

# Análise de Recalques de Edifícios em Solos Melhorados com Estacas de Compactação

Wanessa Cartaxo Soares

Mestranda, Departamento de Geotenia, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil

José Carlos A. Cintra

Professor Titular, Departamento de Geotenia, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil

Valdês Borges Soares; Wilson Cartaxo Soares

Copesolo – Estacas e Fudações Ltda., João Pessoa, Brasil

**RESUMO:** As estacas de compactação são freqüentemente utilizadas como método de melhoria de solos arenosos em cidades do litoral nordestino, principalmente João Pessoa e Recife. O processo promove efeitos como o aumento de capacidade de carga e redução de recalques, possibilitando a utilização de sapatas em casos de edifícios em regiões que não permitiriam este tipo de fundação. Neste trabalho é analisada a eficácia do processo de melhoria do solo na redução dos recalques, por meio do monitoramento de cinco edifícios sobre solo melhorado com estacas de compactação na cidade de João Pessoa. Por isso, são comparados os resultados obtidos por meio do monitoramento com recalques estimados para a situação hipotética dos edifícios em solo natural, sem compactação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas de Compactação, Recalques, Método Aoki - Lopes.

## 1 INTRODUÇÃO

As estacas de compactação constituem um processo de melhoria de solos no qual uma mistura de materiais como areia, cimento e/ou brita é introduzida em terrenos arenosos por meio de aplicação de grandes energias de compactação. Esta prática é muito comum em algumas cidades do litoral nordestino, principalmente João Pessoa e Recife, onde a execução da estaca é pelo método de vibro-deslocamento.

O processo de compactação promove a densificação do solo adjacente, assim como um aumento de resistência e diminuição de compressibilidade. Tais efeitos contribuem para uma majoração de capacidade de carga e redução de recalques, possibilitando a utilização de fundações por sapatas em alguns casos de edifícios em regiões que não permitiriam este tipo de fundação.

Em João Pessoa, apesar da grande utilização em diversas obras, são poucos os trabalhos a abordar o comportamento de solos melhorados com tais estacas. Assim, os projetos são

baseados principalmente na experiência profissional dos engenheiros atuantes na área.

Além de sondagens SPT executadas antes e após a compactação, poucos ensaios in-situ ou monitoramento com medições de recalque dos pilares têm sido realizados. Conseqüentemente, tornam-se raros os dados disponíveis que permitam a avaliação do desempenho das obras, assim como um melhor entendimento dos efeitos da melhoria.

Em pesquisa anterior, realizada por Soares (2002), comprovou-se a majoração da capacidade de carga dos solos compactados por meio de prova de carga em placa. Neste trabalho, são analisados os recalques de cinco edifícios sobre solo melhorado com estacas de compactação na cidade de João Pessoa – PB. É analisada a eficácia desse processo de melhoria do solo na redução do recalque dos edifícios.

A cota de apoio das estacas variou de 3 a 5 metros de profundidade, e a distância de eixo-a-eixo das mesmas ficou entre 80 e 110 cm, com disposições que extrapolaram a região sob as sapatas até quase toda a área de projeção do prédio.

## 2 EDIFÍCIOS MONITORADOS

De fevereiro de 2001 a fevereiro de 2004, monitoraram-se três edifícios, com medições que começaram alguns meses após o início da construção dos mesmos. Foram feitas leituras até o fim das construções dos três, e um pouco além em dois deles.

De setembro de 2004 a junho de 2005, outros dois edifícios foram monitorados, desde o início de suas construções. As leituras foram feitas em três pilares de cada prédio, e os nomes e pavimentos dos edifícios são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Edifícios monitorados e quantidade de pavimentos.

Edifício	Número de pavimentos
Maison des Princes	30
Vale Verzasca	26
Maison Elizabeth	21
Boulevard Manaíra	18
Edifício Stéphane	17

As Tabelas 2 a 4 mostram o período de monitoramento de cada edifício.

