
Melhoramento de solo arenoso por estacas de argamassa: um estudo de caso

Sandy soil improvement by mortar piles: a case study

Ricardo Sérgio Macedo Tabosa Filho¹, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello^{1*},
Raimundo Paulo da Silva Júnior², Caroline Isabele Nepomuceno¹

RESUMO

Em obras de engenharia, em situações em que o solo apresenta resistência suficiente para resistir aos esforços emprega-se fundações rasas sem muitas dificuldades, porém existem situações em que o solo necessita de melhoramento. Este artigo apresenta uma análise da aplicação da técnica de melhoramento do terreno com estacas de compactação e sua influência no projeto de fundação, de uma obra na Cidade de Tamandaré, em Pernambuco. Foi realizado um comparativo das características do solo antes e depois do seu melhoramento, e uma quantificação da economia obtida no dimensionamento dos elementos de fundação. Os valores do fator melhoramento foram maiores que 1 em praticamente todas as profundidades, sendo os maiores valores entre 1,9 m e 3,35 m, chegando a um aumento de compactidade de 3,71 vezes. Os valores de capacidade de carga do solo aumentaram de 96,4% e 166,7%. Os recalques estimados diminuíram de 7,42 a 12,65 mm, ficando entre 5,77 e 11,20 mm. A economia total com a redução do volume das sapatas foi de 48,29 m³ de concreto armado e de R\$ 79.311,21. O melhoramento do solo mostrou-se vantajoso quanto o aumento da capacidade de carga e diminuição dos recalques, e viável economicamente.

Palavras-chave: Fundação superficial. Capacidade de carga. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

In engineering works, in situations where the ground presents sufficient resistance to resist the exercises, it is used as many difficulties as possible. However, there are situations in which the soil does not present initial characteristics, and its improvement is necessary. This article presents an analysis of the application of the technique of land improvement with compaction piles and its influence on the foundation project of a work in the Tamandaré city, in the state of Pernambuco. A comparison of the characteristics of the soil before and after its improvement was carried out, and a quantification of the savings made in the design of the foundation elements. The values of the improvement factor were greater than 1 at all depths, with the highest values between 1,9 m and 3 m, times the compactness increase of 3,71. There was an increase of 96,4% and 166,7% in the soil bearing capacity values. The settlements decreased between 45 and 12,65 mm, reaching 11,20 mm. The total savings with the reduction in the volume of the foundation was 48,29 m³ of reinforced concrete and R\$ 79.311,21. Soil improvement proved to be advantageous in terms of improving bearing capacity, reducing settlements and economically viable.

Keywords: Shallow foundation. Bearing capacity. Economic viability.

¹ Universidade Federal de Pernambuco

*isabelamcvbello@hotmail.com

² Faculdade de Integração do Sertão (FIS)

INTRODUÇÃO

Muitas vezes, as características do terreno de fundação, para suportar determinada estrutura, exige soluções dispendiosas, onerando economicamente a execução da obra. Em função disso, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para promover o melhoramento das características geotécnicas do terreno de fundação (AMORIM, 2015).

Essas técnicas de melhoramento permitem: (a) o uso de fundações superficiais que, de outra forma, requerem fundação profunda; (b) as sapatas podem ser projetadas com maiores taxas de trabalho, havendo significativa redução dos volumes de escavação e de concreto. (c) as fundações profundas ficam com menor profundidade, resultando em menos estacas e volume de blocos mais reduzidos obra (GUSMÃO, 2005).

Os objetivos do melhoramento são: (a) assegurar a estabilidade à fundação; (b) evitar recalques excessivos que podem trazer danos à obra; (c) permitir construção sobre solos problemáticos (areias fofas, aterros, solos colapsíveis e expansivos, minas arruinadas). Em terrenos arenosos, apesar da baixa compactidade, não existem maiores inconvenientes em carregamentos estáticos, o mesmo não ocorre em carregamentos dinâmicos, que podem ocasionar liquefação (GUSMÃO FILHO & GUSMÃO, 2000).

Gusmão et al. (2005) relata que a técnica de estacas de compactação possibilita elevar a tensão admissível do terreno para valores até 600 kPa, implicando em redução de volume de escavação e concreto. Esta técnica tem sido bastante utilizada em cidades nordestinas. No Recife, os primeiros prédios eram projetados com pressões de trabalho no terreno melhorado de 250kPa, enquanto há prédios construídos com mais de 30 pavimentos e pressões de até 650 kPa. Em João Pessoa, 90% das obras de fundações têm sido projetadas em sapatas com melhoramento do solo através desta técnica

A técnica de compactação de estacas de areia e brita densifica o solo através de 3 efeitos: (a) introdução de material compactado no terreno; (b) deslocamento do material do terreno igual ao volume de material introduzido; (c) efeito de vibração decorrente do processo de cravação dinâmica. Essa técnica apresenta algumas limitações, dentre elas a diminuição da sua eficiência quando existe excessiva presença de finos no solo, caracterizada pela porcentagem de solo que passa na peneira N° 200 (GUSMÃO, 2005).

