



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RICARDO SERGIO MACEDO TABOSA FILHO

**MELHORAMENTO DE SOLO ARENOSO POR ESTACAS DE ARGAMASSA: UM
ESTUDO DE CASO**

Caruaru
2022

RICARDO SÉRGIO MACÊDO TABOSA FILHO

**MELHORAMENTO DE SOLO ARENOSO POR ESTACAS DE ARGAMASSA: UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Campus Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo
científico, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Profa. Dra. Maria Isabela Marques de Cunha Bello

Caruaru

2022

AGRADECIMENTOS

Para chegar ao término do curso de engenharia e para a realização deste trabalho contei com a ajuda e apoio de muitas pessoas especiais, dentre as quais agradeço:

A Deus por ter me dado a sabedoria e a força necessária para seguir em frente apesar das dificuldades.

A meus pais e minha família por terem me dado todo amor, apoio e suporte necessário para chegar até aqui.

Meus colegas de curso, que se tornaram verdadeiros amigos para a vida.

A todos os professores que passaram tanto conhecimento para mim. Em especial a professora Isabela, que me incentivou e esteve do meu lado em todos os momentos para a realização desse trabalho.

Aos engenheiros Raimundo Júnior e Caroline Nepomuceno que sempre me passaram as informações e dados da obra estudada com boa vontade.

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

Sandy soil improvement by mortar piles: a case study

RESUMO

Em obras de engenharia, a transmissão de carga para o solo ocorre através do elemento estrutural de fundação. Nas 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 não apresenta boas características iniciais, sendo necessário seu 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, no estado de 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 estruturais de fundação. Os valores do fator melhoramento (k) 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 compacidade de 3,71 vezes. Observou-se um aumento de 96,4% e 166,7% nos valores de capacidade de carga do solo. Após o melhoramento do solo, os recalques estimados diminuíram de 7,42 a 12,65 mm, ficando entre 5,77 a 11,20 mm. A economia total com a redução do volume das sapatas foi de 48,29 m³ de concreto armado. Em termos de custos, a economia total para a obra foi de R\$ 79.311,21. O melhoramento do solo mostrou-se muito vantajoso quanto melhoria da capacidade de carga e diminuição dos recalques e viável economicamente para a obra.

Palavras-chave: Fundação superficial. Capacidade de carga. Dimensionamento

ABSTRACT

In engineering works, load transmission to the ground occurs through the structural element of the foundation. In situations where the ground presents sufficient resistance to resist the exercises, it is used as many difficulties. 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 structural elements of foundation. The values of the improvement factor (k) 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. After soil improvement, settlements estimated between 45 and 12,65 mm, reaching 11,20 mm. The total savings with the reduction in the volume of the shoes was 48,29 m³ of reinforced concrete. In terms of costs, the total savings for the work was R\$ 79.311,21. Soil improvement proved to be very advantageous in terms of improving bearing capacity, reducing settlements and economically viable.

Keywords: Shallow foundation. Bearing capacity. Geotechnical Pproject

DATA DE APROVAÇÃO: 27 de maio de 2022

1 INTRODUÇÃO

Muitas vezes, as características do terreno de fundação, para suportar determinada estrutura projetada, exige soluções dispendiosas, onerando economicamente a execução da obra. Em função disso, diversas técnicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de promover o melhoramento das características geotécnicas do terreno de fundação, com significativa redução dos custos (Didier, 2019).

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 et al., 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 compacidade, em geral, não existem maiores inconvenientes em carregamentos estáticos, o mesmo não ocorre em carregamentos dinâmicos, que podem ocasionar um processo de liquefação.

GUSMÃO et al. (2005) relata que a técnica de estacas de compactação possibilita elevar σ_{adm} do terreno para valores até 600 kPa, implicando em redução de volume de escavação e concreto. No Recife, a partir da década de 70, os primeiros prédios eram projetados com pressões de trabalho no terreno melhorado de 250kPa, enquanto já há prédios construídos com mais de 30 pavimentos com pressões de até 650 kPa.

A técnica de compactação de estacas de areia e brita permite densificar o solo através de três 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. Esta técnica tem sido bastante utilizada em várias cidades nordestinas, tais como Recife, João Pessoa, Aracaju, Natal. Em João Pessoa, 90% das obras de fundações têm sido projetadas em sapatas com melhoramento prévio do solo, através da técnica de compactação com estacas de areia e brita (PASSOS, 2001 apud GUSMÃO et al., 2005).

Todavia, esta técnica, apresenta algumas limitações, dentre elas a diminuição da sua eficiência quando existe excessiva presença de finos no solo, geralmente caracterizada pela porcentagem de solo que passa na peneira N° 200 (PACHECO, 2002).

A técnica de melhoramento com 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”, na verdade 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.

Este artigo apresenta um estudo do melhoramento de solo arenoso por estacas de argamassa de um empreendimento localizado na Cidade de 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.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Eficiência do Melhoramento

De uma forma geral, 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 apenas com sondagens antes e após o melhoramento (AMORIM et al., 2013).

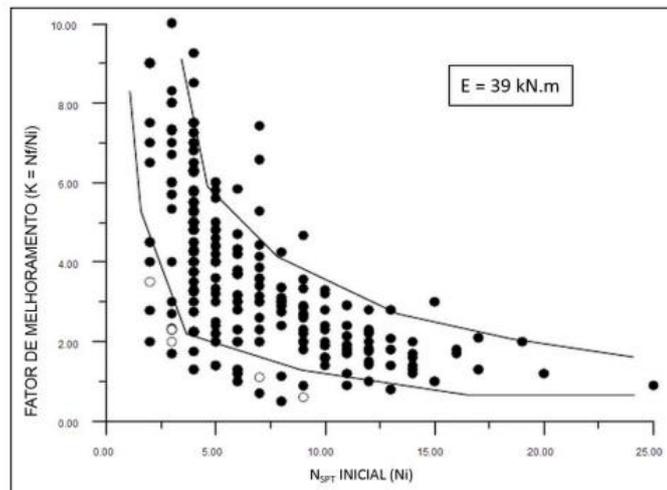
Gusmão Filho e Gusmão (2000) relacionaram o N_{SPT} antes (N_i) e após (N_f) o melhoramento, obtendo um fator de melhoramento (K).

$$K = \frac{N_f}{N_i} \quad (1)$$

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.

