

Avaliação de Método de Melhoramento de Solo (Em Profundidade) para Redução de Custos de Fundações

Abner Pedro Queiroz de Souza
UFPE, Recife, Brasil, apqengenharia@hotmail.com

Leandro Inácio da Silva
UFPE, Recife, Brasil, leandro.isilva@yahoo.com.br

Washington Moura de Amorim Junior
UFPE, Recife, Brasil, wmajr48@yahoo.com.br

Monalyssa Caroline Lira da Silva Ramos
UFPE, Recife, Brasil, mona.ramoss@hotmail.com

RESUMO: O presente trabalho utilizou como objeto de estudo uma obra localizada no bairro de Boa viagem, Recife/PE, a fim de avaliar a eficácia e eficiência do processo de melhoramento do solo com estacas de compactação na redução de recalques. Durante a avaliação foram consideradas as influências da interação solo-estrutura para o estudo comportamental da mesma. O trabalho também apresenta uma abordagem econômica, dispondo de uma análise comparativa dos custos envolvidos na execução de duas possíveis soluções de fundação, uma solução profunda e outra superficial. Foram realizados ensaios laboratoriais, sondagens do tipo SPT antes e após a compactação, além de medições de recalques dos pilares da lâmina do prédio, permitindo assim uma maior averiguação dos efeitos do melhoramento e do desempenho da obra. As leituras de recalques também possibilitaram a verificação da aplicabilidade e acurácia de três métodos semi-empíricos utilizados na estimativa de recalques, a saber, Schmertmann (1978), Burland e Burbidge (1985) e o de Schultze e Sherif (1973). Após a análise dos resultados, foi observado que o ganho de resistência representado pelo N_{SPT} foi da ordem de cinco vezes o valor inicial, evitando assim recalques excessivos e propiciando a utilização de sapatas como solução de fundação. Os métodos de Schultze e Sherif (1973) e Schmertmann (1978) foram os que apresentaram valores mais concordantes quando confrontado com os recalques medidos. Tanto os valores das distorções, como as velocidades de recalques, calculadas para os pilares monitorados, mostraram-se compatíveis e dentro do padrão de normalidade mencionado por Alonso (1995). Conclui-se que a implantação da solução de melhoramento da camada superficial através de estacas de compactação aliada ao uso de fundações superficiais demonstrou sua viabilidade não só do ponto de vista técnico como também econômico, sendo capaz de reduzir em mais de 60% os custos da fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas de compactação, Capacidade de carga, Recalques.

1 INTRODUÇÃO

O ambiente desfavorável por vezes ofertado para construção do ponto de vista geotécnico, propiciou o desenvolvimento e a descoberta de várias técnicas de melhoramento para execução

de fundações em diversos tipos de solos. Em areia fofas, destaca-se a técnica de melhoramento de solo com estacas de compactação de areia e brita, bastante utilizada em várias cidades nordestinas, tais como Natal, João Pessoa, Aracaju e em Recife desde a

década de 70, o método foi introduzido na região através do engenheiro Dirceu Pereira, fundador da COPEF Fundações Ltda. que começou a projetar e executar as estacas de compactação com base em relações empíricas e na própria experiência acumulada, não havendo naquela época normalização de procedimentos.

O presente trabalho analisa uma obra em que foi aplicado a técnica supracitada. Apresentando diversas análises do ponto de vista técnico tais como, a eficiência do método no ganho de resistência do solo, a influência da interação solo-estrutura, os métodos de estimativas de recalques, bem como o comportamento estrutural do edifício por meio do controle de recalques.

2 SOBRE A OBRA ESTUDADA

2.1 Descrição da Obra

A obra trata-se de um edifício de 30 pavimentos que possui 18 pilares em sua lâmina principal que vão até as fundações, com cargas variando entre 350tf e 1200tf. Está localizada no bairro de Boa Viagem, Recife, região litorânea do estado de Pernambuco.