A técnica de melhoramento com de estacas de argamassa é uma variante do uso de estacas de areia e brita, e foi desenvolvida em virtude das difíceis condições do subsolo do Recife. O processo de melhoramento de solos, conhecidos como “estacas de

argamassa”, se trata de uma estaca constituída de concreto simples. O seu emprego é determinado em função da granulometria do terreno superficial e da presença de camadas argilosas moles superficiais, que devem ser ultrapassadas para redução de recalques (GUSMÃO FILHO & GUSMÃO, 2000).

Este artigo apresenta um estudo do melhoramento de solo arenoso por estacas de argamassa de um empreendimento localizado em Tamandaré, Pernambuco. Trata-se de uma estrutura hoteleira constituída de 4 blocos de 8 pavimentos cada, com cargas elevadas e subsolo constituído basicamente de material arenoso. Foram realizados comparativos das características do solo antes e depois do seu melhoramento e da economia obtida no dimensionamento dos elementos estruturais de fundação.

REFERENCIAL TEÓRICO

Eficiência do Melhoramento

Pela escassez de dados de provas de carga em placas em terrenos melhorados, o controle para saber a eficiência do melhoramento com estacas de compactação tem sido feito normalmente com sondagens antes e após o melhoramento (AMORIM et al., 2013).

Gusmão Filho e Gusmão (2000) relacionaram o índice de resistência à penetração do solo N_{SPT} , antes (N_i) e após (N_f) melhoramento, obtendo o fator de melhoramento (K).

O fator de melhoramento é inversamente proporcional a compacidade inicial do solo, ou seja, quanto maior a compacidade inicial do solo, maior a resistência que ele oferece a compactação e menor o volume de material adicionado, diminuindo o fator de melhoramento K até o limite de $K = 1$ para N_{SPT} superior a 20.

Gusmão Filho e Gusmão (2000) apresenta o efeito da compactação através de estacas de areia e/ou brita em camadas superficiais arenosas, através da variação do fator de melhoramento K para mais de 20 obras diferentes da cidade do Recife. A maioria dos pontos apresenta-se em uma faixa bastante definida e o fator K diminui à medida que a compacidade inicial do solo aumenta. Este limite é função da energia de compactação.

Diversos pesquisadores têm mostrado que a presença de finos reduz sensivelmente a eficiência do melhoramento (GUSMÃO FILHO & GUSMÃO, 1990). A presença de solo coesivo, ou de uma fração de finos no solo a compactar, cria uma reação às vibrações impostas ao terreno. Há um maior efeito de amortecimento nos solos finos sobre vibrações horizontais, reduzindo bastante a eficiência do melhoramento.

Gusmão Filho e Gusmão (2000) apresentam resultados de ensaios de SPT, realizados a diferentes distâncias de um grupo de estacas de compactação, com diâmetros de 300 mm. As estacas promovem a compactação do solo circundante em um raio de influência de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da estaca, e o espaçamento da malha deve ser de 3 vezes o diâmetro da estaca, cobrindo toda a malha de projeção do prédio. Quando há uma excessiva fração de finos no solo os efeitos do melhoramento diminuem bastante. Para solos coesivos, as estacas funcionam como drenos, acelerando os recalques.

O aumento da energia de compactação conduz a uma maior eficiência do melhoramento. Contudo, equipamentos mais pesados produzem excessivas vibrações durante a cravação das estacas, o que pode causar danos às obras vizinhas. Existe um limite de compactação, a partir do qual a energia não mais influencia o melhoramento. Gusmão Filho e Gusmão (2000) mostra a comparação da curva K versus N_i para duas obras com energia diferentes. Os pontos correspondentes à maior energia de compactação apresentam uma maior influência de melhoramento.

Mitchell (1968) propôs uma faixa granulométrica ideal para o melhoramento por vibração (percentagem de finos inferior a 20%). Para compactação com estacas de areia e brita, esta percentagem pode ser maior, sem que seja diminuída a eficiência do melhoramento, portanto, Gusmão (2005) sugerem que a técnica de melhoramento com estacas de areia e brita não seja utilizada em terrenos com teor de finos de solo superior à esta percentagem. Em praticamente todas as obras, o melhoramento apresenta baixa eficiência até 1,5m de profundidade, devido a falta de confinamento do solo próximo a superfície do terreno, que provoca levantamento das camadas mais superficiais com a compactação. Uma grande desvantagem é a vibração causada na cravação das estacas que podem provocar danos nas obras vizinhas.

Aspectos de projeto e execução das estacas de melhoramento

Na fase de projeto de uma solução de compactação com estacas de areia e brita, Gusmão Filho (1998) sugere que a execução de uma estaca promove a compactação do solo circundante em raio de influência de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da estaca. A malha do estaqueamento deve cobrir toda a área da projeção da lâmina do prédio, estendendo-se uma ou duas filas de estacas além dos limites da projeção das sapatas. O comprimento da estaca é função da variação da compacidade da camada (ou densidade relativa da areia), com a profundidade e da estrutura projetada.