Tabela 2. Início e fim do monitoramento dos edifícios.

Edifício	Início do monitoramento	Fim do monitoramento
M. Princes	Fevereiro/01	Fevereiro/04
V. Verzasca	Fevereiro/01	Fevereiro/04
M. Elizabeth	Fevereiro/01	Fevereiro/04
B. Manaíra	Outubro/04	Junho/05
Stéphano	Setembro/04	Junho/05

Tabela 3. Duração das construções e início de medidas.

Edifício	Duração da construção	Início do monitoramento
M. Princes	44 meses	10º. Mês de construção
V. Verzasca	37 meses	9º. Mês de construção
M. Elizabeth	41 meses	5º. Mês de construção
B. Manaíra	-	1º. Mês de construção
Stéphano	-	1º. Mês de construção

Tabela 4. Monitoramento durante e após as construções.

Edifício	Meses monitorados durante a construção	Meses monitorados após a construção
M. Princes	34	2
V. Verzasca	28	8
M. Elizabeth	36	-
B. Manaíra	8	-
Stéphano	9	-

Nos locais onde os edifícios foram construídos, observou-se a predominância de solo arenoso ao longo da profundidade. As Figuras 1 e 2 mostram os valores de  $N_{SPT}$  obtidos em sondagens realizadas antes e após a compactação dos terrenos.

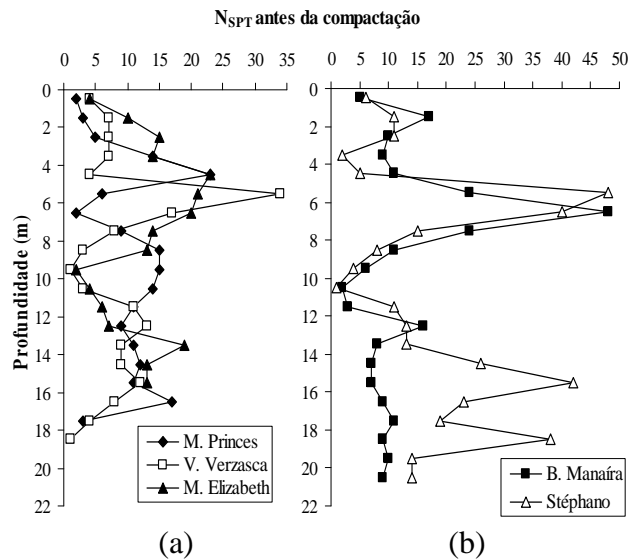


Figura 1.  $N_{SPT}$ s das sondagens realizadas antes da compactação.

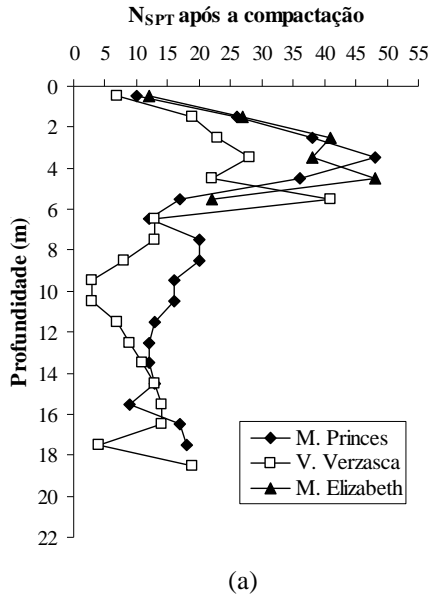
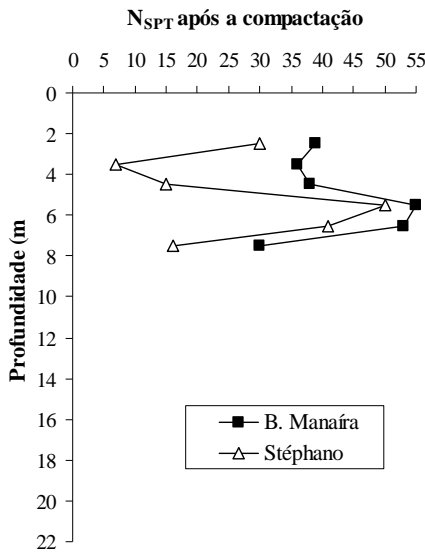


