesp.br*

Lobo, Ademar da Silva, *Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, Brasil,*  
*lobo@feb.unesp.br*

Carvalho, David de, *Unicamp - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil,*  
*david@agr.unicamp.br*

Albuquerque, Paulo José Rocha de, *Unicamp - Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil,*  
*pjra@fec.unicamp.br*

### RESUMO

Visando quantificar o efeito do colapso do solo e a influência de reforço com solo-cimento, foram realizadas seis provas de carga horizontais sobre uma estaca apiloada de 0,25m de diâmetro e 4m de comprimento. Três destas provas foram executadas com o solo original e outras três procedendo-se previamente o reforço do terreno com solo-cimento. As provas, do tipo rápido, foram conduzidas com o solo no seu estado natural e com pré-inundação do terreno. Neste trabalho, apresentam-se parâmetros geotécnicos do solo, os resultados das provas de carga realizadas, com e sem reforço com solo-cimento, incluindo-se as curvas carga x deslocamento horizontal, as capacidades de carga e os coeficientes de reação horizontal do solo, destacando-se os benefícios obtidos com a substituição do solo original pela mistura de solo-cimento.

### ABSTRACT

Aiming to quantify the soil collapsibility and the influence of the reinforcement with soil-cement mixture, six horizontal load tests were carried out on an pounded pile (pounded piles, called "apiloadas" in Brazil) of 0,25m diameter and 4m length. Three of these tests were made with original soil and the other three after reinforcing the soil with soil-cement mixture. The tests, fast type, were carried out with the soil in its natural condition, and soaking it with water. This paper present soil geotechnical parameters, the results of pile load tests, with and without reinforcement with the soil-cement mixture, including the load curves vs. horizontal displacement, the load capacities, and the coefficients of the horizontal soil reaction, highlighting the benefits gained with the substitution of the original soil by soil-cement mixture.

### 1. INTRODUÇÃO

A cidade de Bauru, situada no Estado de São Paulo, no Brasil, dista cerca de 300 km da capital. O solo local, representativo de grande área do Estado, é constituído por uma areia fina argilosa, residual de arenito. Esse solo, bastante poroso, devido ao intenso processo de lixiviação a que foi submetido, apresenta predominância de partículas de areia fina interligadas por cimento argiloso, susceptível a colapso. Esse tipo de solo permite que se executem, facilmente, estacas moldadas *in loco*, sem revestimento, denominadas de apiloadas.

Visando fornecer parâmetros de projeto para o meio geotécnico, quantificar o efeito do colapso do solo e a influência de reforço com solo-cimento, foram executadas seis provas de carga horizontais sobre uma estaca apiloada de 0,25m de diâmetro e 4,0 m de comprimento. Numa primeira campanha (FERREIRA et al., 2001), foram realizadas três destas provas de carga com o solo original, sendo os dois primeiros carregamentos efetuados com o solo natural e um terceiro ciclo com inundação do terreno.

Posteriormente, três novas provas de carga foram realizadas, com e sem inundação do terreno, procedendo-se previamente o reforço do terreno com solo-cimento, substituindo-se o material da região da cabeça da estaca, num volume de  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ , por uma mistura de solo-cimento, compactando-o em camadas, reforçando-se química e mecanicamente o terreno de fundação.

A execução das provas de carga, do tipo rápida, permitiu avaliar os benefícios do reforço com solo-cimento, cotejando-os com os valores obtidos no ensaio com o terreno sem reforço, bem como possibilitaram estudar o efeito da colapsibilidade no terreno melhorado e sua influência no coeficiente de reação horizontal do solo. Os resultados servirão de subsídios em futuros projetos geotécnicos a serem executados na região e no interior do estado de São Paulo, bem como para os projetistas deste tipo de fundação de uso muito freqüente no interior de São Paulo.

Neste trabalho, apresentam-se parâmetros geotécnicos do solo local e os resultados das provas de carga realizadas, com e sem reforço de solo-cimento, incluindo-se as curvas carga x deslocamento horizontal, as capacidades de carga e os coeficientes de reação horizontal do solo, destacando-se os benefícios obtidos com a substituição do solo original pela mistura de solo-cimento. Os resultados obtidos permitirão um melhor conhecimento do comportamento deste tipo de estaca, quando submetidas a cargas horizontais, visto que as características geológico-geotécnicas desse solo são similares ao de grande área do Estado de São Paulo.