Gusmão (2005) comentam que quanto maior a compacidade inicial do solo, menor será o efeito do melhoramento. Para camadas com N_{SPT} inicial superior a 20 golpes, verifica-se, para a energia de compactação utilizada no Recife, que o efeito da compactação é praticamente desprezível.

Posterior à execução do estaqueamento, devem ser realizadas sondagens antes e depois do melhoramento. Eventualmente, realizam-se provas de carga vertical à compressão em placas. De posse da tensão admissível após a compactação, e de características como o material utilizado nas estacas, diâmetro, espaçamento entre as estacas, determina-se o comprimento da estaca (H), através do SPT. Uma areia com um N_{SPT} entre 15 e 20 é o ideal para o repouso da ponta da estaca. O comum é que o comprimento da estaca esteja entre $3,5 \leq H \leq 5,0$, pois para essas profundidades o melhoramento torna-se bastante vantajoso, principalmente no aspecto de custos. Para profundidades maiores, 8,0 a 10,0m, a mão-de-obra encarece muito, sendo preferível optar por fundações profundas.

De acordo com Soares & Soares (2003), o porte do prédio é fator determinante para prever a tensão admissível necessária para viabilizar as sapatas.

Cálculo da capacidade de carga

Segundo Teixeira (1996), a capacidade de carga admissível do solo (σ_{adm}) pode ser estimada a partir da Equação 2. Para o autor, a área de influência do bulbo de tensões equivale a 2 vezes o valor da menor dimensão B da sapata.

$$\sigma_{adm} = 20 \times \overline{N_{spt}} \text{ (KN/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Onde: $\overline{N_{spt}}$ – média aritmética dos N_{spt} dentro da influência do bulbo de tensões.

Cálculo do recalque nas sapatas

Segundo Schmertmann (1978), a deformação vertical ε_s em solos arenosos pode ser obtida através da Equação 3. O valor máximo do fator de influência é calculado a partir da Equação 4.

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E_s} * I_s \quad (2)$$

$$I_{zmax} = 0,5 + 0,1 * \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}} \quad (3)$$

Onde: σ – Carregamento uniforme; I_s – Fator de influência obtido na deformação (deve-se utilizar o gráfico de Schmertmann (1978)); σ^* - Diferença entre a tensão aplicada pela fundação advinda do peso da estrutura e a tensão vertical efetiva na cota de apoio da fundação; σ_v – Tensão vertical efetiva na profundidade correspondente a I_{zmax} .

Segundo Schmertmann (1978), outro parâmetro necessário para o cálculo do recalque é o módulo de deformabilidade de cada camada (E_s) (Equação 5).

$$E_s = \alpha * K * Nspt_{camada} \quad (4)$$

Onde: α – valor igual a 3 para solos arenosos; K – valor igual a 0,9 para solos arenosos.

Existem duas constantes C_1 e C_2 , necessárias no método que representam respectivamente, o efeito de embutimento da fundação e do tempo (Equações 6 e 7).

$$C_1 = 1 - 0,5 * \frac{q}{\sigma^*} \quad (5)$$

$$C_2 = 1 + 0,2 * \log\left(\frac{t}{0,1}\right) \quad (6)$$

Onde: q – Tensão vertical efetiva na cota de apoio da fundação; t – Tempo em anos em que se deseja obter o recalque.

O recalque da sapata (ρ) pode ser calculado na Equação 8 (Schmertmann, 1978).

$$\rho = C_1 * C_2 * \sigma^* * \sum \frac{I_z}{E_s} * \Delta z \quad (7)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Características da obra

Trata-se de uma estrutura hoteleira constituída de 4 blocos de 8 pavimentos cada, com cargas elevadas e subsolo constituído basicamente de material arenoso. Localiza-se na Praia dos Carneiros, na cidade de Tamandaré, Pernambuco (Figura 1.)

Foram realizadas 23 sondagens SPT, 15 antes e 8 após o melhoramento. As sondagens mostraram, em geral, um perfil do solo de fundação heterogêneo, composto, inicialmente, por uma camada de silte argilo-arenoso, seguida por uma camada de areia

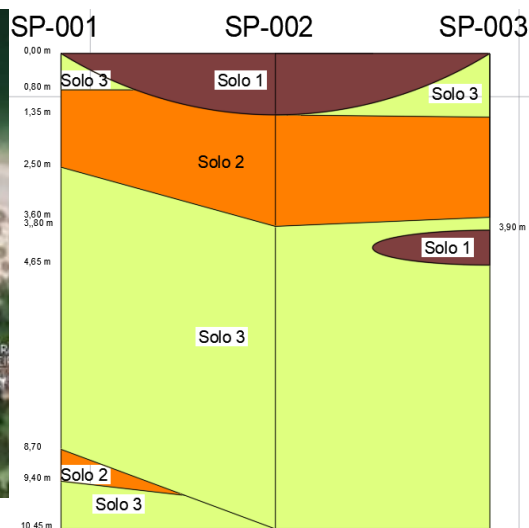
fina ou média siltosa. Finalizando com uma camada de areia fina clara, medianamente compacta (Figura 2). As sondagens SP-001, SP-002 e SP-003 foram utilizadas para a determinação da capacidade de carga das estacas.