As sondagens iniciais realizadas do tipo SPT pela empresa Ensolo - Engenharia e Consultoria de solos e fundações Ltda., revelaram um perfil de subsolo composto por horizontes bem definidos. Os boletins de sondagem mostraram que ao longo dos 20 m iniciais, o solo é composto de camadas de areia finas à médias, heterogêneas, que apresentam diferentes níveis de compactação relativa (variando de fofa a compacta) e de cor cinza. Subjacente a essas camadas granulares, encontra-se um pacote de argila orgânica siltosa de alta plasticidade até a profundidade de -42,0 m.

A solução de fundação adotada portanto, consistiu em sapatas isoladas e conjugadas apoiadas em terreno melhorado, assentadas na cota -2,30 m. A pressão admissível no solo considerada para o projeto foi de 50,0 tf/m² (500,0 kN/m²).

2.2 Distribuição das Estacas de

Compactação

O melhoramento do solo se deu por compactação, através de colunas de areia e brita, com injeção de "base", entre as cotas -1,30 e -10,00 m. O trecho inicial entre as cotas 0,00 a -1,30 foi preenchido apenas com areia sem compactação.

O diâmetro das colunas de compactação foi de $\varnothing = 300$ mm, dispostas em forma quadrada, com espaçamento de 0,90m, sendo considerado para a mistura o traço de 3:1 (areia ou pó de pedra : brita 50) em volume. O comprimento das colunas de compactação foram de 8,70 m e o volume mínimo por coluna foi de 739,50 litros.

Os equipamentos utilizados foram: Torre vertical para içamento; Tubo de compactação com $\varnothing = 300$ mm de diâmetro e comprimento de 10,0 m; Pilão de compactação (1.800 kg) e diâmetro de 180 mm.

2.3 Sondagem de Verificação

Após a execução do processo de melhoramento de solo, foram realizadas sondagens de verificação. A profundidade das Sondagens foi correspondente a espessura da camada do solo a ser melhorada, isto é, até aproximadamente a cota -10 m.

2.4 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais de granulometria, Limites de consistência, teor de matéria orgânica e adensamento vertical, foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco.

2.5 Monitoramento dos Recalques

Além de ensaios laboratoriais e sondagens do tipo SPT executadas antes e após a compactação, foram feitas medições de recalques dos pilares da lâmina do prédio, permitindo assim uma maior averiguação dos efeitos do melhoramento e do desempenho da obra.

Foram instalados pinos de leituras nos 18 pilares que compõem a lâmina do edifício. As leituras foram realizadas a cada mês, com

exceção da L6 e L11, com intervalos de cerca de três e dois meses respectivamente. Para o trabalho foram consideradas as leituras do dia 07 de maio de 2013 até o dia 21 de outubro de 2014.

A seguir, alguns gráficos das leituras do equipamento de medição de recalques realizados durante os 552 dias de monitoramento:

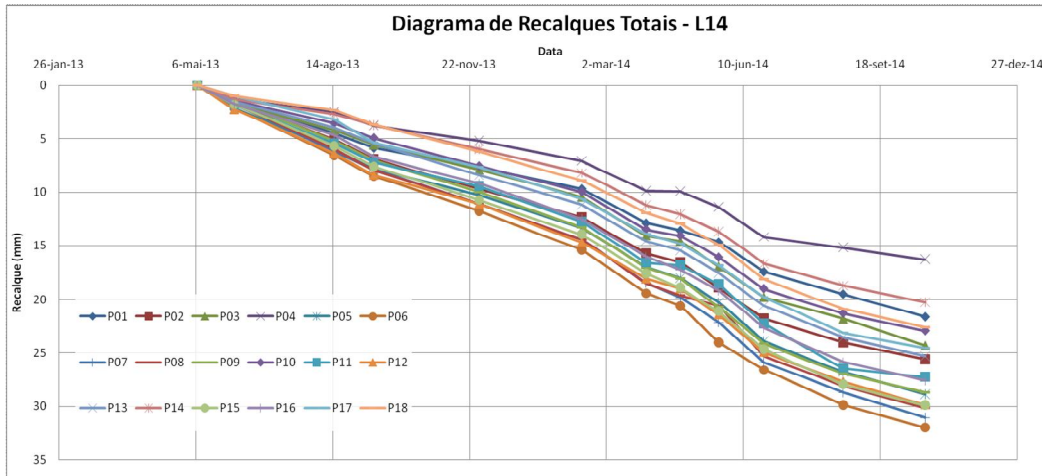


Figura 1. Gráfico dos recalques ao longo do tempo

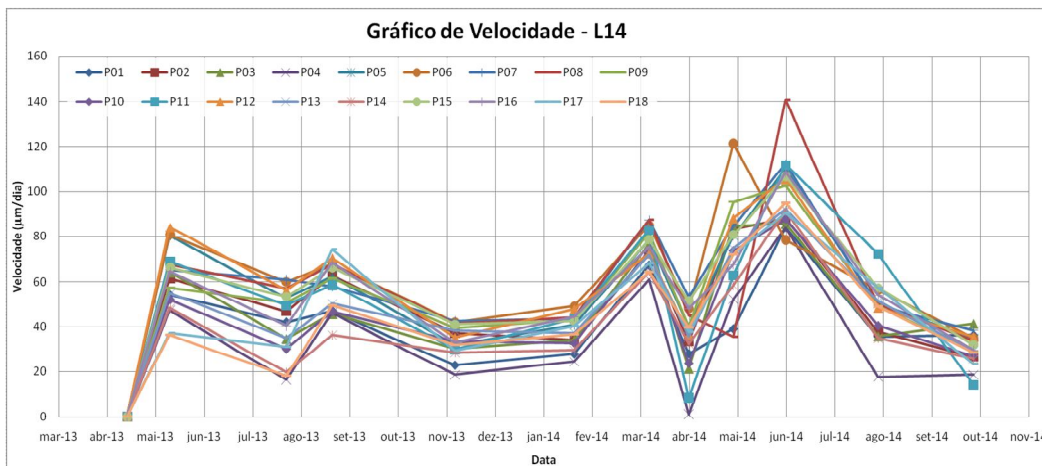


Figura 2.- Gráfico das velocidades dos recalques ($\mu\text{m}/\text{dia}$)

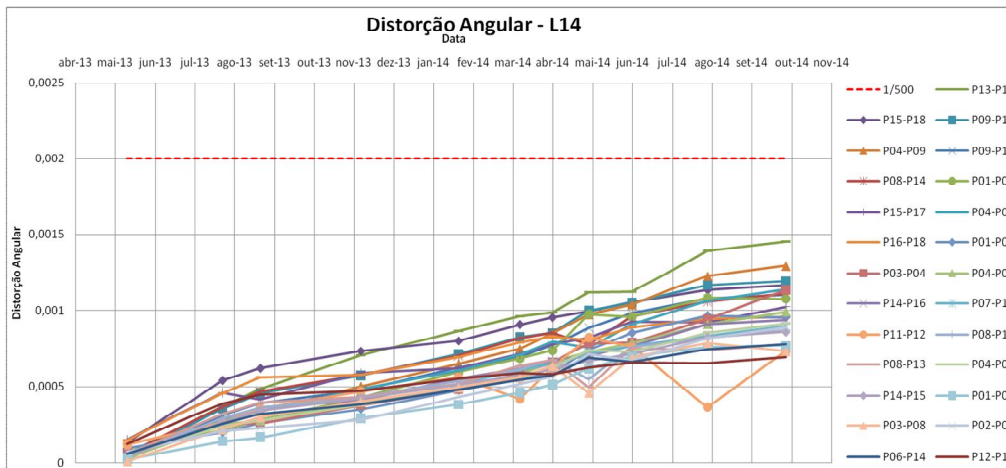


Figura 3. Gráfico das distorções

2.5 Interação Solo-estrutura

Para efeito de discretização da superestrutura foi admitido o modelo tridimensional completo com as vigas e colunas consideradas como elementos de barra e as lajes como diafragmas. As cintas foram consideradas no modelo. O conjunto elementos de fundação e solo foi discretizado como meio contínuo com modelo tensão deformação elástico linear.