Figura 2a.  $N_{SPT}$ s das sondagens realizadas após a compactação dos terrenos do Maison des Princes, Vale Verzasca e Maison Elizabeth.

## 3 RESULTADOS E ANÁLISES

As Figuras 3 a 7 exibem as curvas tempo x

recalque das sapatas cujos pilares foram monitorados.



(b)

Figura 2b. N<sub>SPT</sub>s das sondagens realizadas após a compactação dos terrenos do Boulevard Manaíra e Stéphano.

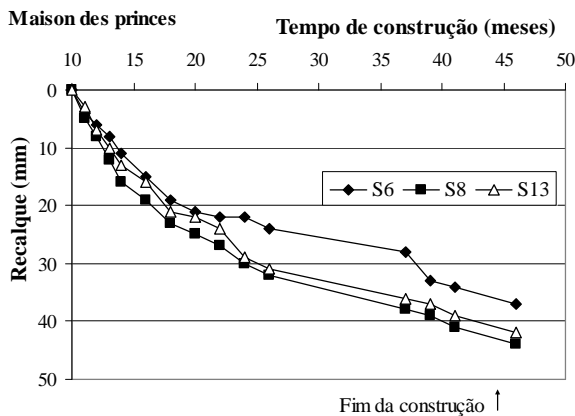


Figura 3. Maison des Princes: curvas tempo x recalque de três sapatas (S8 e S13: sapatas centrais, S6: sapata de extremidade).

Os recalques das sapatas centrais foram maiores que os das de extremidade em todos os cinco casos.

Não foi observado nenhum tipo de dano relacionado a essa ordem de grandeza de recalque nos edifícios mencionados, mesmo decorridos mais de dois anos da última leitura e do fim das construções.

Para uma análise da evolução dos recalques monitorados de acordo com a aplicação de carga, foi adotada a distribuição de cargas

admitida por Gusmão et al.(2000).

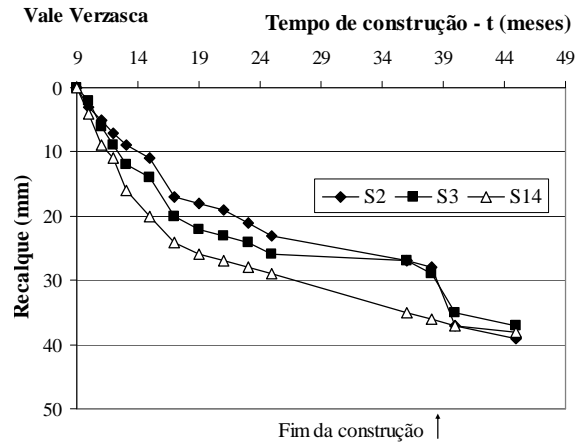


Figura 4. Vale Verzasca: curvas tempo x recalque de três sapatas (S2, S3 e S14: sapatas de extremidade).

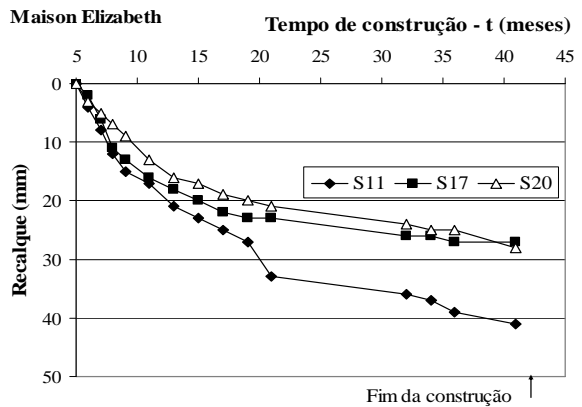


Figura 5. Maison Elizabeth: curvas tempo x recalque de três sapatas (S11: sapata central, S17 e S20: sapatas de extremidade).

