A CONTRIBUIÇÃO DO SOLO REFORÇADO COM SOLO-CIMENTO NO COMPORTAMENTO DE ESTACA CARREGADA LATERALMENTE

THE CONTRIBUTION OF REINFORCED SOIL, BY SOIL-CEMENT, IN BEHAVIOR OF LATERALLY LOADED POUNDED PILE

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 10m 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 de carga, 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 e as capacidades de carga e os coeficientes de reação horizontal do solo. Os resultados são apresentados e comparados, 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 10m length. Three of these tests were made with original soil and the other three after reinforcing the soil with soil-cement mixture. The load tests, quick type , were carried out with the soil in its natural condition, and soaking it with water. This paper present geotechnical parameters of soil, 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. The results are presented and compared, 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 300km da capital. O solo local, representativo de grande área do Estado, é constituído por uma areia fina argilosa, residual de arenito. Na maioria das sondagens à percussão não é encontrado o lençol freático, constatando-se a existência de espessas camadas de solo não saturado, laterizado.

Esse solo, bastante poroso devido ao intenso processo de lixiviação, apresenta predominância de partículas de areia fina interligadas por cimento argiloso, susceptível a colapso. A formação desse solo em clima tropical, onde ocorre alternância de estações chuvosas com estações de relativa seca, promove uma intensa lixiviação dos finos do horizonte superficial, criando uma estrutura porosa e muito permeável, normalmente com nível freático profundo, e espessas camadas de solo não saturado.

Esse tipo de solo permite que se executem, facilmente, estacas moldadas *in loco,* sem revestimento, denominadas de apiloadas, nas quais a abertura do fuste é efetuada com a queda livre de um soquete (pilão), que produz uma abertura no terreno, deslocando e compactando o solo ao redor do fuste. No interior de São Paulo, as estacas apiloadas são largamente utilizadas para obras de pequeno e médio porte. Apesar do seu largo uso, a previsão de sua capacidade de carga é bastante complexa, entretanto, o baixo custo e a simplicidade de sua execução tem sido um fator determinante na sua escolha.

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, tratando-se, ainda, de uma estaca artesanal, com inúmeras variações no seu processo executivo.

Também, é grande o numero de situações em que estas estacas são submetidas a esforços horizontais, combinado com solicitações de compressão ou tração. Assim, visando fornecer parâmetros de projeto para o meio geotécnico, procurando-se 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 com 10m de comprimento.

Três dessas provas de carga foram realizadas 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 $1m^3$, 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 ensaios foram realizados no Campo Experimental da Unesp – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus de Bauru. Nesse campo, implantado em 1991, numa área de aproximadamente $52.000m^2$, já foram realizadas inúmeras campanhas de ensaios, tais como: SPT, SPT-T, CPT. A figura 1 representa a variação do SPT médio com a profundidade, com os respectivos valores obtidos em dois programas de sondagens, característicos do solo de grande área do Estado. Além desses ensaios de caracterização já foram realizadas inúmeras provas de carga em elementos de fundações usualmente utilizadas na região.

Neste trabalho, são apresentados parâmetros geotécnicos do solo local e 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.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, são apresentados os resultados das provas de carga realizadas, conduzidas com o solo natural e com pré-inundação do terreno, bem como sem e com reforço de solo-cimento.

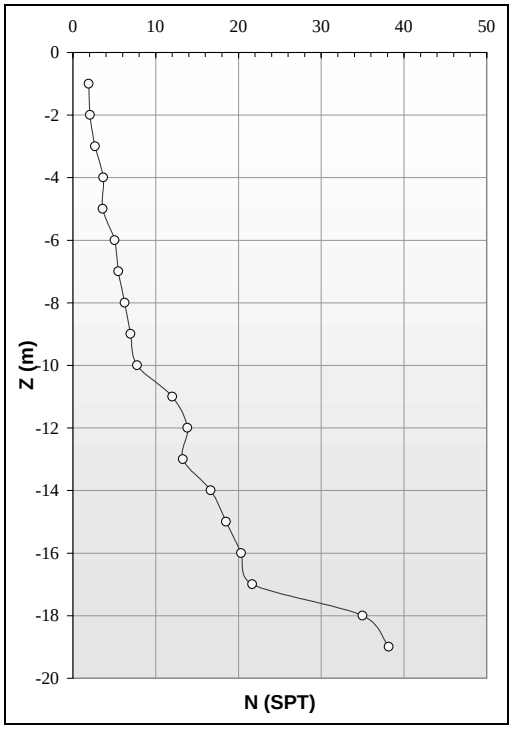
2.1. Provas de carga

As provas de carga foram executadas em uma estaca apiloada de 0,25m de diâmetro 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 de todo o 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 figuras 2 e 3 retratam vistas das estacas e das provas executadas.