A análise de interação solo estrutura foi realizada com o uso do SISTEMA COMPUTACIONAL EDIFÍCIO. Foi admitido

como carregamento apenas as cargas verticais (permanentes) nos pontos nodais da estrutura em cada andar aplicado através de modelo incremental andar por andar. A redistribuição que é apresentada na resposta das análise é devida exclusivamente ao efeito da interação solo-estrutura.

O SISTEMA EDIFÍCIO forneceu além das respostas dos esforços e deslocamentos relativos à superestrutura, os recalques de apoio e as distorções angulares com a consideração da interação solo-estrutura.

Tabela 1. Recalques na base da edificação

PILAR	NO	RECALQUE (mm) MODELO 1	RECALQUE (mm) MODELO 2	RECALQUE (mm) MODELO 3
P1	84	25,6	29,3	28,3
P2	81	36,4	36,6	36,5
P3	82	35,2	35,5	35,6
P4	88	24,9	28,9	27,7
P5	54	26,6	29,9	29,9
P6	58	45,9	35,3	36,7
P7	51	45,9	35,3	36,6
P8	52	45,9	35,3	36,5
P9	64	45,9	35,4	36,8
P10	68	26,6	30,0	29,9
P11	27	20,2	23,5	22,8
P12	28	21,4	24,8	24,3
P13	32	25,5	26,8	26,6
P14	33	20,2	24,3	23,5
P15	12	26,6	26,7	26,9
P16	13	25,2	26,6	26,8
P17	03	20,4	21,8	21,4
P18	04	20,4	21,8	21,4
MÉDIA		30,0	29,3	29,4

Modelo 1 - recalques estimados antes dos ensaios e sem a interação solo-estrutura

Modelo 2 - recalques com a interação solo-estrutura - estrutura totalmente construída

Modelo 3 - recalques com interação solo-estrutura - sequência construtiva andar por andar

Tabela 2. mostra os valores das distorções angulares obtidas através dos modelos 1, 2 e 3.

PILARES	NÓS	DIST. MOD 01	DIST. MOD 2	DIST. MOD 3	P7-P13	51-32	1/433	1/1034	1/862
P1-P6	84-58	1/479	1/629	1/1160	P7-P14	51-33	1/466	1/1083	1/900
P5-P6	54-58	1/274	1/970	1/774	P7-P15	58-12	1/344	1/773	1/664
P5-P7	54-51	1/432	1/1528	1/1199	P7-P16	51-13	1/360	1/851	1/732
P6-P11	58-27	1/276	1/602	1/508	P7-P17	51-03	1/467	1/878	1/772
P6-12	58-28	1/222	1/516	1/439	P7-P18	51-04	1/485	1/911	1/802
P6-P15	58-12	1/410	1/921	1/801	P8	52-68	1/432	1/1582	1/1236
P7-P16	58-13	1/469	1/1111	1/971	P8-11	52-27	1/466	1/1022	1/858
P7-P11	51-27	1/349	1/762	1/638	P8-12	52-28	1/360	1/843	1/712
P7-P12	51-28	1/254	1/590	1/497	P8-P13	52-32	1/305	1/733	1/614
					P8-P14	52-33	1/349	1/815	1/680
					P8-P15	52-12	1/386	1/873	1/753
					P8-P16	52-12	1/321	1/764	1/663
					P8-P17	52-03	1/485	1/916	1/808

P8-P18	52-04	1/467	1/881	1/777
P9-P10	64-68	1/274	1/978	1/779
P9-P12	64-28	1/481	1/1112	1/948
P9-P13	64-32	1/266	1/631	1/535
P9-P14	64-33	1/276	1/636	1/535
P9-P16	63-13	1/382	1/897	1/787

Modelo 1 - Distorções sem a interação solo-estrutura

Modelo 2 - Distorções com a interação solo-estrutura - estrutura totalmente construída

Modelo 3 -Distorções com interação solo-estrutura - seqüência construtiva andar por andar

2.6 Estimativa de Recalque

Com o objetivo de avaliar as metodologias capazes de proporcionar as previsões mais concordantes, foram calculados os recalques através de quatro métodos consagrados: Schmertmann (1978), Burland e Burbidge (1985), Schultze e Sherif (1973) para previsão dos recalques da camada de areia e para a camada de argila foi aplicada a Teoria do Adensamento de Terzaghi.