## **2. CARACTERÍSTICAS DO SOLO LOCAL**

Os ensaios foram realizados no Campo Experimental da Unesp, Universidade Estadual Paulista, campus de Bauru, com área de  $52.000 \text{ m}^2$ . Neste campo, foram executados ensaios penetrométricos, abertura de poço para coleta de amostras e efetuadas provas de carga, com diferentes tipos de carregamentos. Os valores médios, típicos dos parâmetros deste solo residual de arenito, obtidos nos ensaios de laboratório, são apresentados no quadro 1. A figura 1 retrata um perfil geotécnico médio, característico do solo que ocorre na região.

Além destes ensaios de campo e laboratório, tem-se realizado inúmeras provas de carga em fundações usualmente utilizadas na região, submetendo-as a solicitações de compressão, de tração e carregamento horizontal. Nestas pesquisas, tem se procurado estabelecer comparações entre o comportamento dos diversos tipos de fundação, com o solo no estado natural e após inundação, com o objetivo de se avaliar a influência do colapso.

## **3. ESTACAS APILOADAS**

As estacas apiloadas, também conhecidas como estacas pilão ou soquetão, são consideradas estacas de deslocamento, moldadas *in loco*, sem revestimento sendo sua execução possível apenas em terrenos porosos e não saturados, situação comum no interior do Estado de São Paulo. O equipamento empregado na sua execução, denominado de *bate-estaca*, é constituído de um tripé, soquete e motor, tal como na estaca Strauss, exceto com relação à piteira e ao revestimento.

Quadro 1 – Parâmetros geotécnicos médios

Propriedades	unidade	média.
GRANULOMETRIA		
areia média	%	5
areia fina	%	69
silte	%	11
argila	%	15
INDICES FÍSICOS		
teor de umidade (W)	%	10
massa específica ( $\rho$ )	( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	1,77
massa esp. dos sólidos ( $\rho_s$ )	( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	2,68
índice de vazios (e)	-	0,67
grau de saturação (Sr)	%	42
massa esp. seca ( $\rho_d$ )	( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	1,6
LIMITES DE CONSISTÊNCIA		
limite de liquidez (LL)	%	22,3
índice de plasticidade. (IP)	%	6,1
RESISTÊNCIA (EFETIVA)		
res. compressão simples Rc	kPa	39
coesão c	kPa	14
ângulo atrito $\phi$	graus	30

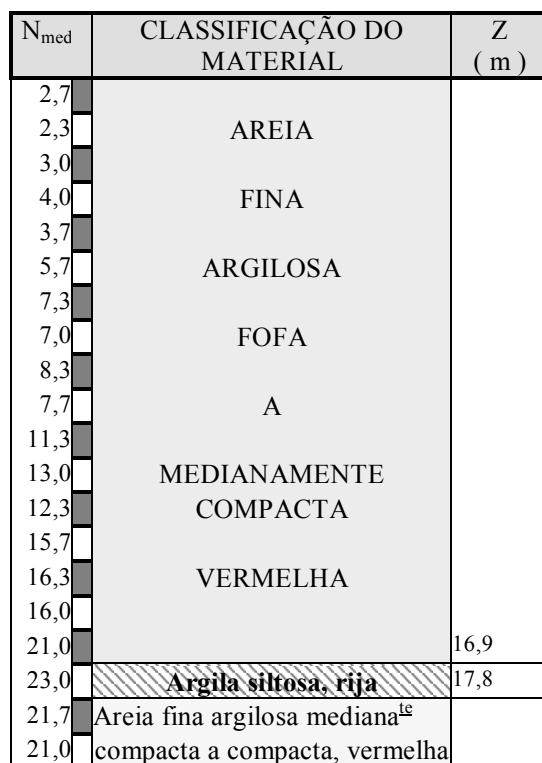


Figura 1 – Perfil geotécnico médio do solo.

O tripé, formado por tubos metálicos desmontáveis, apresenta altura da ordem de 6,0m. O soquete, geralmente de forma cilíndrica, apresenta massa variando de 200kg a 600kg e comprimento bastante variável. Seu diâmetro é usualmente 2 a 3cm menor que o diâmetro nominal da estaca. O motor pode ser a diesel, gasolina ou elétrico, assentado sobre um estrado de madeira. As fotos 1 a 3 mostram vistas do equipamento utilizado, onde se observa o motor sobre uma plataforma de madeira, o tripé e um tipo de soquete.

O furo é aberto com a queda do soquete, suspenso por um cabo de aço, que vai apiloando o solo, deslocando-o lateralmente e para baixo, formando ao redor do fuste um anel de solo fortemente compactado, que mantém a estabilidade do furo. A perfuração prossegue até a cota desejada ou até atingir-se camadas de difícil penetração do soquete.