A Figura 1 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.

Figura 1 - Efeito da compacidade inicial do solo no melhoramento – Método Convencional



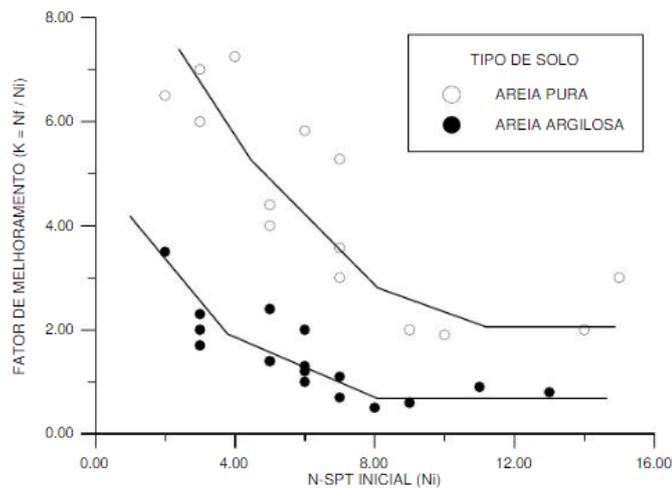
Fonte: GUSMÃO FILHO e Gusmão (2000)

Diversos pesquisadores têm mostrado que a presença de finos reduz sensivelmente a eficiência do melhoramento (MITCHELL, 1968; GUSMÃO FILHO e 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 as

vibrações horizontais induzidas, reduzindo bastante a eficiência do melhoramento, como pode ser observado na Figura 2.

Um outro fator importante na eficiência do melhoramento é a energia de compactação do equipamento. O aumento da energia 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 (PACHECO, 2002). Existe um limite de compactação, a partir do qual a energia não mais influencia o melhoramento.

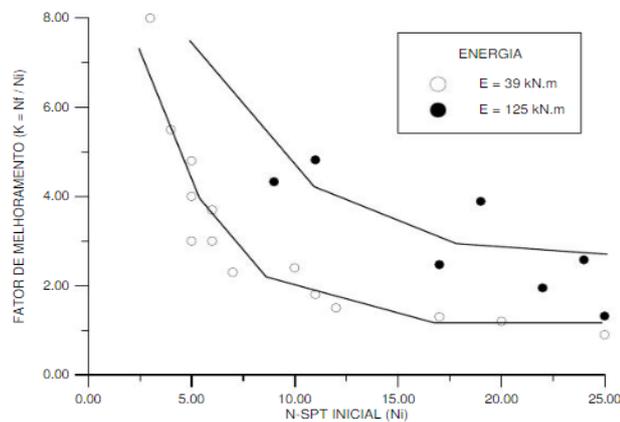
Figura 2 - Efeito da granulometria do solo no melhoramento



Fonte: GUSMÃO FILHO e GUSMÃO (2000).

A Figura 3 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.

Figura 3 - Efeito da energia de compactação no melhoramento.



Fonte: GUSMÃO FILHO e GUSMÃO (2000).

A Figura 4 mostra resultados de ensaios de SPT, realizados a diferentes distâncias de um grupo de estacas de compactação, com diâmetros de 300 mm. Verificou-se que 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.

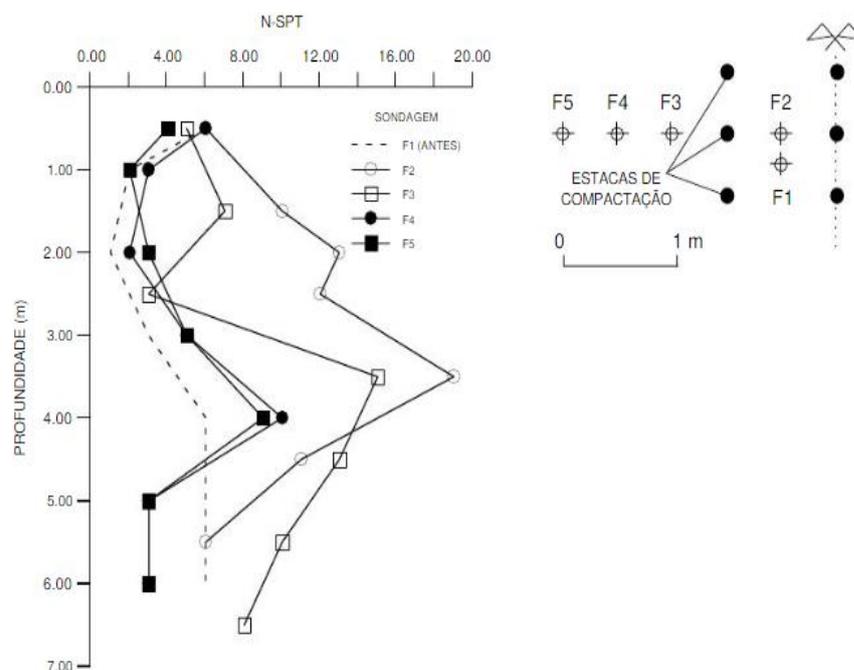
Mitchell (1968) propôs uma faixa granulométrica ideal para o melhoramento por vibração (percentagem de finos inferior a 20%).

Para compactação através de estacas de areia e brita, esta percentagem pode ser ainda maior, sem que seja diminuída a eficiência do melhoramento.

Em praticamente todas as obras, o melhoramento apresenta baixa eficiência até 1,5m de profundidade. Fato é explicado 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. Essas vibrações podem provocar danos nas obras vizinhas.