Fazendo o uso dos métodos citados acima, foi possível fazer três composições diferentes para a análise da previsão de recalques da fundação, a saber:

- Schmertmann para camada arenosa e Teoria do Adensamento para a camada de argila
- Burland e Burbidge para camada arenosa e Teoria do Adensamento para a camada de argila

Schultze e Sherif para camada de areia e Teoria do Adensamento para a camada de argila.

Em cada camada de solo, foram utilizados parâmetros de deformabilidade obtidos em função dos ensaios realizados. O método de Schmertmann (1978) por exemplo, se baseia na teoria da elasticidade e utiliza uma correlação com o ensaio de cone (CPT), que pode ser estimado a partir dos dados da resistência à penetração medida em sondagens à percussão (ensaio SPT). Esse método subdivide o solo de fundação em semi-espacos elásticos, homogêneos e isotrópicos, e de módulo de deformabilidade constante.

3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

3.1. Resumo e Comparação do Método de Melhoramento

O controle geotécnico após a execução das estacas de compactação, foi realizado baseando-se nos dados obtidos das sondagens à percussão e das leituras de recalques dos pilares.

A Figura que se segue mostra o aumento do N_{SPT} após o melhoramento, através de um gráfico comparativo entre N_{SPT} antes e após a execução das estacas de areia e brita.

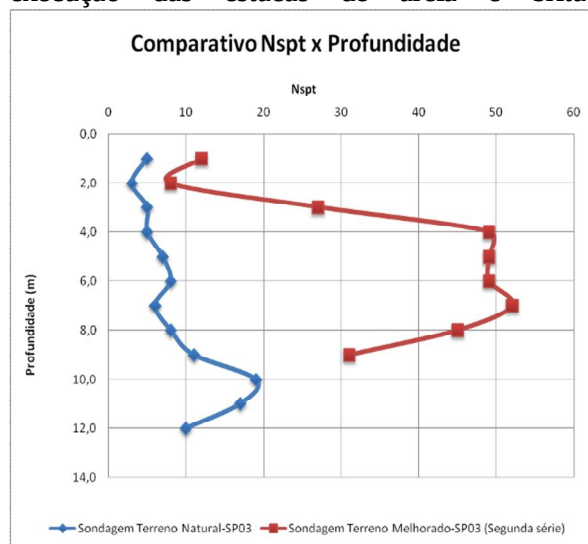


Figura 4. Gráfico Comparativo do NSPT após p melhoramento e o NSPT antes do melhoramento

3.2. Análises dos Recalques Medidos

De modo a facilitar a visualização dos recalques, para cada medição, foram elaboradas com o auxílio do Software Surfer 12, representações gráficas desses recalques (Figuras 5, 6 e 7), indicando as curvas de iso-recalques (curvas de igual valores de recalques ou bacia de recalques) para cada uma das leituras.

As medidas de recalques em milímetros foram tomadas sempre em relação à primeira leitura, efetuada em 07/05/2013.