O projeto de melhoramento do solo para os blocos A e B, semelhante ao projeto dos blocos C e D, encontra-se em Tabosa Filho (2022).

Figura 1 - Localização da Obra



Figura 2 - Perfil estratigráfico típico.



Fonte: Os autores (2022)

Metodologia

Os estudos consistiram nas seguintes etapas: (a) analisar as sondagens SPTs e realizar o cálculo do fator de melhoramento do solo (SPT antes e SPT depois do melhoramento); (b) estimativa da capacidade de carga do solo após o melhoramento e comparar com a capacidade de carga do solo antes do melhoramento; (c) estimatimar o recalque do solo após o melhoramento e comparar com a capacidade de carga do solo antes do melhoramento; (d) comparar o custo das fundações com e sem melhoramento.

O volume de concreto armado será igual ao volume da sapata, V_s (Equação 9).

$$V_s = \frac{h-h_0}{3} x (A x B + a * b + \sqrt{A * B * a * b}) + (A * B * h_0) \quad (8)$$

Para o dimensionamento das sapatas sem o melhoramento do solo, utilizou-se o programa GEO 5 – Sapatas via CPT. Foram introduzidos no programa o perfil do solo e os valores de resistência de ponta, oriundos de um possível CPT do solo.

Para obter-se os resistência de ponta (q_c) do solo foi feita uma conversão dos valores de N_{SPT} . Segundo Schmertmann (1970), pode-se relacionar os valores de q_c e

N_{SPT} através do coeficiente K_c . Os valores de K_c podem ser obtidos em função da profundidade do ensaio: $K_c = 0,411$ para 0 - 10m de profundidade; $K_c = 0,407$ para 10 - 20m de profundidade; $K_c = 0,452$ para 20-40m de profundidade (Schmertmann, 1978).

Para a estimativa de custo das fundações e do melhoramento do solo foram usados os preços fornecidos pela SINAPI 04/2022 não desonerada para Pernambuco (Tabela 2).

O traço da argamassa é dado pela relação x (cimento) : y (areia) : z (brita), e foi estimado no melhoramento por meio da Equação 11.

$$V = c + a + b \quad (9)$$

Onde: V - valor do traço de argamassa, c – custo de cimento / m^3 de argamassa, a – custo de areia / m^3 de argamassa, b – custo de brita / m^3 de argamassa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fator melhoramento do solo

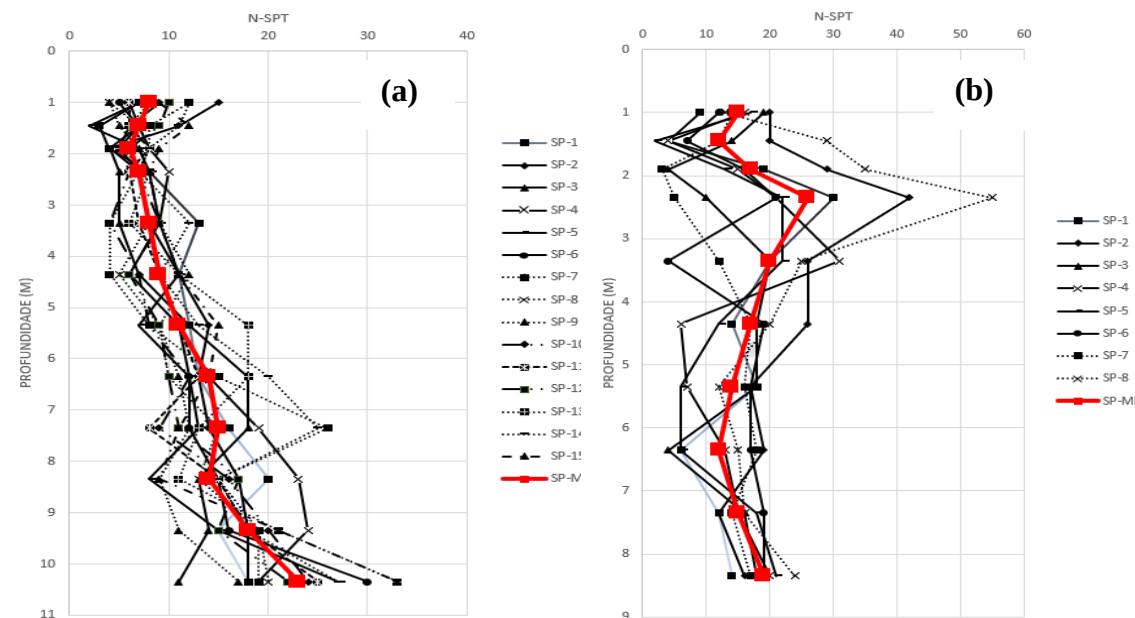
Comparando-se as sondagens realizadas no solo natural e entre as estacas, chegou-se as correlações entre os valores de N_{SPT} antes e depois da compactação. As Figuras 3a e 3b mostram as sondagens realizadas antes e depois da compactação e o N_{SPT} médio, respectivamente. Os valores de N_{SPT} médio foram calculados realizando-se uma média aritmética simples dos valores obtidos nas sondagens em solo natural em cada profundidade, arredondando-se sempre para o inteiro mais próximo. Em geral, nota-se um acentuado aumento do N_{SPT} após o melhoramento, até próximo a 6,0m de profundidade. No trecho compreendido entre 6,5 e 7,5m, não houve melhoramento visto que o solo já apresentava compacidade inicial, e, portanto, maior a resistência a compactação. Entretanto, o N_{SPT} após o melhoramento volta a subir após o 7,5 de profundidade, até o limite das sondagens.