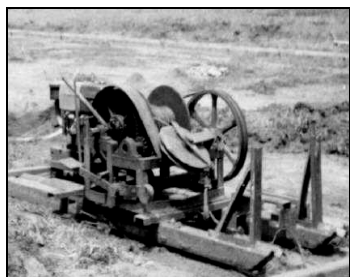


Foto 1 – Motor e plataforma.



Foto 2 - Tripé.



Foto 3 - Motor e soquete.

Destaque-se que não é utilizado nenhum tipo de revestimento durante as etapas de execução, exceto algumas vezes em que se emprega um tubo guia, metálico, apenas nos primeiros metros da estaca. Algumas empresas efetuam a abertura de um pré-furo, da ordem de 1,0m, com cavadeira manual, com intuito de reduzir o risco de trincas nas construções vizinhas.

Terminada a perfuração, efetua-se o lançamento do concreto. A concretagem varia muito em função da empresa executora. Algumas costumam fazer uma bucha utilizando concreto com baixo fator água/cimento (quase seco) ou brita na ponta, concretando o fuste em camadas com discreto apiloamento do concreto, à medida que o fuste vai sendo preenchido; outras simplesmente lançam o concreto plástico da superfície, com auxílio de funil, sem apiloamento. Considera-se mais apropriado o procedimento da concretagem sem apiloamento, pois se elimina a possibilidade do contato do soquete com a parede do furo, e a conseqüente contaminação do concreto, com a mistura de solo.

Segundo FERREIRA (1998), a lacuna existente na literatura nacional, que geralmente omite esse tipo de fundação, não permitiu muitos avanços quanto à garantia de uma capacidade de carga nem a uma necessária e premente padronização na sua forma de execução, podendo-se afirmar que, ainda hoje, em diversos locais, trata-se de uma estaca artesanal, com inúmeras variações no seu processo executivo.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização destas duas campanhas de ensaios, foram executadas estacas de 4,0; 7,0 e 10m de comprimento. A abertura do furo, por apiloamento do solo, foi efetuada com soquete de ponta plana com uma massa aproximada de 400kg e diâmetro 0,22m, de tal forma que resultasse um diâmetro nominal de 0,25m. Estas estacas foram executadas com uma armadura construtiva composta por quatro barras de aço de 10mm, dispostas ao longo do fuste. Na cabeça das estacas foram executados blocos, com o uso de formas de madeira, em formato cúbico, com 0,40m de aresta. Na concretagem das estacas e blocos utilizou-se concreto usinado com fck de 20MPa. As fotos 4 e 5 retratam vista das estacas e das provas executadas.



Foto 4 – Vista das estacas ensaiadas.



Foto 5 – Vista de uma prova de carga.

Na execução das provas de carga, com esforço horizontal, foram utilizados os seguintes equipamentos: macaco hidráulico e bomba, com capacidade de 500kN; rótula metálica; célula de carga com capacidade de 500kN; dispositivo medidor de carga; chapas metálicas e perfis metálicos; relógios comparadores (extensômetros), com precisão nominal de 0,01mm; tirantes Dywidag ( $\phi$  32 mm); vigas de referência; bases magnéticas; cronômetros, etc.

Na primeira campanha de ensaios, conforme FERREIRA et al (2001; 2002 e 2003), sobre estacas de 4,0; 7,0 e 10,0m de comprimento, respectivamente, foram realizadas três destas provas de carga com o solo original, sendo os dois primeiros carregamentos efetuados com o solo natural e um terceiro ciclo com pré-inundação do terreno, por 48 horas.

Posteriormente, três novas provas de carga foram realizadas, com e sem inundação do terreno, procedendo-se previamente o seu reforço com solo-cimento, substituindo-se o material da região da cabeça da estaca, num volume de  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ , por uma mistura de solo-cimento, compactando-o em camadas, reforçando-se química e mecanicamente o terreno de fundação. A figura 2 representa, em planta, a área ocupada pelo bloco de solo-cimento. As fotos 6 e 7 retratam etapas da execução do reforço em solo-cimento.

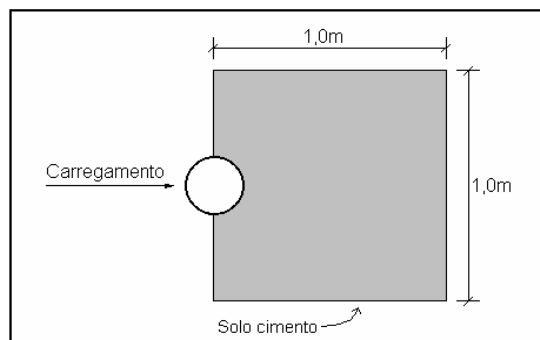


Figura 2 - Bloco de solo-cimento.