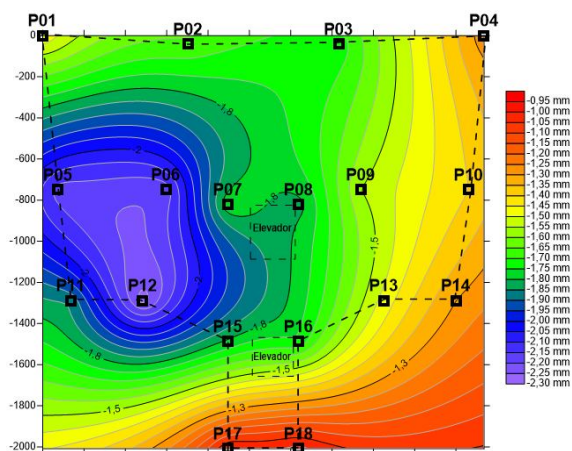


Figura 5. Bacia de recalques em 03/06/2013 (27 dias) - Leitura L2

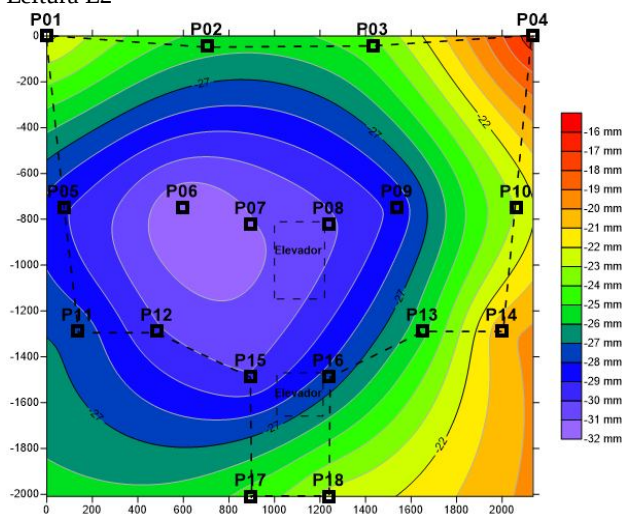


Figura 6. Bacia de recalques em 21/10/2014 (552 dias) - Leitura L14

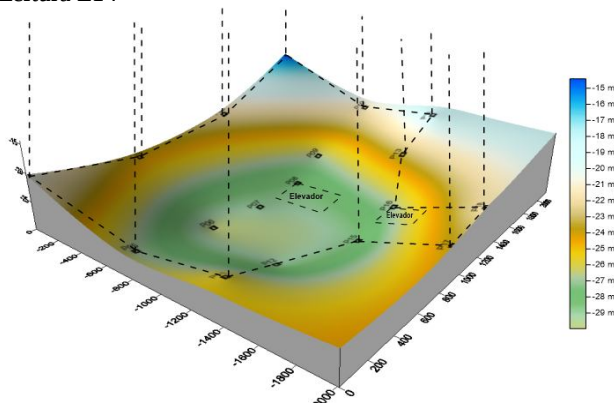


Figura 7. Superfície de isorecalques em 21/10/2014 (552 dias) - Leitura L14

Analisando-se as bacias de recalques, pode-se observar que ocorre uma maior evolução da depressão nos pilares próximo à caixa do elevador, região onde há maior concentração de cargas.

As velocidades de recalques, calculadas para os pilares monitorados, mostraram-se está compatíveis e dentro do padrão de normalidade de acordo com Alonso (1995), pois não excederam $150\mu\text{m}/\text{dia}$, além do que, segundo o autor, para prédios em construção e apoiados em fundação rasa, podem ser considerados normais os valores de velocidades de até $200\mu\text{m}/\text{dia}$.

Quanto as distorções angulares, razão entre o recalque diferencial de dois pilares e a distância entre seus centros, observou-se que apresentaram valores pequenos quando comparados com a escala de distorções angulares limites proposta por Skempton e Macdonald (1956), como se pode ver abaixo.

Tabela 3. Comparação dos limites de distorção angular

Situação	Limite de dist. Angular	Distorção angular da estrutura
Trincas em paredes	0,003	0,0015
Inclinação visível	0,004	0,0015
Danos estruturais	0,006	0,0015

3.2. Avaliação dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura

Enquanto as cargas sobre alguns pilares como P6, P7, P8 e P9 apresentaram um decréscimo quando considerada a Interação solo-estrutura, nos demais houve acréscimo de cargas.