Figura 4 - Resultados de ensaios de SPT, realizados a diferentes distâncias de um grupo de estacas de compactação



Fonte: GUSMÃO FILHO e GUSMÃO (2000).

2.2 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 levar em conta os seguintes aspectos:

- 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 projetado 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 dimensionadas.
- O comprimento da estaca é função da variação da compacidade da camada (ou densidade relativa da areia), com a profundidade e da estrutura projetada.
- Mitchell (1968 apud GUSMÃO et al. 2005) propôs uma faixa ideal para o melhoramento por vibração caracterizada por uma percentagem de finos inferior a 20%. Sugere-se 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.
- 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, deve ser realizado o controle pelas sondagens a percussão. Com as sondagens antes e depois do melhoramento, estima-se a densidade relativa da areia em função do N_{SPT} obtido e da pressão vertical na cota do ensaio. Eventualmente, realizam-se provas de carga vertical à compressão em placas. Durante a construção do prédio, deve ser realizado o monitoramento dos recalques.

Para realização do projeto em estacas de argamassa, devem ser consideradas as seguintes operações:

- O estaqueamento projetado abaixo de uma sapata, com espaçamento menor que duas vezes e meia o diâmetro, trabalha em grupo, devendo ser considerado em conjunto como bloco ou tubulão equivalente, com transferência de carga para a camada de base das estacas.
- A carga na estaca depende do espaçamento entre as estacas e da tensão admissível da sapata, que leva à determinação da pressão máxima a ser transmitida pela sapata.
- O espaçamento das estacas define a geometria da sapata, a qual deve ter todas as estacas contidas na sua projeção, transmitindo uma tensão total menor do que a admissível do solo.

De acordo com Soares (2003), o porte do prédio é fator determinante para prever a tensão admissível necessária para viabilizar as sapatas. Sugere ainda para a obtenção da tensão admissível requerida algumas constantes.

De posse da tensão admissível necessária após a compactação, e de características como o material a ser utilizado nas estacas, diâmetro, espaçamento entre as estacas, determina-se o comprimento da estaca (H), através da sondagem à percussão. 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 $3,50 \leq H \leq 5,00$, pois para essas profundidades o melhoramento torna-se bastante vantajoso, principalmente no aspecto de custos. Para profundidades maiores, 8,0 m a 10,0 m, a mão-de-obra acaba por encarecer significativamente, sendo preferível optar por fundações profundas.

2.3 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.

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

Onde: $\overline{N_{spt}}$ – Média aritmética simples dos valores de N_{spt} que se encontram dentro da influência do bulbo de tensões.

Para Teixeira (1996), a área de influência do bulbo de tensões equivale a duas vezes o valor da menor dimensão B da sapata.

2.4 Cálculo do recalque nas sapatas

Segundo Schmertmann (1978), a deformação vertical ε_s em solos arenosos pode ser obtida através da Equação 3.

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E_s} * I_s \quad (3)$$

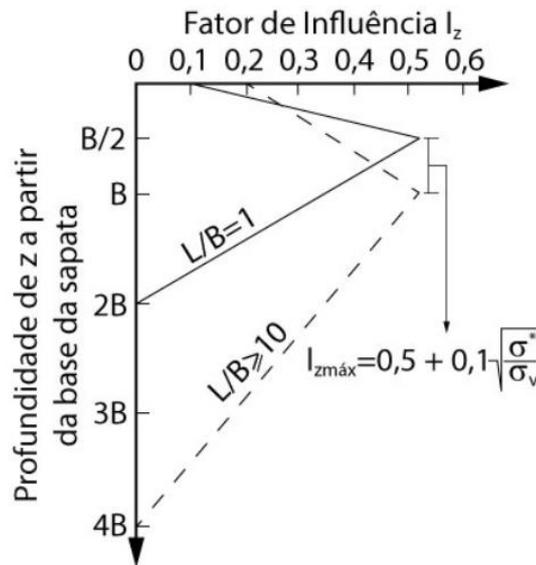
Onde: σ – Carregamento uniforme; I_s – Fator de influência obtido na deformação.

Para encontrar I_s deve-se utilizar o gráfico mostrado na Figura 5. O valor máximo do fator de influência é calculado a partir da Equação 4.

$$I_{zmax} = 0,5 + 0,1 * \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}} \quad (4)$$

Onde: 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} .

Figura 5 - Gráfico de Schmertmann usado para encontrar o fator de influência na deformação



Fonte: Schmertmann (1978)

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

$$E_s = \alpha * K * Nspt_{camada} \quad (5)$$

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

Existem ainda duas constantes que se fazem necessárias no método de Schmertmann (1978), são elas: C_1 e C_2 , que representam, respectivamente, o efeito de embutimento da fundação e do tempo. Essas duas constantes são calculadas através das Equações 6 e 7.

$$C_1 = 1 - 0,5 * \frac{q}{\sigma^*} \quad (6)$$

$$C_2 = 1 + 0,2 * \log\left(\frac{t}{0,1}\right) \quad (7)$$

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

Dessa forma, tendo posse dos valores abordados acima, segundo Schmertmann (1978), pode-se calcular o recalque da sapata (ρ) através da Equação 8.

$$\rho = C_1 * C_2 * \sigma^* * \sum \frac{I_z}{E_s} * \Delta Z \quad (8)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Características da obra

A obra estudada 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, estado de Pernambuco, conforme mostrado no Figura 6.

Figura 6 - Localização da Obra



Fonte: O autor (2022)

Foram realizados um total de 23 sondagens SPT, 15 antes e 8 após o melhoramento. Na Figura 8 encontra-se o projeto de melhoramento do solo para os blocos A e B. De forma semelhante, na Figura 9 encontra-se o projeto de melhoramento do solo para os blocos C e D.

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.

As sondagens SP-001, SP-002 e SP-003 foram utilizadas para a determinação da capacidade de carga das estacas, contendo a seguinte classificação do solo nas camadas: Solo 1 (Silte argilo - arenoso), Solo 2 (Areia fina ou média siltosa), Solo 3 (Areia fina clara medianamente compacta), conforme a Figura 10.