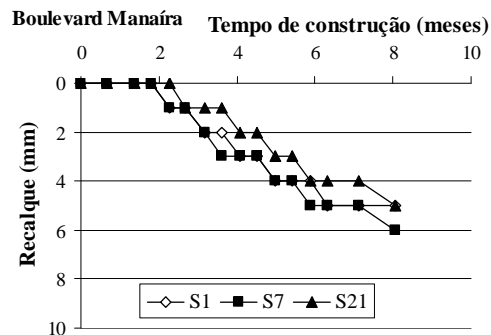


Figura 6. Boulevard Manaíra: curvas tempo x recalque de três sapatas (S7: sapata central, S1 e S21: sapatas de extremidade).

A Figura 8 mostra o gráfico tempo de moitoramento x carregamento das sapatas dos edifícios.

As curvas de tempo de monitoramento x velocidade média dos recalques são exibidas

nas Figuras 9 e 10.

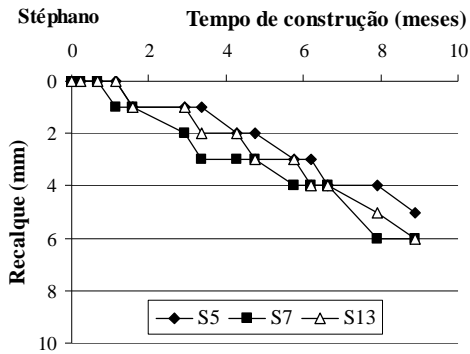


Figura 7. Stéphan: curvas tempo x recalque de três sapatas (S7: sapata central, S5 e S13: sapatas de extremidade).

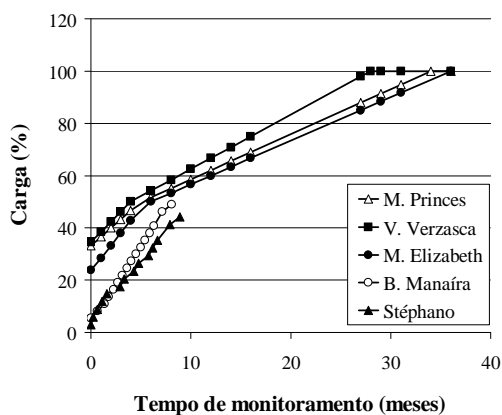


Figura 8. Tempo de monitoramento x carregamento dos edifícios.

As velocidades não chegaram a ultrapassar a taxa de 200  $\mu\text{m}/\text{dia}$ , valor mencionado por Alonso (1991) como aceitável para construções sobre fundações diretas por sapatas.

As sapatas do Boulevard Manaíra atingiram taxas de 71  $\mu\text{m}/\text{dia}$ , assim como a velocidade das sapatas do Stéphan chegou a 77  $\mu\text{m}/\text{dia}$ .

Como os recalques das construções do Maison des Princes, Vale Verzasca e Maison Elizabeth não foram medidos desde o início, foi necessário inferir um valor do recalque ocorrido até o início do monitoramento. Para isso, foi utilizada a expressão de Massad (1982), desenvolvida do método gráfico de Asaoka (1978):

$$\rho = \rho_f \{1 - e^{-(at + b)}\} \quad (1)$$

em que  $\rho$  = recalque,  $t$  = tempo,  $\rho_f$  = recalque estabilizado, e  $a$  e  $b$  são constantes que definem

a forma da curva.