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; vigas de referência; bases magnéticas; cronômetros etc.

Para a execução das provas de carga, utilizou-se como reação uma estaca apiloada de 10,0m de comprimento e diâmetro de 0,25m. O registro do deslocamento horizontal do bloco de capeamento da estaca foi efetuado através de três deflectômetros fixados a bases magnéticas e instalados na face do bloco oposta à da aplicação da carga, formando um triângulo aproximadamente eqüilátero.



Z	Ensaio SPT-T			Ensaio SPT			Média
(m)	N_{01}	N_{02}	N_{03}	N'_{01}	N'_{02}	N'_{03}	$N_{MÉD}$
-1,0	1,9	2,2	3,4	2,0	1,0	1,0	1,9
-2,0	1,7	2,6	3,2	2,0	1,0	2,0	2,1
-3,0	3,3	2,9	3,0	2,0	2,0	3,0	2,7
-4,0	4,8	4,0	4,3	2,0	3,0	4,0	3,7
-5,0	4,5	2,3	4,8	3,0	3,0	4,0	3,6
-6,0	6,0	6,0	5,4	4,0	3,0	6,0	5,1
-7,0	6,2	8,1	7,7	4,0	4,0	3,0	5,5
-8,0	8,4	4,5	8,6	6,0	5,0	5,0	6,3
-9,0	8,2	7,0	8,7	6,0	6,0	6,0	7,0
-10,0	6,6	7,0	9,0	10,0	6,0	8,0	7,8
-11,0	10,0	10,0	13,1	15,0	13,0	11,0	12,0
-12,0	11,0	13,0	15,0	17,0	13,0	14,0	13,8
-13,0	11,8	12,0	14,0	16,0	10,0	16,0	13,3
-14,0	15,5	13,5	18,0	15,0	20,0	18,0	16,7
-15,0	16,0	13,0	20,0	17,0	23,0	22,0	18,5
-16,0	15,0	13,0	20,0	28,0	21,0	25,0	20,3
-17,0	20,0	19,0	24,0	18,0	20,0	29,0	21,7
-18,0	19,0	19,0	31,0	51,0	72,0	18,0	35,0
-19,0	25,0	18,0	22,0	55,0	70,0	39,0	38,2

Figura 1 – Variação do SPT médio com a profundidade, representativo do solo da região.

Na primeira campanha de ensaios, conforme Ferreira et al (2003), foram realizadas três destas provas de carga, do tipo rápido, 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 reforço do terreno com solo-cimento. Em conformidade com a norma os estágios tiveram duração de 5 minutos, independentemente de estabilização.

Para a pré-inundação foi executada uma cava ao redor do solo reforçado que foi preenchida com água, consumindo-se cerca de 9000 litros de água por dia, cujo controle foi feito uso de bóia e hidrômetro.

2.2. Reforço em solo-cimento

O reforço consistiu em melhorar química e mecanicamente o solo ao redor da estaca, executando-se um bloco cúbico de solo-cimento de 1m de aresta no lado oposto ao do carregamento da estaca, o qual foi compactado manualmente em camadas de espessura 0,20m.

O solo utilizado é originário do próprio local do ensaio, visto que o solo superficial de Bauru apresenta características favoráveis à execução do solo-cimento e o consumo de cimento foi de 8% em relação à massa seca de solo, que corresponde a cerca de 10% em volume, utilizando-se teor de umidade de compactação de 12%, baseado em estudos de Firmino (1998).

O traço da mistura elaborada resultou num consumo médio da ordem de 150kg de cimento por metro cúbico da mistura. A figura 4 representa, em planta, a área ocupada pelo bloco de solo-cimento. As figuras 5 e 6 retratam etapas do procedimento de execução do reforço em solo-cimento, enquanto a figura 7 indica o esquema geral para realização das provas de carga.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, são reportados os resultados obtidos por Ferreira et al (2003), sem solo-cimento (SSC), e apresentados e analisados os resultados obtidos nas provas de carga horizontais executadas na estaca apiloada de 10,0m de comprimento com reforço de solo-cimento (CSC). Os resultados são comparados objetivando-se verificar os benefícios do reforço executado. No quadro 1, 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.

Figura 2 – Vista das estacas ensaiadas.

Figura 3 – Vista de uma prova de carga.