Foto 6 – Vista da abertura da vala.



Foto 7 – Trabalhos de substituição do solo.



Foto 8 – Vista do reforço executado.

Baseado em pesquisas anteriores, realizadas com o solo do campo experimental, na elaboração da mistura de solo-cimento adotou-se um teor de cimento de 10% em volume, resultando num consumo médio da ordem de 150kg de cimento por metro cúbico da mistura.

Para a execução das provas de carga, serviu como reação uma estaca apiloada de 4,0m de comprimento e diâmetro de 0,25m. O registro do deslocamento horizontal da estaca foi efetuado através de 3 deflectômetros fixados às bases magnéticas e instalados na face do bloco oposta à da aplicação da carga e situados em pontos de interseção de linhas verticais e horizontais, formando um triângulo aproximadamente equilátero. Essa disposição permitiu a determinação do deslocamento e da rotação do bloco. A figura 3 ilustra o esquema utilizado nas provas de carga, enquanto a figura 4 representa a disposição dos relógios no bloco.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, são reportados os resultados obtidos por FERREIRA et al (2001), sem solo-cimento (SSC), e apresentados e analisados os resultados obtidos nas provas de carga horizontais executadas na estaca apiloada de 4,0m de comprimento com reforço de solo-cimento (CSC). Os resultados são comparados objetivando verificar-se os benefícios do reforço executado.

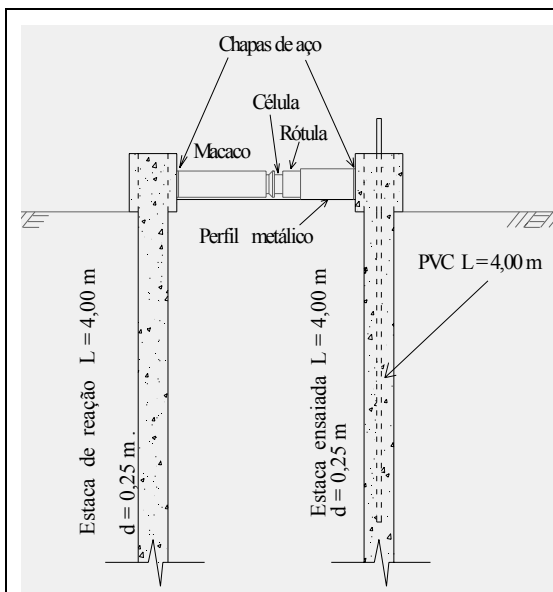


Figura 3: Esquema geral da prova de carga.

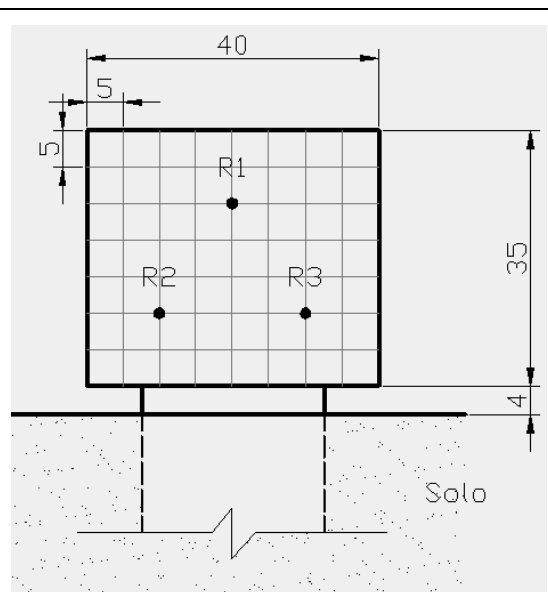


Figura 4: Posição dos extensômetros.

No quadro 2, em conformidade com FERREIRA et al (2001), destaca-se um resumo das provas executadas, no qual são indicados, dentre outros, a condição do solo e os valores máximos para carga e deslocamento horizontal máximo observado na estaca ensaiada, obtidos em cada prova realizada. No quadro 3, apresenta-se uma síntese das provas conduzidas com reforço do terreno com solo-cimento. Nas figuras 5 e 6, são representados os conjuntos das curvas carga x deslocamento, resultantes das 6 provas de carga efetuadas, sendo três com o solo original (SSC) e três com o reforço do terreno com solo-cimento (CSC). Nas figuras 7 e 8 são mostrados os aludidos conjuntos, com os deslocamentos acumulados, permitindo observar o efeito do recarregamento no comportamento da estaca estudada.

Quadro 2. Resumo das provas sem solo-cimento (SSC) – FERREIRA et al (2001).