Na área compactada, foram executadas 556 estacas de argamassa. O traço, dado em projeto foi de 1 (cimento): 6 (areia): 3 (brita 38mm), com diâmetro 280 milímetros, e profundidade entre 4 e 5 metros. A execução foi pelo método de vibro-deslocamento. A Figura 7 mostra o momento de execução de uma das estacas para o melhoramento do solo

Figura 7 – Execução de uma das estacas de argamassa dos Blocos A e B



Fonte: Autor (2022)

Figura 8 - Projeto de melhoria do solo para o Bloco B

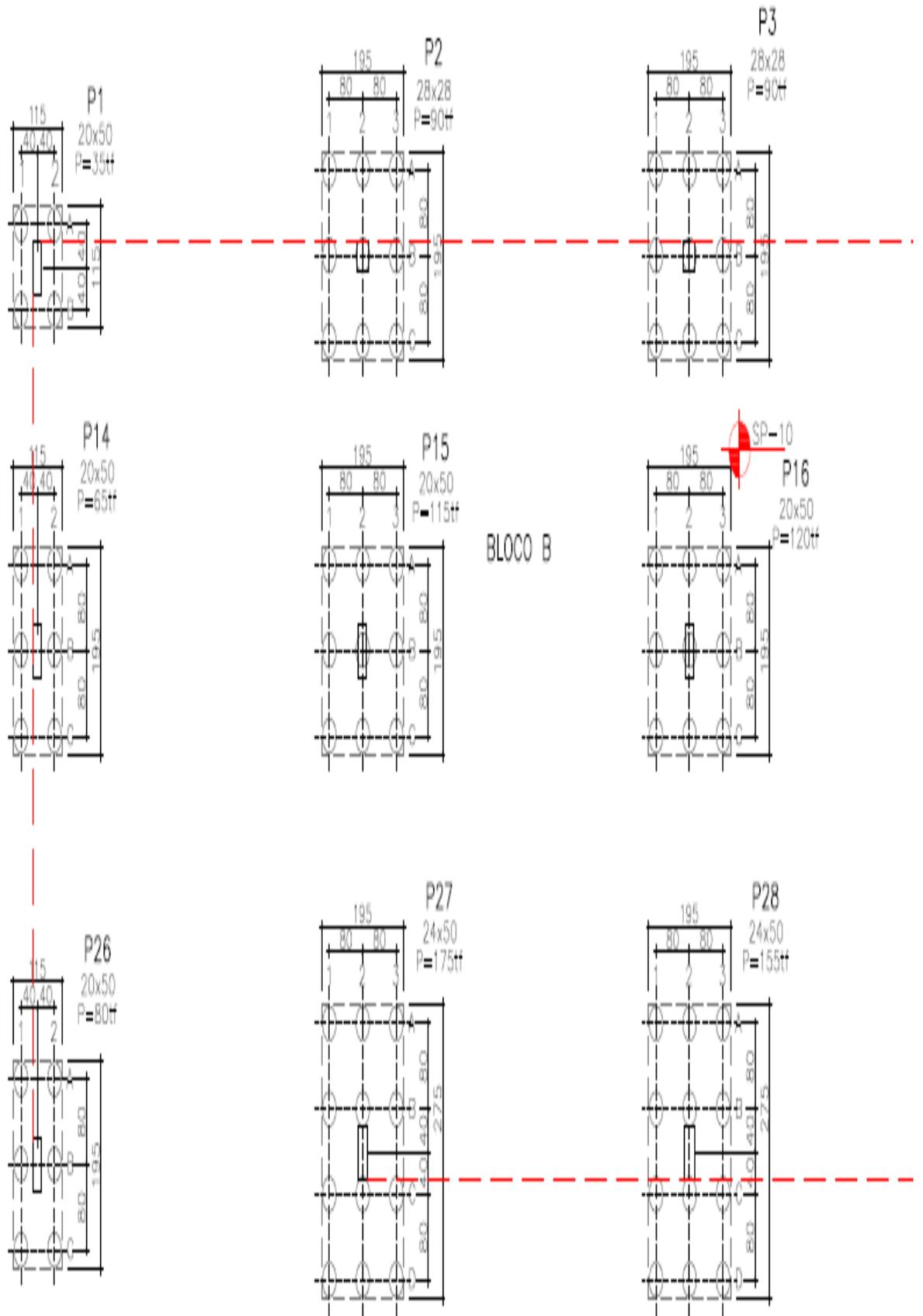


Figura 9 - Projeto de melhoria do solo para o Bloco D

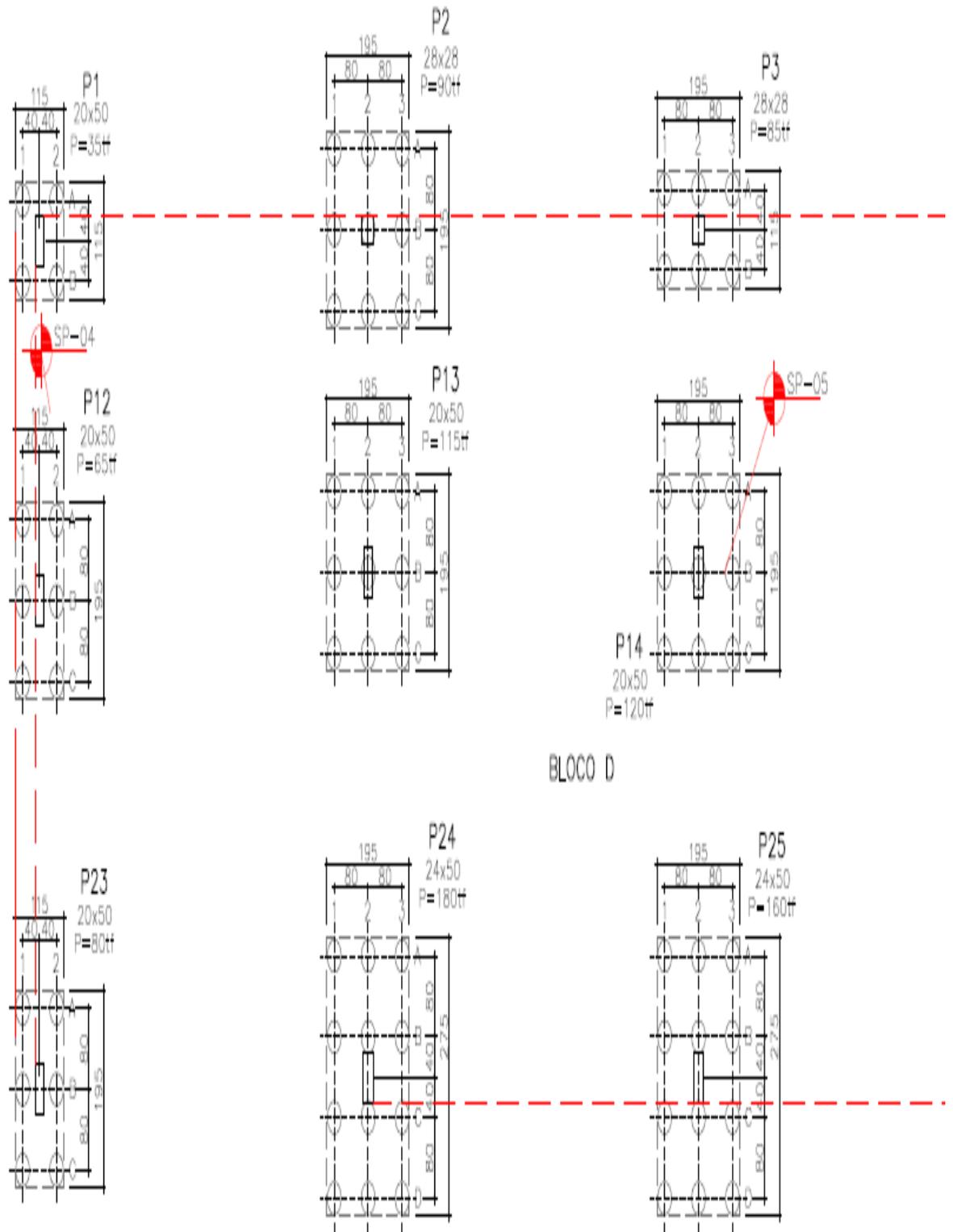
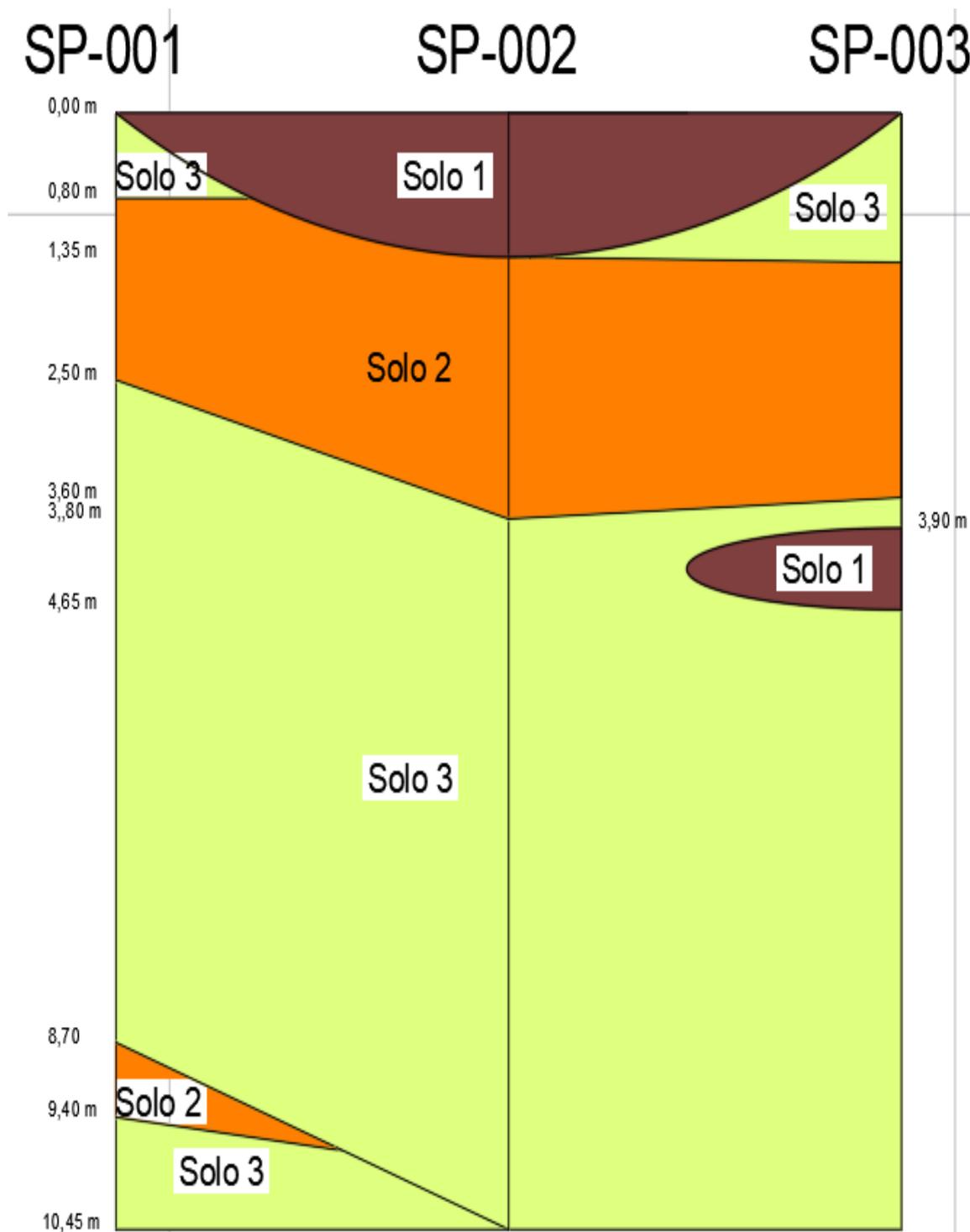