No quadro 2, apresenta-se uma síntese das provas conduzidas com reforço do terreno com solo-cimento (CSC). Nas figuras 8 e 9 são mostrados os aludidos conjuntos, com os deslocamentos acumulados, permitindo observar o efeito do recarregamento no comportamento da estaca estudada. A figura 10 retrata a superposição de todas as curvas carga x deslocamento resultante das provas executadas com e sem o reforço de solo-cimento.

Quadro 1. Resumo das provas sem solo-cimento (SSC) – Ferreira et al (2003).

Número do Ensaio	Condição do solo	Número de estágios	Duração da prova (h)	Carga máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)
PC 01 SSC	Natural – N	25	2,8	36,0	29,5
PC 02 SSC	Natural – N	26	2,8	39,0	46,5
PC 03 SSC	Inundado – I	18	2,1	27,0	53,5

Quadro 2. 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	25	2,8	196	27,0
PC 02 CSC	Natural – N	27	2,9	216	28,8
PC 03 CSC	Inundado – I	20	2,2	80	43,9

Analisando-se as figuras 8 e 9 observa-se que a curvas carga x deslocamento referentes ao segundo carregamento diferem significativamente da trajetória descrita nas curvas da primeira prova realizada, retratando a influência do pré-carregamento, estampando um comportamento bastante distinto até da ordem de 15mm, para o solo original, e 20mm para o solo reforçado.

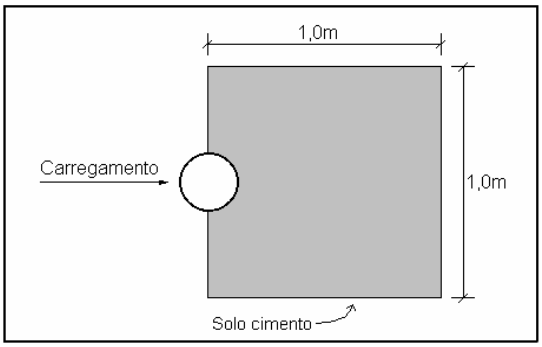


Figura 4 - Bloco de solo-cimento.

Figura 5 – Vista da abertura da vala.

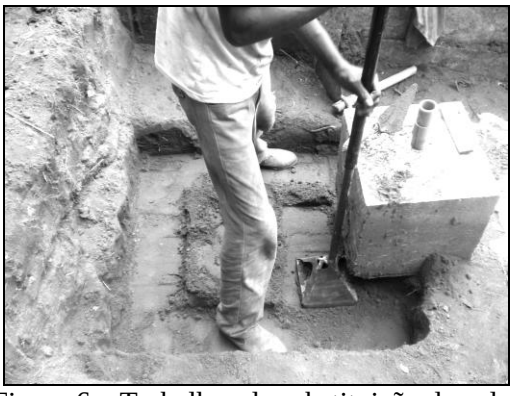


Figura 6 – Trabalhos de substituição do solo.

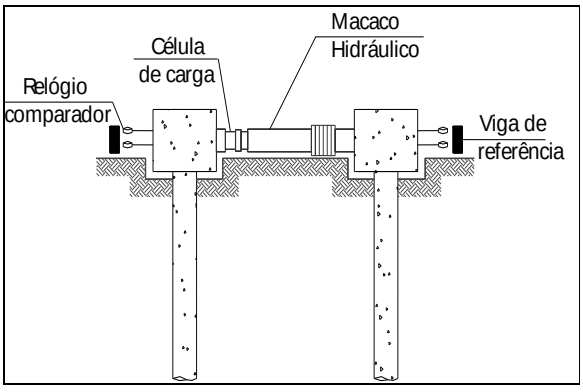


Figura 7 – Esquema de uma prova de carga.

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.

No 3º carregamento, conduzido com pré-inundação do terreno ao redor da estaca, ficou 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.

As figuras 8 a 10, também, destacam a marcante influência do solo-cimento no comportamento da estaca que exige esforços muito maiores, refletindo o significativo crescimento de oposição do solo ao deslocamento da estaca ensaiada.

A partir das curvas carga x deslocamento, foram obtidas as capacidades de carga convencional (Qu), correspondente ao deslocamento de 25mm (D/10). No quadro 3, 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 10 permite uma visão global do efeito da melhoria do solo no comportamento da estaca ensaiada.