Quanto às distorções angulares, observou-se um efeito favorável da interação solo-estrutura com a sensível diminuição das distorções. O valor máximo obtido sem o efeito da interação solo-estrutura foi de $1/222$ correspondente às colunas P6-P12, sendo este valor reduzido para $1/516$ no modelo 2 e para $1/439$ no modelo 3. Os valores das distorções para as demais colunas foram inferiores a $1/500$ em ambos os modelos com a consideração da interação solo-estrutura.

A Tabela 4 sumariza os valores médios de recalques dos pilares da lâmina do prédio, medidos em cada fase, bem como os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 4. Recalques médios e coeficientes de variação

Leitura	Resumo dos recalques dos pilares e dos coeficientes de variação										
	L2	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L14
Tempo (dias)	27	100	129	206	281	328	353	381	414	472	552
Média (mm)	1,634	3,092	1,672	2,591	2,893	3,521	0,865	2,064	3,254	2,722	1,577
σ'	0,370	0,650	0,315	0,511	0,521	0,376	0,350	0,565	0,498	0,694	0,467
CV (%)	23%	21%	19%	20%	18%	11%	40%	27%	15%	25%	30%

A Tabela 4 mostra que não há uma correspondência entre os recalques absolutos médios e a evolução da obra, confirmando a sua aparente independência. Já os recalques diferenciais, diminuem com o crescimento do edifício, neste caso representado pelo coeficiente de variação "CV". Também percebeu-se a tendência à uniformização dos recalques à medida que a obra evoluiu.

3.3. Avaliação dos Métodos de Estimativa de Recalques

A seguir é apresentado os resumos das estimativas de recalques através dos quatro métodos selecionados para a análise:

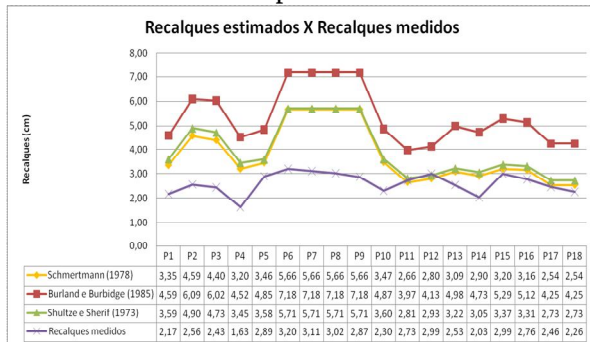


Figura 8. Gráfico comparativo recalques estimados x recalques medidos considerando as cargas da ISE

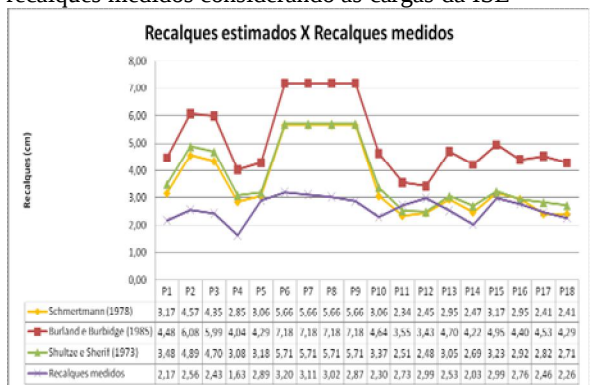


Figura 9. Gráfico comparativo recalques estimados x recalques medidos sem considerar as cargas da ISE

A consideração das cargas da Interação solo-estrutura nos cálculos de estimativas de recalques com os três métodos não resultou em grandes diferenças, a divergência foi de 4% em média.

Os três métodos combinados à Teoria de Terzaghi estimaram valores de recalques conservadores em relação as leituras medidas.

Os métodos de Schmertmann (1978) e Shultze e Sherif (1973) foram os que apresentaram valores mais concordantes quando comparado aos valores medidos, a diferença esteve entre 15 e 20% a favor da segurança aproximadamente. Já o método de Burland e Burbidge (1985), quando combinado à Teoria do Adensamento resultou em valores bastante conservadores, a média da diferença entre a estimativa e o valor real foi de 34% a favor da segurança.