Número do Ensaio	Condição do solo	Número de estágios	Duração da prova (h)	Carga máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)
PC 01 SSC	Natural – N	29,0	2,6	29,0	26,8
PC 02 SSC	Natural – N	36,0	3,2	36,0	35,3
PC 03 SSC	Inundado – I	24,0	2,2	24,0	31,4

Quadro 3. Resumo das provas com solo-cimento (CSC).

Número do Ensaio	Condição do solo	Número de estágios	Duração da prova (h)	Carga máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)
PC 01 CSC	Natural – N	33	3,3	132	28,5
PC 02 CSC	Natural – N	25	2,6	100	25,9
PC 03 CSC	Inundado – I	27	2,7	58	36,3

Da análise da figura 7, observa-se que para os dois primeiros carregamentos, com o solo natural, até por volta de 30mm as curvas são distintas, como era de se esperar, obtendo-se deslocamentos muito superiores no segundo carregamento, para a mesma carga aplicada. Esse fato realça que o solo tem comportamento próximo do estado elasto-plástico, se deforma e não volta a sua posição inicial quando descarregado; assim, quando da aplicação do segundo carregamento, não havia o solo se opondo ao deslocamento, no topo da estaca, e esta funcionava como que engastada a uma determinada profundidade.

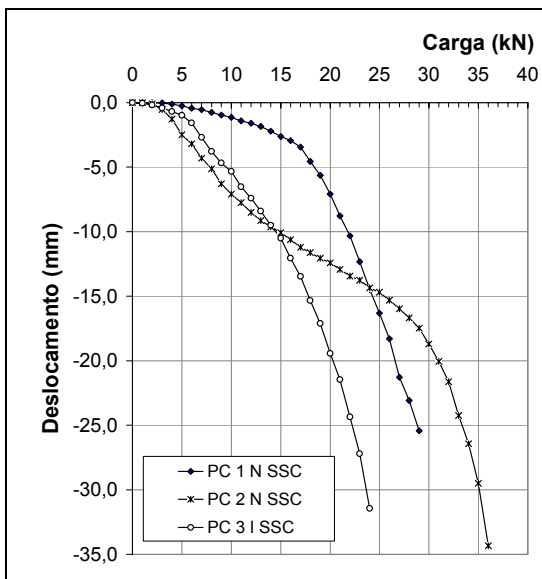


Figura 5: Conjunto das curvas – SSC.

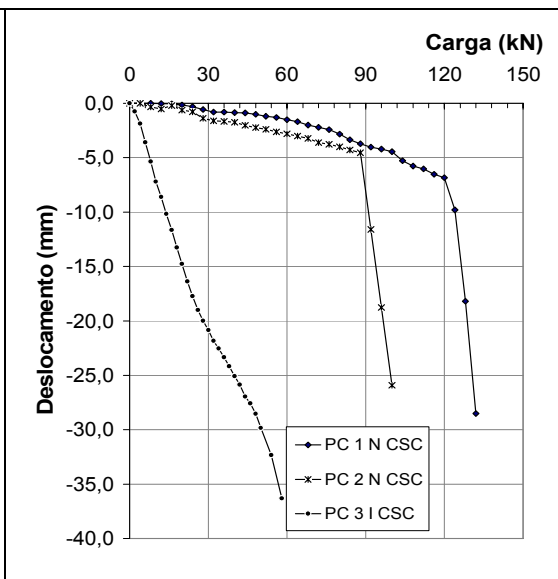


Figura 6: Conjunto das curvas – CSC.