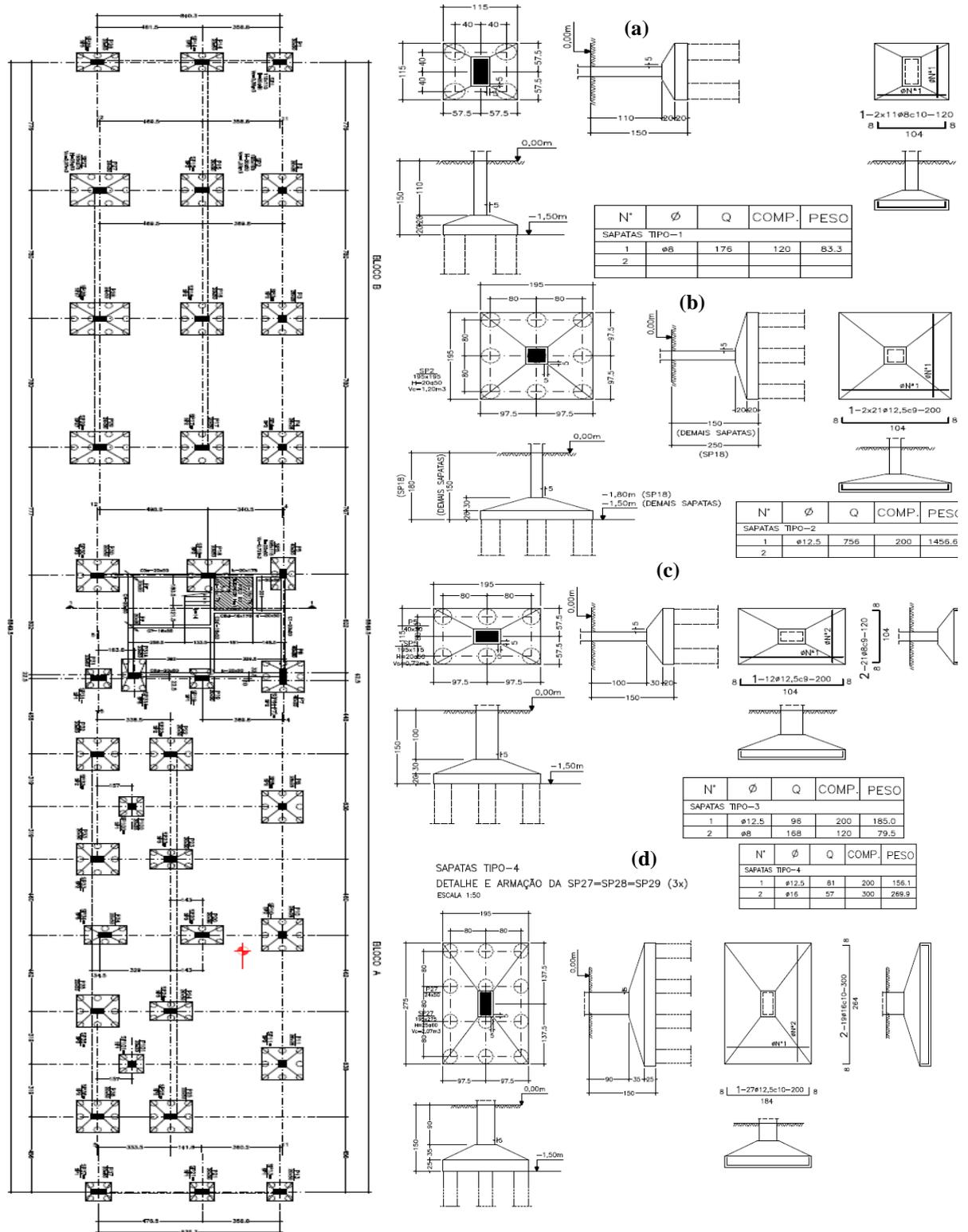
Figura 10 - Perfil estratigráfico típico do solo



Fonte: O autor (2022)