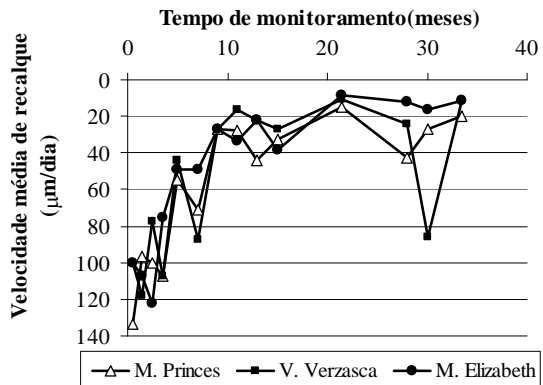


Figura 9. Gráfico tempo de monitoramento x velocidade média de recalque das sapatas do Maison des Princes, Vale Verzasca e Maison Elizabeth.

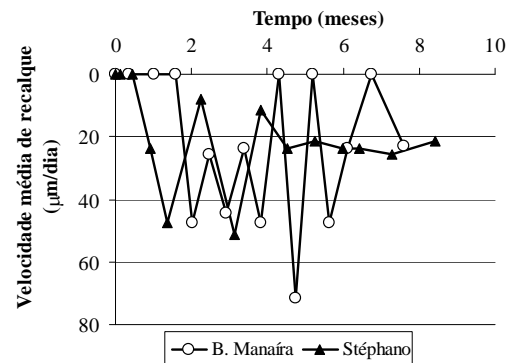


Figura 10. Gráfico tempo de monitoramento x velocidade média de recalque das sapatas do Boulevard Manaíra e Stéphan.

Ajustando-se essa expressão aos pontos medidos na monitoração, obteve-se uma dupla extrapolação para cada curva. A extrapolação no sentido decrescente do tempo, até  $t = 0$ , caracteriza a parcela de recalque não monitorado.

A extrapolação no sentido crescente do tempo permite avaliar o provável recalque estabilizado. Esse tipo de ajuste que conduz à estabilização dos recalques foi o que forneceu os melhores coeficientes de correlação múltipla ( $R^2$ ) em comparação a outros tipos de polinomiais, quadráticos etc.

As Figuras 11 a 13 apresentam as curvas ajustadas. As equações obtidas para cada extrapolação são mostradas na Tabela 5, assim como o  $R^2$  de cada regressão. As parcelas de recalque obtidas com as extrapolações são mostradas na Tabela 6.

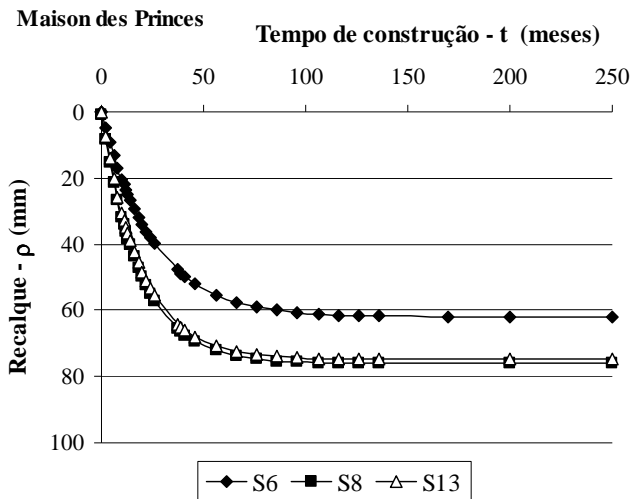


Figura 11. Maison des Princes: curvas ajustadas.