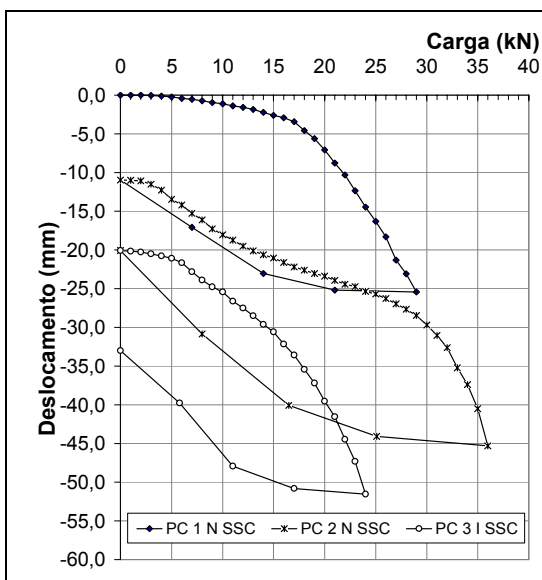


Figura 7: Curvas acumuladas – SSC

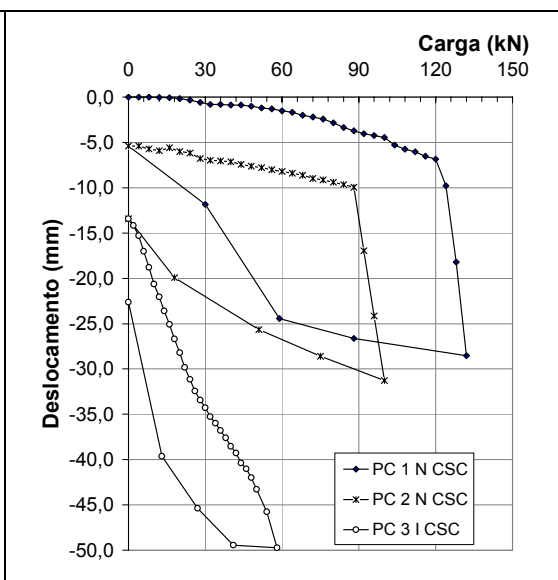


Figura 8: Curvas acumuladas – CSC.

No segundo carregamento, ocorre uma redução progressiva taxa de deslocamento, até próximo de 30 kN, sendo que a partir desse ponto o trecho da curva tende a assumir a continuação da curva do 1º ensaio. Esta tendência de continuidade do carregamento anterior, é semelhante ao que se obtém quando se recarrega uma estaca com carga vertical pela 2ª vez. No 3º carregamento, após inundação prévia do terreno ao redor da estaca, fica evidenciado o caráter colapsível do solo, com taxa de deslocamento crescente com a carga, não indicando nenhuma tendência de se aproximar da curva obtida no 2º carregamento, como ocorreu entre o primeiro e segundo ensaio.

Nas figuras 7 e 8, os menores deslocamentos, obtidos no início do 3º carregamento, para a mesma carga aplicada, quando comparado com o 2º carregamento, pode ser devido ao preenchimento parcial, do espaço livre entre a estaca e o terreno, quando do descarregamento do 2º ensaio. A água de inundação do solo acabou carregando material para o espaço existente entre a estaca e o solo.

A partir das curvas carga x deslocamento, foram obtidas as capacidades de carga convencional ( $Q_u$ ), correspondente ao deslocamento de 25mm ( $D/10$ ). No quadro 4, são indicados os valores obtidos nas duas campanhas de ensaio, sem e com solo-cimento, no qual se observa o efeito do colapso do solo e os benefícios do reforço do terreno com solo-cimento. A figura 9 permite uma visão global do efeito da melhoria do solo no comportamento da estaca ensaiada.

Quadro 4. Valores de capacidades de carga.

Nº do Ensaio	Condição Do solo	Solo original - SSC	Solo reforçado – CSC	$Q_{u_{CSC}}/Q_{u_{SSC}}$
		$Q_{u_{SSC}}$	$Q_{u_{CSC}}$	
PC 01	Natural – N	29	130	4,48
PC 02	Natural – N	33	98	2,97
PC 03	Inundado – I	21	40	1,90

Do quadro 4, observa-se que na primeira campanha de ensaios houve uma redução próxima de 30% na capacidade de carga da estaca, devido ao colapso do terreno, enquanto na segunda pesquisa, o efeito do colapso é muito mais drástico promovendo uma redução da ordem de 70%.

Comparando-se a influência do solo-cimento no comportamento da estaca de 4,0m, verifica-se que o benefício é altamente significativo resultando na primeira prova de carga uma capacidade de carga 4,48 vezes superior aquela do solo original. Embora menos acentuado, o efeito do reforço também é significativo quando do encharcamento do terreno, efetuado no terceiro ensaio, apresentando uma capacidade de carga 1,90 vezes superior aquela sem solo-cimento.

Em conformidade com MATLOCK & REESE (1961), foram determinados os valores do coeficiente de reação horizontal do solo ( $n_h$ ) para as 3 provas efetuadas sem solo-cimento (SSC), obtidas como valor médio no intervalo 6 mm e 12 mm para o deslocamento da estaca, admitindo-se que o módulo de reação horizontal do solo varia linearmente com a profundidade, como acontece em solos tipicamente arenosos.