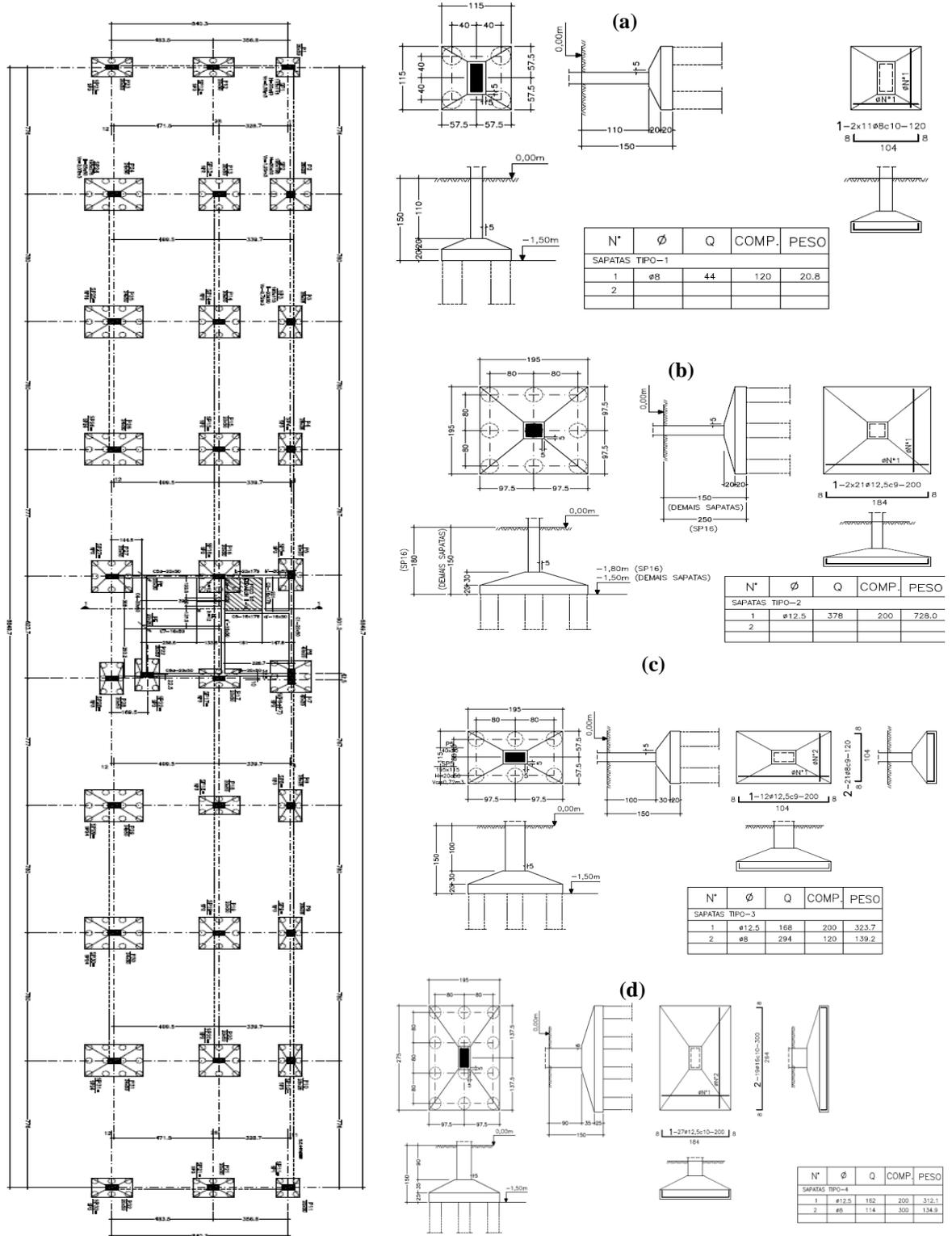
As Figuras 11 a 12 mostram a fundação dos Blocos A, B, C, D, detalhando a armação das sapatas Tipo -1, Tipo -2, Tipo -3 e Tipo -4. No total, o projeto indica para o empreendimento, 10 sapatas Tipo -1, 27 sapatas Tipo -2, 22 sapatas tipo Tipo -3 e 9 sapatas Tipo -4.

Figura 11 - Fundação dos Blocos A e B e detalhe e armação das sapatas: (a) Tipo – 1: SP1, SP13, SP19, SP21, SP31, SP100, SP101, SP37 (8x); (b) Tipo – 2: SP27, SP28, SP29 (3x); (c) Sapatas Tipo – 3: SP5, SP14, SP20, SP23, SP24, SP26, SP31A, SP34 (8x); (d) Tipo – 4: SP27, SP28, SP29 (3x)



Fonte: Figueiroa (2021)

Figura 12 - Fundação dos Bolos C e D e detalhe e armação das sapatas: (a) Tipo – 1: SP1, SP11(2x); (b) Tipo – 2: SP2, SP13, SP14, SP15, SP16, SP19, SP20, SP27, S(P6+P7) (9x); (c) Sapatas Tipo – 3: SP3, SP4, SP5, SP8, SP9, SP10, SP12, SP17, SP18, SP21, SP22, SP23, SP28, SP32 (14x); (d) Tipo – 4: SP24, SP25, SP26, SP29, SP30, SP31 (6x)



Fonte: Figueiroa (2021)

3.2 Metodologia

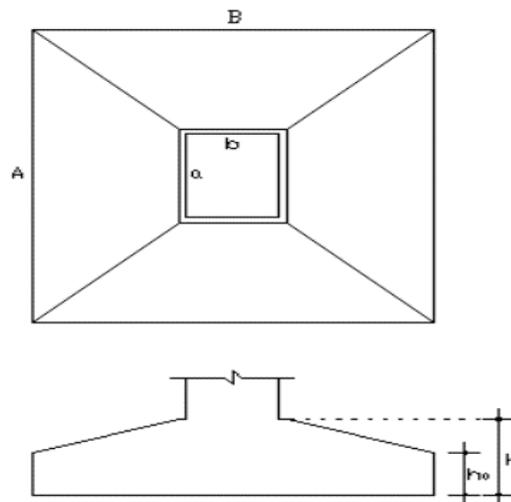
Os estudos consistiram nas seguintes etapas:

- Analisar as sondagens SPTs e realizar o cálculo do fator de melhoramento do solo (SPT antes e SPT depois do melhoramento).
- Estimativa da capacidade de carga do solo após o melhoramento e comparar com a capacidade de carga do solo antes do melhoramento.
- Estimativa do recalque do solo após o melhoramento e comparar com a capacidade de carga do solo antes do melhoramento.
- Elaboração de um comparativo de custo das fundações projetadas com e sem melhoramento.

3.2.1 Cálculo do volume das sapatas

As sapatas executadas na obra têm o formato mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Geometria das sapatas executadas



Fonte: Autor (2022)

O volume empregado de concreto armado nas sapatas será igual ao volume da própria sapata. Para cálculo desse volume V_s utilizou-se a Equação 9.