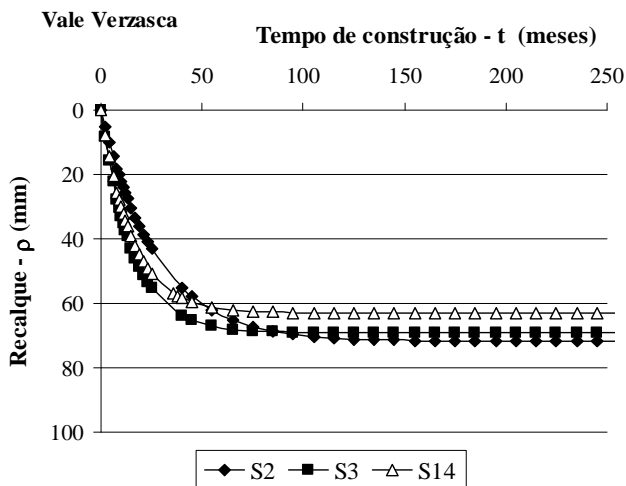


Figura 12. Vale Verzasca: curvas ajustadas.

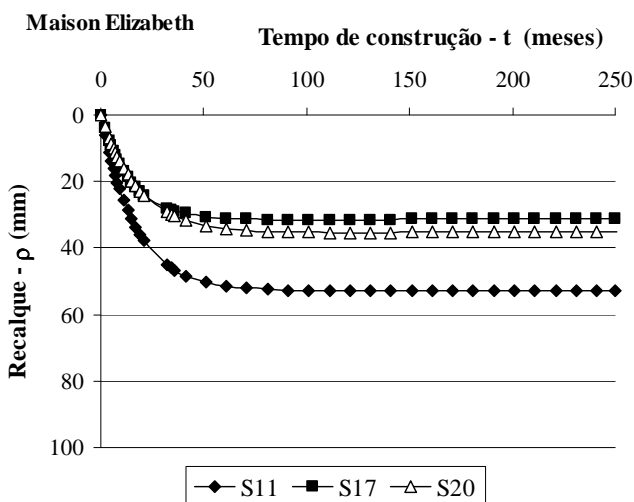


Figura 13. Maison Elizabeth: curvas ajustadas.

Tabela 5. Equações obtidas com as regressões e  $R^2$ .

Edifício	Sapata	Equação	$R^2$
M. Princes	S6	$\rho = 62,02 (1 - e^{-0,04t})$	0,96
	S8	$\rho = 75,17 (1 - e^{-0,05t})$	0,98
	S13	$\rho = 74,85 (1 - e^{-0,05t})$	0,98
V. Verzasca	S2	$\rho = 71,48 (1 - e^{-0,04t})$	0,99
	S3	$\rho = 69,12 (1 - e^{-0,06t})$	0,99
	S14	$\rho = 63,01 (1 - e^{-0,06t})$	0,95
M. Elizabeth	S11	$\rho = 52,81 (1 - e^{-0,06t})$	0,96
	S17	$\rho = 31,4 (1 - e^{-0,07t})$	0,9
	S20	$\rho = 35,4 (1 - e^{-0,05t})$	0,96

Tabela 6. Recalques obtidos com o ajuste.

Edifício/ sapata	Recalque (mm)		
	t=0 até início do monito- ramento	Final da construção	Estabilizado
M. Princes			
S6	16	52	62
S8	25	68	75
S13	27	68	75
V. Verzasca			
S2	19	46	72
S3	29	57	69
S14	22	57	63
M. Elizabeth			
S11	10	51	53
S17	2	29	31
S20	4	32	35

A partir dos recalques medidos nos casos em que ainda houve monitoramento após o término da obra, calcularam-se os acréscimos de recalque, em termos percentuais, em relação ao considerado como ocorrido até o fim das construções. Estes são comparados aos valores de acréscimo em relação ao recalque imediato indicados por Schmertmann (1970) por meio do fator tempo  $C_2$ , na Figura 14.