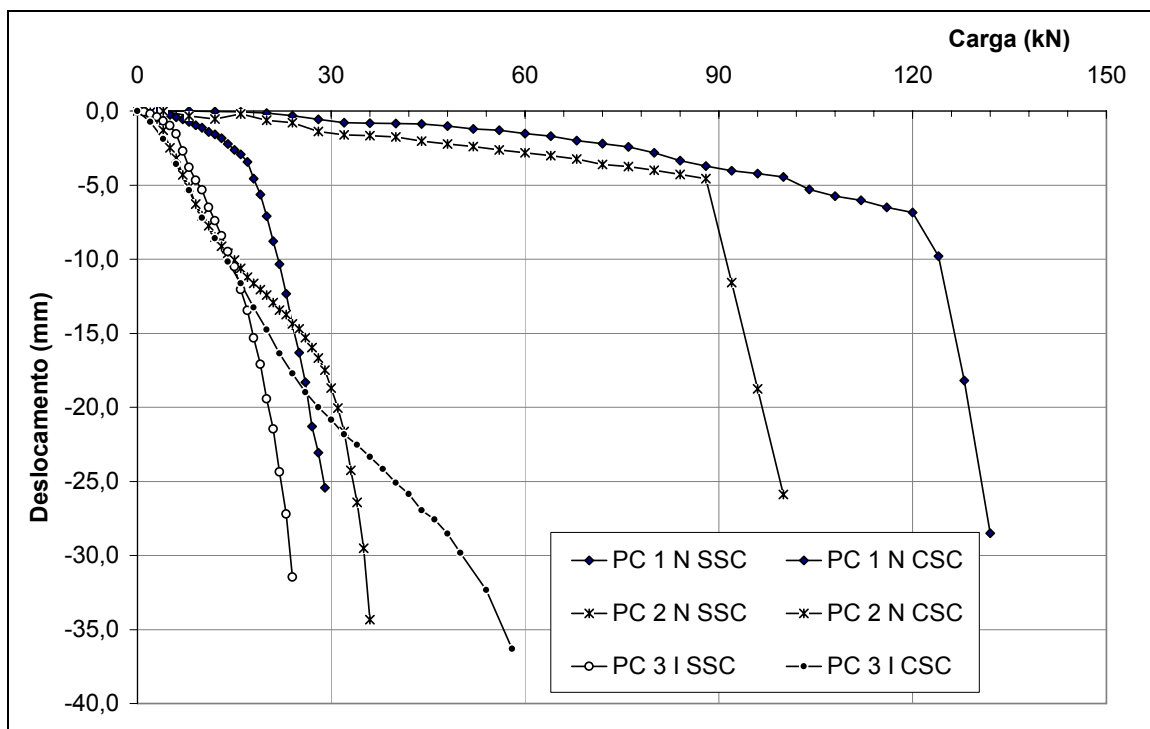


Figura 9 – Conjunto das curvas carga x deslocamento.



No quadro 5, são indicados os valores do coeficiente de reação horizontal do solo original (SSC), relativos ao primeiro e terceiro ensaio, conduzidos com o solo natural e pré-inundado, respectivamente. A figura 10 destaca o conjunto de curvas  $n_h$  x  $y_0$  obtidas com o solo original. Não foi possível a determinação dos valores de  $n_h$  para o terreno reforçado com solo-cimento, podendo o número de carregamentos efetuados, aliado as trincas sofridas pelo terreno ter comprometido a sua definição.

Quadro 5 - Valores de  $n_h$  (MN/m<sup>3</sup>) – sem solo-cimento. (FERREIRA et al 2001).

Nº do ensaio	$n_h$ (MN/m <sup>3</sup> )		
	$y_0 = 6,0\text{mm}$	$y_0 = 12,0\text{mm}$	$n_{h\text{MÉD}}$
PC 01 SSC	10,2	4,5	7,4
PC 03 SSC	5,0	2,8	3,9
Redução (%)	51	38	47