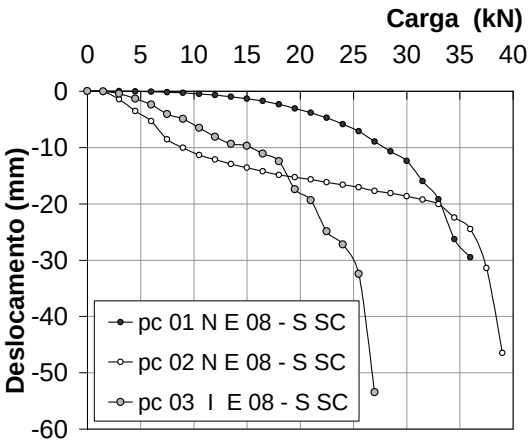


Figura 8: Conjunto das curvas SSC.

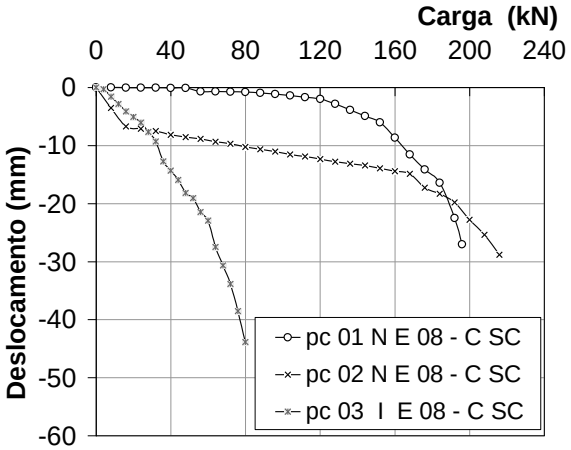


Figura 9: Conjunto das curvas CSC.

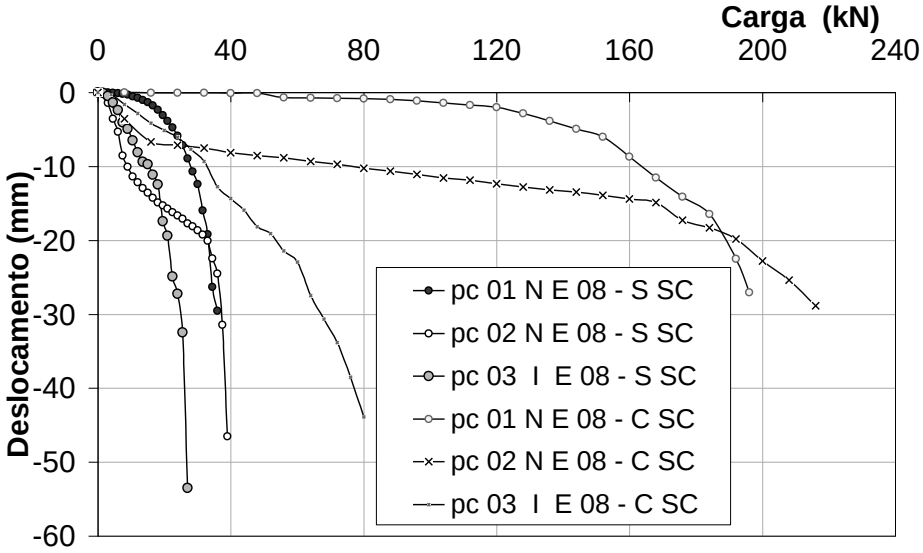


Figura 10: Conjunto de todas as curvas acumuladas, com e sem solo-cimento.

Quadro 3. Valores de capacidades de carga.

Nº do Ensaio	Condição Do solo	Solo original - SSC	Solo reforçado – CSC	Qu_{CSC}/Qu_{SSC}
		Qu_{SSC} (kN)	Qu_{CSC} (kN)	
PC 01	Natural – N	34,7	207	5,97
PC 02	Natural – N	36,5	194	5,32
PC 03	Inundado – I	23,3	62	2,66

No quadro 3, observa-se que na primeira campanha de ensaios houve uma redução próxima de 33% 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 10,0m, verifica-se que o benefício é altamente significativo resultando na primeira prova de carga uma capacidade de carga da ordem de 6 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 2,7 vezes superior aquela sem solo-cimento.

Em conformidade com Matlock & Reese (1961), foram determinados os valores do coeficiente de reação horizontal do solo (nh) como valor médio no intervalo 6mm e 12mm, admitindo-se que o módulo de reação horizontal do solo varia linearmente com a profundidade, como acontece em solos tipicamente arenosos.

No quadro 4, são indicados os valores do coeficiente de reação horizontal. Não foi possível a determinação dos valores de nh para a terceira prova com o terreno original, podendo o número de carregamentos efetuados, aliado às trincas sofridas pelo terreno ter comprometido a sua definição. As figuras 11 e 12 destacam os conjuntos de curvas nh x yo obtidas com o solo original (SSC) e após o reforço (CSC).