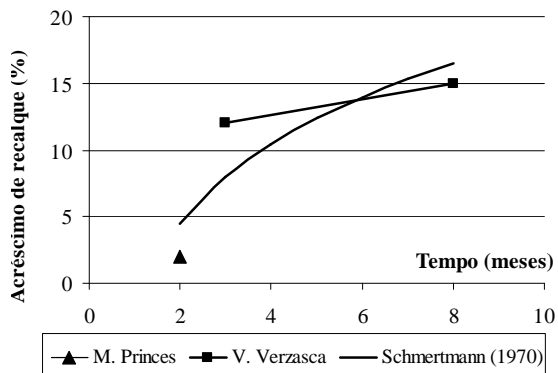


Figura 14. Acréscimos de recalque.

Estimaram-se os recalques dos edifícios pelo método Aoki – Lopes (1975), que permite a consideração da influência de todas as sapatas da fundação, nas estimativas de recalque de cada uma delas.

Comparando-se os valores obtidos da extrapolação com os recalques estimados, foi feita a retroanálise para ajustar a correlação do módulo de deformabilidade com o índice de resistência à penetração das sondagens SPT ( $N_{SPT}$ ).

Utilizando-se essa correlação ajustada mais os valores de  $N_{SPT}$  das sondagens realizadas no solo não-compactado, foi possível estimar os recalques dos mesmos edifícios na situação hipotética de ausência de melhoria do solo.

Esses valores foram comparados aos obtidos com o monitoramento e extrapolações, com o intuito de se analisar a redução de recalques entre as situações de solo natural e solo compactado.

Os recalques dos edifícios Maison des Princes e Vale Verzasca sofreram reduções em torno de 60 e 50%, respectivamente. O Maison Elizabeth sofreu a menor redução média de recalques, cerca de 30%. O seu terreno natural era mais compacto que o dos outros, o que torna o processo de compactação menos eficaz (Soares, 2002).

#### 4 CONCLUSÃO

Foram analisados os recalques de cinco edifícios sobre solo melhorado com estacas de compactação, monitorados na cidade de João Pessoa - PB.

Apesar de alguns valores medidos se mostrarem bastante expressivos, não foi observado nenhum tipo de dano relacionado a recalques mesmo decorridos mais de dois anos da última leitura e do fim das construções.

Avaliaram-se as velocidades de recalques de acordo com o carregamento, assim como foram feitas extrapolações das curvas tempo x recalque medidas.

Comparando-se os recalques estimados para a situação hipotética de três edifícios em solo natural com os recalques obtidos por meio da

extrapolação dos medidos dos mesmos edifícios, avaliou-se a redução de recalque entre os dois casos.

Observaram-se reduções médias em torno de 60% e 50% para os edifícios Maison des Princes (com 30 pavimentos) e Vale Verzasca (com 26 pavimentos), respectivamente. O solo natural (anterior a compactação) apresentava-se pouco compacto, com valores de  $N_{SPT}$  menores que 10, o que favoreceu uma maior eficácia ao processo de melhoria.

A menor redução obtida foi de 33%, referente ao Maison Elizabeth, que tem 21 pavimentos. Neste caso, o solo natural se mostrou mais compacto em relação aos outros.

#### AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa concedida para o desenvolvimento dessa pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Alonso, U. R. (1995). *Previsão e controle das fundações*, 1ª. Reimpressão, Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 142 p.
- Aoki, N. e Lopes, F.R. (1975). Estimating stress and settlements due to deep foundation, *V Conf. Panam. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Vol 1, p. 377-386.
- Asaoka, A. (1978). Observational Procedure of Settlement Prediction, *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 18 (4), Dec. 1978. p.87-101.
- Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, A. J.; Maia, G. B. (2000). Medições de recalque de um prédio em Recife, *Simpósio Interação Estrutura-Solo Em Edifícios*, São Carlos. CD ROM.
- Massad, F. (1982). Método Gráfico Para o Acompanhamento da Evolução dos Recalques com o Tempo, *VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Olinda/Recife, Anais x, p.321-331.
- Schmertmann, J. H. (1970). Static cone to compute static settlement over sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v.96, n.SM.3, pg. 1011-1043.
- Soares, W.C. (2002). *Estacas de compactação para melhoria de solo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 133p.