3.4. Análise da Redução de Custos da Fundação

Foram realizadas estimativas de custos envolvidos na execução de dois tipos de solução de fundação, a saber:

- Solução 01 - Sapatas isoladas e conjugadas apoiadas sobre solo melhorado com estacas de compactação de areia e brita (lâmina do prédio), e sapatas isoladas apoiadas em terreno natural (periferia);
- Solução 02 - Solução mista, isto é, estacas tipo perfil metálico HP 310 x 79 até cerca de - 44 m (para a lâmina do prédio), e sapatas isoladas apoiadas em terreno natural (periferia).

Para a pesquisa foi utilizada a Tabela de Composições de Preços para Orçamentos 13 (PINI) visando a elaboração de uma planilha de

estimativa de orçamento. Resultando na seguinte tabela resumo:

Tabela 5. Análise comparativa de custos entre as duas possíveis soluções

Preço estimado da solução 1 - sapatas em solo melhorado	
Valor total	R\$ 484.958,66
Preço estimado da solução 2 - perfil metálico (lâmina) e sapatas (periferia)	
Valor total	R\$ 1.268.053,83
Diferença	R\$ 783.095,17
Redução	62%

A Solução 01 apresentou um orçamento estimativo de R\$ 484.958,66. Desse valor, cerca de um terço, isto é, R\$189.708 refere-se ao custo do melhoramento e o restante R\$ 298.250,17 à fundação superficial.

A Solução 02 entretanto demonstrou ser mais cara, o orçamento estimativo foi de R\$1.268.053,83.

Comparando os valores estimados para o preço das duas soluções, constata-se que a solução 01 neste caso específico, permite uma poupança de cerca de R\$ 783.095, o que percentualmente representa uma redução de 62% no custo das fundações.

4 CONCLUSÕES

Através do presente trabalho foi possível avaliar a eficácia do processo de melhoramento de solo tanto na redução de recalques, bem como, dos custos advindos das possíveis soluções de fundações.

Recapitulam-se os pontos principais:

- O ganho de resistência avaliado por meio do N_{SPT} foi de cinco vezes em média o valor inicial;
- Tanto os valores das distorções, como as velocidades de recalques, calculadas para os pilares monitorados, mostraram-se compatíveis e dentro do padrão de normalidade mencionado por Alonso (1995);
- Observa-se também que a consideração da interação solo-estrutura na estimativa das distorções angulares apresentou efeito favorável minorando os valores estimados;
- Os métodos de Schultze e Sherif (1973) e Schmertmann et al. (1978) foram os que

apresentaram valores mais concordantes quando comparado aos valores recalques medidos;

- Confirma-se a grande economia em se utilizar a técnica de compactação de solos. No edifício avaliado caso fosse utilizada a solução de fundação em estacas metálica até -44,0 m o custo seria 62% maior, isto é, houve uma economia de R\$ 783.095,17.

AGRADECIMENTOS

A equipe autora agradece a Deus. Também a empresa ENSOLO - Engenharia e Consultoria de Solos e Fundações LTDA e a UFPE por disponibilizar os dados necessários à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. . *Previsão e controles das fundações*. 1ª Reimpressão. São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda. 142 p. 1995.
- BURLAND, J. B.; BURBIDGE, M. C. *Settlements of foundation on sand and gravel*. In: Institution of Civil Engineers, London. Proceedings...London: Institution of Civil Engineers, 1985.
- CINTRA J.C. A; AOKI, N.; ALBIERO, J H. *Tensão admissível em fundações diretas*. São Paulo, SP: Editora RiMa, 2003.
- SCHEMERTMANN, J. H., HARTMAN, J. P., and BROWN, P. R. *Improved Strain Influence Factor Diagrams*. Journal of the Geotechnical Division, ASCE, 104(8), pg. 1311-1335, 1978.
- SCHULTZE, E e SHERIF, G. *Prediction of Settlement from Evaluated Settlements for Sand*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 1.3, pp. 2-36, Moscou. Proceedings. Russia, 1973.