Novamente, ficou evidenciado o caráter colapsível do solo ao se comparar os valores de n_h obtidos no 1º e 3º carregamentos, com o solo natural e após pré-inundação, tendo-se observado uma redução superior a 90%.

Quadro 4 - Valores de nh (MN/m³)

Nº do ensaio	nh (MN/m^3)					
	sem solo-cimento - SSC			com solo-cimento - CSC		
	y_0 = 6,0mm	y_0 = 12,0mm	$nh_{MÉD}$	y_0 = 6,0mm	y_0 = 12,0mm	$nh_{MÉD}$
PC 01	11,4	5,2	8,3	450	166	308
PC 02	1,8	3,2	2,5	34	182	108
PC 03	-	-	-	30	16	23

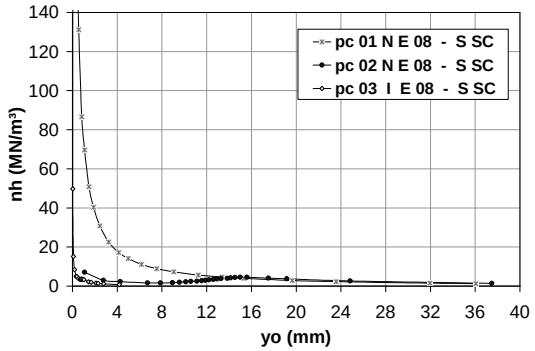


Figura 11: Conjunto de curvas *nh x y_o* - SSC.

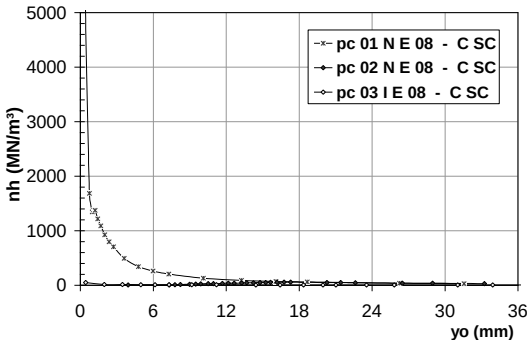


Figura 12: Conjunto de curvas *nh x y_o* - CSC.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A influência da inundação na capacidade de carga da estaca ficou evidenciada, sendo que em relação a ruptura convencional adotada para um deslocamento de 25mm, correspondendo a 10% do diâmetro da estaca (D/10), na primeira campanha de ensaios, houve uma redução próxima de 33%, enquanto na segunda pesquisa, o efeito do colapso provoca redução da ordem de 70%.

Comparando-se a influência do solo-cimento no comportamento da estaca de 10,0m, verifica-se que o benefício é altamente significativo resultando na primeira prova de carga uma capacidade de carga da ordem de 6 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, resultando numa capacidade de carga 2,7 vezes superior ao do solo natural.

O valor do *nh*, resultante da primeira prova de carga, foi de 308 MN/m^3, enquanto na terceira, foi de 23 MN/m^3, refletindo a drástica redução superior a 90%, proveniente do colapso do solo, mesmo reforçado.

Para o terreno melhorado com solo-cimento, observou-se que para o 1º e 3º carregamentos, tal como esperado, o *nh* decresce com o ciclo de carregamento, apresentando, na segunda prova executada, um comportamento anômalo que pode ser decorrente das "frestas" provocadas no terreno e entre a estaca e o bloco de solo-cimento, provenientes do carregamento anterior.

O reforço do terreno com solo-cimento também provocou significativa e acentuada elevação nos valores de nh obtidos, quando em comparação com o terreno sem solo-cimento.

Mesmo considerando a colapsibilidade do solo, o efeito do reforço foi decisivo no acréscimo da carga de colapso tendo sido quase 170% 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.

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.

REFERÊNCIAS

Ferreira, C.V. (1998). *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, 160p.

Ferreira, C.V.; Lobo, A.S.; Carvalho, D. & Albuquerque, P.J.R. (2003). Influência da Inundação no Comportamento de Estacas Apiloadas, Carregadas Lateralmente. *SBPN Scientific Journal*, São Paulo/SP., v.7 – edição especial - p.216-218. ISSN 1415-6512.

Firmino, M.A.D. (1998). *Uso de solo-cimento em fundações.* Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Monografia de conclusão de curso, Bauru, 88p.

Matlock H. & Reese, L. C. (1961) *Generalized solutions for laterally loaded piles*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 86, nº SM5, 1091, p. 63-91.