Apesar da grande quantidade de informações sobre o N_{SPT} antes e após o melhoramento, há poucos dados disponíveis que permitam a avaliação do desempenho da obra, tais como ensaios de placa, medições de recalque, etc.

Na Tabela 1 estão os valores de N_{SPT} médio antes e depois do melhoramento e o fator de melhoramento (k) a cada profundidade. Conforme esperado, os valores de k foram maiores que 1 em praticamente todas as profundidades. Por tratar-se de solos de baixa compacidade, verifica-se a eficiência da técnica de melhoramento do solo, pois

torna possível a a execução de fundações mais econômicas, no caso, as sapatas de fundação. Os maiores valores foram encontrados no trecho entre 1,9 m e 3,35m, chegando a um aumento de compacidade 3,71 vezes.

Figura 3 -Perfil N_{SPT}: (a) antes da compactação; (b) após a compactação.



Fonte: Os Autores (2022)

Tabela 1 - Valores de N_{SPT} médio antes e depois do melhoramento e o fator de melhoramento.

Profundidade (m)	N _{SPT} médio		Fator melhoramento k
	antes do melhoramento	depois do melhoramento	
1	8	15	1,87
1,45	7	12	1,71
1,90	6	17	2,83
2,35	7	26	3,71
3,35	8	20	2,50
4,35	9	17	1,89
5,35	11	14	1,27
6,35	14	14	1,00
7,35	15	15	1,00
8,35	14	19	1,36

Fonte: o Autor (2022)

Os resultados de fator melhoramento encontrados (k) na obra estudada estão na faixa de valores encontrada por Gusmão e Gusmão Filho (2000) (Figura 4). Nas primeiras camadas a melhora no solo não foi tão significativa, isto se deve à falta de confinamento do solo próximo a superfície do terreno. Nas profundidades em que estão presentes areias, as relações entre o fator melhoramento e o N_{SPT} inicial foram semelhantes aos valores

encontrados por Gusmão e Gusmão Filho (2000). Na Figura 5 são mostrados os resultados do melhoramento nas cotas em que foram encontradas areias. A energia de compactação prevista no projeto de melhoramento foi de **54 kn * m**.

Figura 4 - Efeito da compactidade inicial do solo no melhoramento com pontos da obra.

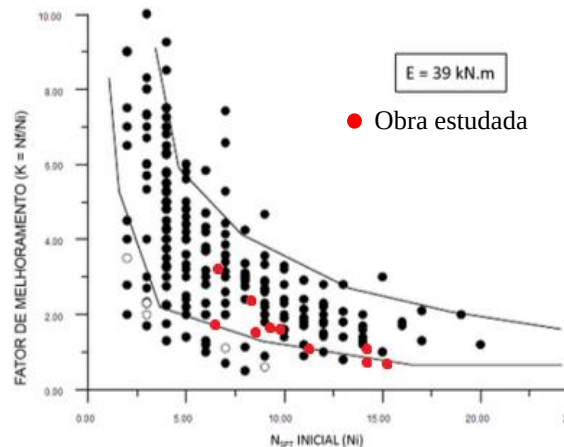
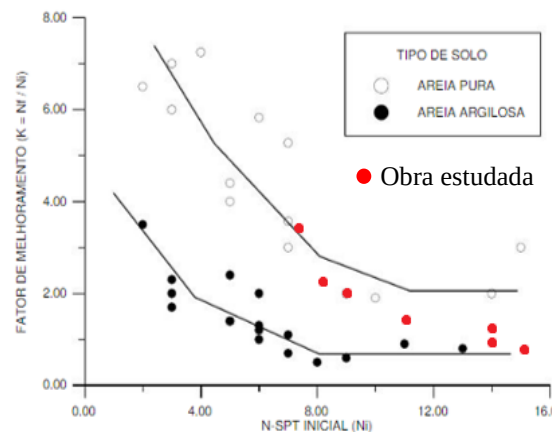


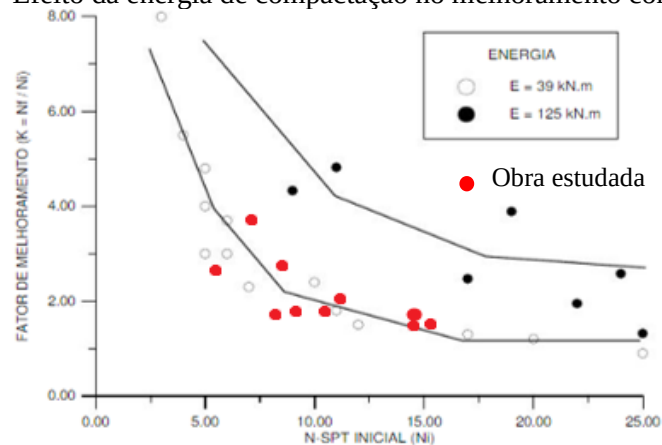
Figura 5 - Efeito da granulometria do solo no melhoramento com pontos da obra.