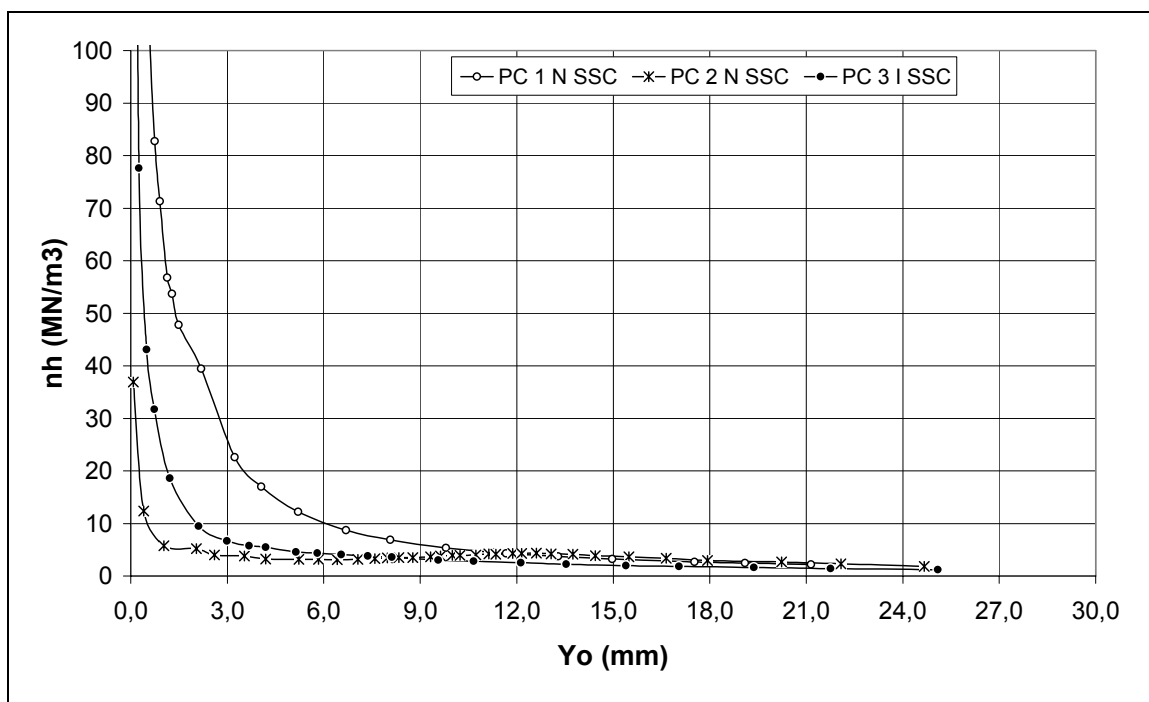


Figura 10 – Conjunto de curvas  $n_h$  x  $y_0$  – solo original (SSC).

O valor de  $n_h$ , obtido no 2º carregamento, não tem qualquer aplicação prática, pois nesse ensaio o solo não estava reagindo contra a estaca no trecho superior, onde o seu efeito é mais significativo. Novamente, ficou evidenciado o caráter colapsível do solo ao se comparar os valores de  $n_h$  obtidos no 1º carregamento, com o solo natural e no 3º, executado após pré-inundação do solo. Conforme indicado no quadro 5, essa redução foi da ordem de 47%.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria do terreno com a utilização de solo-cimento demonstrou que a capacidade de carga é altamente influenciada pelo reforço. A capacidade de carga, com o terreno natural, sofreu um acréscimo de cerca de 350%.

Mesmo com o emprego do reforço, o caráter colapsível ficou evidenciado, face ao decréscimo observado quando da inundação, entretanto, é evidente que o reforço, mesmo neste caso, trouxe significativo acréscimo na capacidade de suporte do solo.

Mesmo considerando a colapsibilidade do solo, o efeito do reforço foi decisivo no acréscimo da carga de colapso tendo sido 90% superior em relação ao solo original. Destarte, ficou evidente que o emprego de solo-cimento como reforço do solo é uma excelente opção para melhorar a capacidade de carga do terreno, quando submetido a esforços horizontais.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que contribuiu para a implantação do Campo Experimental e concedeu auxílios que permitiram o desenvolvimento de pesquisas que subsidiaram a realização deste trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, C.V. *Influência da inundação do solo no comportamento de estacas moldadas in loco, instrumentadas, em campo experimental de Bauru*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998, 160p.
- [2] FERREIRA, C.V.; LOBO, A.S.; CARVALHO, D.& ALBUQUERQUE, P.J.R. Estacas apiloadas submetidas a esforços horizontais. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 4, Porto Alegre-RS, 2001. Anais..., ABMS-UFRS, 2001, pp. 471-489.
- [3] FERREIRA, C.V.; LOBO, A.S.; CARVALHO, D. & ALBUQUERQUE, P.J.R. *Comportamento de estacas apiloadas carregadas lateralmente*. In: CONGRESSO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERIA GEOTÉCNICA, XVI CAMSIG, Patagônia-Argentina, 2002. Anais em CD. 11p.
- [4] FERREIRA, C.V.; LOBO, A.S.; CARVALHO, D. & ALBUQUERQUE, P.J.R. Influência da Inundação no Comportamento de Estacas Apiloadas, Carregadas Lateralmente. ***SBPN Scientific Journal***, 2003, São Paulo/SP., v.7 – edição especial - 2003, p.216-218. ISSN 1415-6512.
- [5] MATLOCK H. & REESE, L. C. *Generalized solutions for laterally loaded piles*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 86, nº SM5, 1091, p. 63-91.