Fonte: Os Autores (2022) adaptado de Gusmão e Gusmão Filho (2000)

Notou-se que os valores encontrados para essa energia de compactação são similares aos dados coletados por Gusmão e Gusmão Filho (2000) (Figura 6).

Figura 6 - Efeito da energia de compactação no melhoramento com pontos da obra.



Fonte: Os Autores (2022) adaptado Gusmão e Gusmão Filho (2000)

Estimativa da capacidade de carga após o melhoramento

Aplicando o método de Teixeira pôde-se estimar a capacidade de carga do solo, para cada tipo de sapata da obra. Foram usados os dados de N_{SPT} médios. Na Tabela 2 mostra-se um aumento de 96,4% e 166,7% nos valores de capacidade de carga do solo com e sem o melhoramento, respectivamente.

Estimativa de recalque após o melhoramento

Aplicando o método de Schmertmann obteve-se os valores de recalque para os 4 tipos de fundação do projeto de fundação (Tabela 3). Foram utilizados os valores de N_{SPT} médios. O parâmetro C_2 foi calculado para um tempo de 6 meses, pois para períodos maiores que 6 meses o recalque permaneceu praticamente o mesmo, sem grandes variações. As estimativas de recalque são para 6 meses após a construção das sapatas.

Tabela 2 - Comparação entre os resultados da capacidade de carga do solo.

Sapata	Menor dimensão (m)	Extensão do bulbo de tensões (m)	Cota da base da sapata (m)	Média dos N_{spt} no bulbo		Capacidade de carga (KN/m^2)		Ganho (%)
				Antes do melhoramento	Depois do melhoramento	Antes do melhoramento	Depois do melhoramento	
Tipo 1 - Blocos A e B	1,15	2,3	-1,5	7,5	20,0	150	400	166,7
Tipo 2 - Blocos A e B	1,95	3,9	-1,8	9,2	18,0	183,3	360	96,4
Tipo 3 - Blocos A e B	1,15	2,3	-1,5	7,5	20,00	150	400	166,7
Tipo 4 - Blocos A e B	1,95	3,9	-1,5	9,2	18,0	183,3	360	96,4
Tipo 1 - Blocos C e D	1,15	2,3	-1,5	7,5	20,00	150	400	166,7
Tipo 2 - Blocos C e D	1,95	3,9	-1,8	9,2	18,0	183,3	360	96,4
Tipo 3 - Blocos C e D	1,95	3,9	-1,5	9,2	18,0	183,3	360	96,4
Tipo 4 - Blocos C e D	1,95	3,9	-1,5	9,2	18,0	183,3	360	96,4

Fonte: Os Autores (2022)

Tabela 3 - Comparação entre os resultados recalque do solo com e sem melhoramento.

Sapata	Recalque sem o melhoramento (mm)	Recalque com o melhoramento (mm)	Diferença (mm)
Tipo 01 - Blocos A e B	15,45	5,77	9,68
Tipo 02 - Blocos A e B	20,22	11,20	9,02
Tipo 03 - Blocos A e B	13,86	6,44	7,42
Tipo 04 - Blocos A e B	21,40	8,75	12,65
Tipo 01 - Blocos C e D	15,45	5,77	9,68
Tipo 02 - Blocos C e D	20,22	11,20	9,02
Tipo 03 - Blocos C e D	13,86	6,44	7,42
Tipo 04 - Blocos C e D	21,40	8,75	12,65

Fonte: Os Autores (2022)

Após o melhoramento do solo, os recalques estimados diminuíram de 7,42 a 12,65 mm, ficando entre 5,77 e 11,20 mm. De acordo com Terzagui e Peck (1967), o recalque máximo admissível para sapatas em areias deve ser menor que ou igual a **25 mm**. Portanto, os valores de recalque estimados estão dentro da faixa de valores aceitáveis.

Para o carregamento dado em projeto das fundações, as estimativas de recalque mostram que caso as mesmas sapatas tivessem sido executadas no solo sem o melhoramento, ocorreriam recalques maiores ao longo de 6 meses.

Comparativo de custo das fundações projetadas com e sem melhoramento

As dimensões das sapatas que seriam executadas caso não houvesse melhoramento do solo foram calculadas utilizando o software GEO5. Esse software necessita dos valores de resistência de ponta, de um ensaio de CPT. Esses valores foram estimados utilizando a metodologia Schmertmann (1970), a partir dos valores de N_{SPT} médios antes do melhoramento (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de resistência de ponta médios

Profundidade (m)	Resistência de ponta (kPa)	Profundidade (m)	Resistência de ponta (kPa)	Profundidade (m)	Resistência de ponta (kPa)
1	3,288	3,35	3,288	7,35	6,165
1,45	2,877	4,35	3,699	8,35	5,754
1,9	2,466	5,35	4,521	9,35	7,398
2,35	2,877	6,35	5,754	10,35	9,361
				15	10,19

Fonte: Os Autores (2022)

Com as dimensões das sapatas com e sem melhoramento, pôde-se calcular o volume de concreto armado, com e sem melhoramento, de cada tipo de sapata da obra. A Tabela 5 mostra as dimensões e o volume de concreto armado necessário para de cada tipo de sapata, com e sem melhoramento do solo. Nota-se a diminuição das dimensões das fundações executadas com melhoramento do solo quando comparadas com as dimensões que teriam essas mesmas fundações sem o melhoramento do solo.

A Tabela 6 mostra a comparação entre as sapatas com e sem melhoramento do solo, em termos de concreto armado. Houve uma diminuição significativa do volume de concreto armado, de no mínimo 22,52%, chegando até a economia de 52%. Em termos gerais da obra, a economia global, em termos de concreto armado, foi de 40,51%, ou seja, foram utilizados 48,29 m³ de concreto armado a menos. Na Tabela 7 é apresentado um comparativo de custos entre as sapatas com e sem melhoramento de solo. A economia global em termos de concreto armado foi de R\$ 11.2332,00.

Para verificar a viabilidade do melhoramento de solo, é necessário o cálculo do custo do melhoramento. Na Tabela 8 são mostrados os custos envolvidos com a argamassa usada no melhoramento. O traço e o volume total de argamassa foram obtidos no projeto de melhoramento. O custo apenas com argamassa para realizar o melhoramento foi de R\$ 25.021,02. Além dos custos com argamassa, ainda houve o custo de R\$ 8.000,00 com a máquina utilizada para a realização do melhoramento. O custo final do melhoramento do solo foi de R\$ 33.021,02.

Tabela 5 - Dimensões e volume de concreto armado para sapatas com melhoramento do solo

Sapatas	Dimensões (m)							Volume de concreto de cada sapata (m³)
	A	B	A	b	H ₀	H	Profundidade	
Com melhoramento do solo								
Tipo 01 - Blocos A e B	1,15	1,15	0,50	0,20	0,20	0,40	1,50	0,38
Tipo 02 - Blocos A e B	1,95	1,95	0,28	0,28	0,20	0,50	1,80	1,20
Tipo 03 - Blocos A e B	1,15	1,95	0,20	0,40	0,20	0,50	1,50	0,72
Tipo 04 - Blocos A e B	2,75	1,95	0,50	0,24	0,25	0,60	1,50	2,07
Tipo 01 - Blocos C e D	1,15	1,15	0,50	0,20	0,20	0,40	1,50	0,38
Tipo 02 - Blocos C e D	1,95	1,95	0,28	0,28	0,20	0,50	1,80	1,20
Tipo 03 - Blocos C e D	1,15	1,95	0,20	0,40	0,20	0,50	1,50	0,72
Tipo 04 - Blocos C e D	2,75	1,95	0,50	0,24	0,25	0,60	1,50	2,07
Sem melhoramento do solo								
Tipo 01 - Blocos A e B	1,60	1,70	0,40	0,40	0,20	0,40	1,50	0,78
Tipo 02 - Blocos A e B	2,10	2,30	0,40	0,40	0,20	0,50	1,80	1,55
Tipo 03 - Blocos A e B	1,80	2,60	0,40	0,40	0,20	0,50	1,50	1,51
Tipo 04 - Blocos A e B	3,40	3,10	0,40	0,40	0,25	0,60	1,50	4,03
Tipo 01 - Blocos C e D	1,60	1,70	0,40	0,40	0,20	0,40	1,50	0,78
Tipo 02 - Blocos C e D	2,10	2,30	0,40	0,40	0,20	0,50	1,80	1,55
Tipo 03 - Blocos C e D	1,80	2,60	0,40	0,40	0,20	0,50	1,50	1,51
Tipo 04 - Blocos C e D	3,40	3,10	0,40	0,40	0,25	0,60	1,50	4,03

Fonte: Os Autores (2022)

Tabela 6 - Comparação do volume de concreto armado na sapata com e sem melhoramento de solo

Sapatas	Quantidade de sapatas em projeto	Volume de concreto armado (m³)						
		sem o melhoramento		com o melhoramento		Economia (m³)		
		Por sapata	Total	Por sapata	Total	Para cada tipo de sapata	Total	%
Tipo 01 - Blocos A e B	8	0,78	6,24	0,38	3,07	0,40	3,17	50,82
Tipo 02 - Blocos A e B	18	1,55	27,95	1,20	21,66	0,35	6,29	22,52
Tipo 03 - Blocos A e B	8	1,51	12,05	0,72	5,78	0,78	6,27	52,00
Tipo 04 - Blocos A e B	3	4,03	12,10	2,07	6,22	1,96	5,88	48,60
Tipo 01 - Blocos C e D	2	0,78	1,56	0,38	0,77	0,40	0,79	50,82
Tipo 02 - Blocos C e D	9	1,55	13,98	1,20	10,83	0,35	3,15	22,52
Tipo 03 - Blocos C e D	14	1,51	21,09	0,72	10,12	0,78	10,97	52,00
Tipo 04 - Blocos C e D	6	4,03	24,21	2,07	12,44	1,96	11,77	48,60
Total para a fundação			119,19		70,89		48,29	40,51

Fonte: Os Autores (2022)

Tabela 7 - Comparativo de custos do concreto armado entre fundações com e sem melhoramento do solo.

Custo do concreto armado (R\$/m³) - SINAPI 04/2022	Volume total do concreto armado da fundação (m³)		Custo total (R\$)		Economia (R\$)
	com melhoramento	sem melhoramento	sem melhoramento	com melhoramento	
2326,16	119,19	70,89	277.244,81	164.912,58	112.332,23

Fonte: Os Autores (2022)

Tabela 8 - Gasto com argamassa no melhoramento

Materiais	Custo (R\$/m ³)	Custo do traço 1:6:3 (R\$/m ³)	Volume de argamassa (m ³)	Custo total com material no melhoramento (R\$)
Cimento – SINAPI 04/2022	720			
Areia - SINAPI 04/2022	115	162,492	153,983088	25.021,02
Brita - SINAPI 04/2022	71,64			

Fonte: Os Autores (2022)

A Tabela 9 mostra um comparativo entre o valor final da fundação da obra sem melhoramento e o valor da fundação da obra com melhoramento somado ao custo do melhoramento do solo. Houve uma economia significativa no custo final da fundação. Mesmo com custo do melhoramento do solo, a economia foi de R\$ 79.311,21, relativo a 28,61% do custo total da fundação sem melhoramento, confirmando a viabilidade e o efeito positivo do melhoramento de solo para a obra.

Tabela 9 - Comparativo entre o custo final da fundação da obra com e sem melhoramento

Fundação sem o melhoramento em termos de volume de concreto armado (R\$)	Fundação com melhoramento em termos de volume de concreto armado + melhoramento do solo (R\$)	Economia Obtida	
		R\$	%
277.244,8185	197.933,60	79.311,21	28,61

Fonte: Autor (2022)

CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizada uma análise da aplicação da técnica de melhoramento do terreno com estacas de compactação e sua influência no projeto de fundação. Os valores do fator melhoramento foram maiores que 1 em praticamente todas as profundidades. Os maiores valores situaram no trecho entre 1,9 m e 3,35m, chegando a um aumento de compacidade 3,71 vezes. Houve um aumento de 96,4% e 166,7% nos valores de capacidade de carga do solo com o melhoramento por estacas de compactação. Os recalques estimados diminuíram de 7,42 a 12,65 mm, ficando entre 5,77 e 11,20 mm. A economia total com a redução do volume das sapatas foi de R\$ 79.311,21 reais. O melhoramento do solo foi bastante positivo, trazendo vantagens estruturais e econômicas.

REFERÊNCIAS

AMORIM, M. D et al. **Study of Shallow Foundation Load Transfer on Improved Ground with Compaction Piles**. In: XV CONGRESO PANAMERICANO DE MACÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA. Proceedings... Buenos Aires, 2015. p. 1694-1701.

GUSMÃO, A.D. **Práticas de Fundações no Nordeste**. Geotecnia no Nordeste. Recife, PE: Editora Universitária, 2005.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A.D. **Contribuição ao estudo do Melhoramento de Terrenos Arenosos**. In: 9o CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Anais... Salvador, 1990. p 395-492.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A.D. **Estudo de Casos de Fundações em Terrenos Melhorados**. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Anais.. Foz do Iguaçu, 1994. p 191-198.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A. D. **Compaction Piles for Building Foundation**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING. Proceedings... Melbourne, 2000. CD-ROM.

GUSMÃO, A. D.; OLIVEIRA, P.E.; AMORIM, M. D. **Estudo Comparativo de Métodos de Melhoramento de Solos no Recife**. In: SEFE7 – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA. São Paulo, 2012.

SCHMERTMANN, J. H. **Static cone to compute static settlement over sand**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v.96, nSM3, p.1011-1043, 1970.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, 04/2022, Pernambuco. Caixa Economica Federal.

SOARES, V. B.; SOARES W. C. **Estacas de Compactação (Melhoramento de Solos Arenosos com Estacas de Compactação)**: João Pessoa, Editora Paraibana, 2003.

TABOSA FILHO, R. S. M. **Melhoramento de Solo Arenoso por Estacas de Argamassa: um Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco. 2022

TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de fundações**. SEFE II. III Seminário de Engenharia de fundações especiais e geotecnia. V.1 São Paulo. 1996. Pp 33-55

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2 ed ed. New York: John Wiley and Sons Co., 1967.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações** Vol. 1. Nova Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2004.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações** Vol. 2. Nova Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2010.

Recebido em: 01/06/2022

Aprovado em: 03/07/2022

Publicado em: 07/07/2022