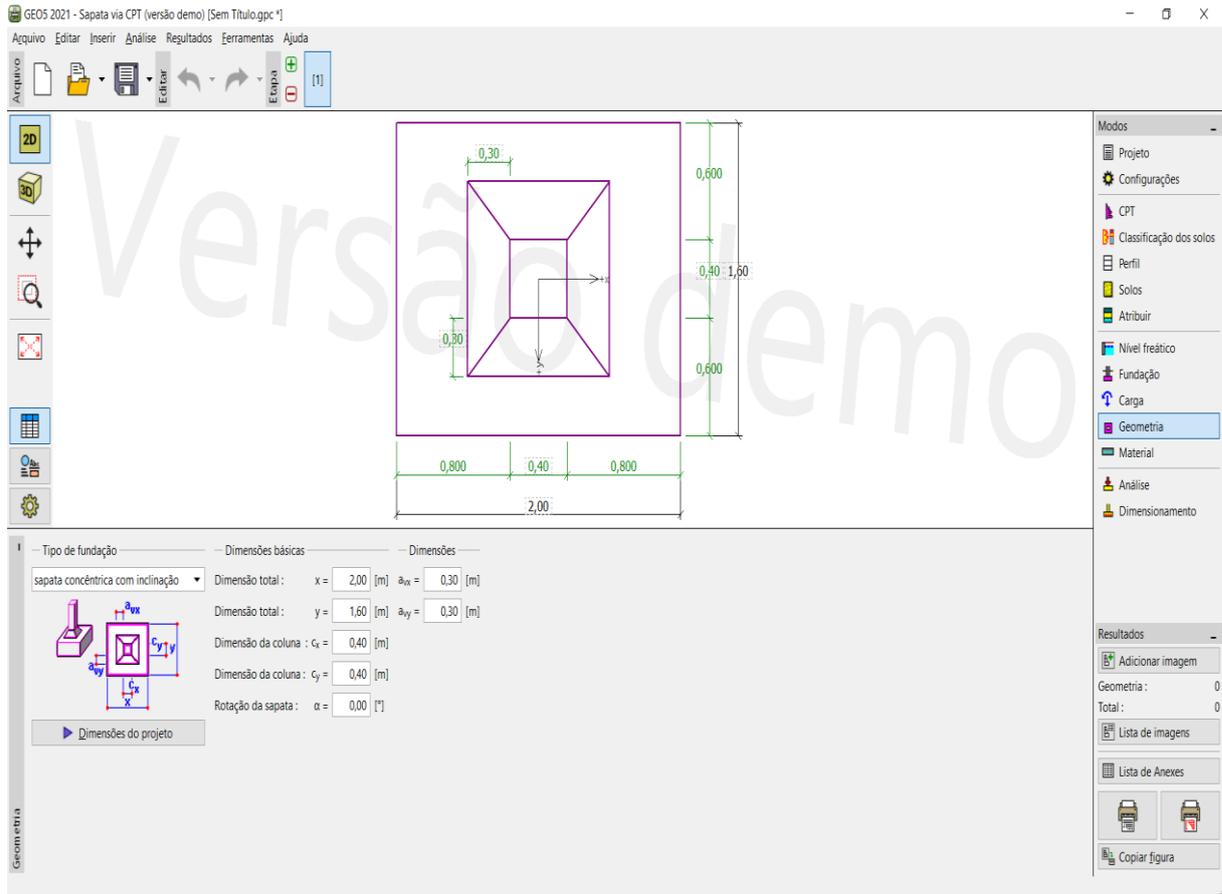
$$V_s = \frac{h-h_0}{3} x (A x B + a * b + \sqrt{A * B * a * b}) + (A * B * h_0) \quad (9)$$

Onde: V_s – Volume da sapata; A,B,a,b,h e h_0 são as dimensões mostradas na Figura 13.

3.2.2 Dimensionamento das sapatas sem o melhoramento

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, mostrado na Figura 14, e os valores de resistência de ponta, oriundos de um possível ensaio de CPT do solo.

Figura 14 - Interface do programa GEO 5



Fonte: Autor (2022)

Para obter-se as 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 de uma constante K_c , conforme mostra a Equação 10.

$$\frac{q_c}{N_{SPT}} = K_c \quad (10)$$

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, 1970).

3.2.3 Preço dos materiais e insumos

Para o cálculo da estimativa de custo das fundações e do melhoramento do solo foram usados os preços fornecidos pela SINAPI 04/2022 não desonerada para o estado de Pernambuco. As Tabelas 1 e 2 mostram os itens e insumos utilizados.

Tabela 1 - Itens retirados da tabela de custos SINAPI 04/2022 (Pernambuco) não desonerada

Código	Descrição	Unidade	Custo
95952	Execução de estruturas de concreto armado m ³ Convencional, para edificação habitacional multifamiliar (prédio)	m ³	R\$ 2.326,16

Fonte: SINAPI (2022)

Tabela 2 - Itens retirados da tabela de insumos SINAPI 04/2022 (Pernambuco) não desonerada

Código	Descrição	Unidade	Custo
00001379	Cimento portland composto CP II-32	m ³	R\$ 720,00
00000366	Areia fina - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida)	m ³	R\$ 115,00
00004727	Pedra britada nº 5 posto pedreira/fornecedor	m ³	R\$ 71,64

Fonte: SINAPI (2022)

3.2.4 Estimativa de preço unitário do traço de argamassa usado no melhoramento do solo

Para estimar o valor do traço de argamassa v usado no melhoramento do solo foi utilizada a Equação 11.

$$v = c + a + b \quad (11)$$

Onde: c (R\$/m³) – Custo de cimento por metro cúbico de argamassa, a (R\$/m³) – Custo de areia por metro cúbico de argamassa, b (R\$/m³) – Custo de brita por metro cúbico de argamassa.

O traço de argamassa é dado no modelo mostrado na Equação 12.

$$x \text{ (cimento)} : y \text{ (areia)} : z \text{ (brita)} \quad (12)$$

Os valores de c, a e b foram obtidos através das Equações 13, 14 e 15, respectivamente.

$$c = \frac{720,00 \cdot x}{x+y+z} \quad (13)$$

$$a = \frac{115,00*y}{x+y+z} \quad (14)$$

$$b = \frac{71,64*z}{x+y+z} \quad (15)$$

4 RESULTADOS

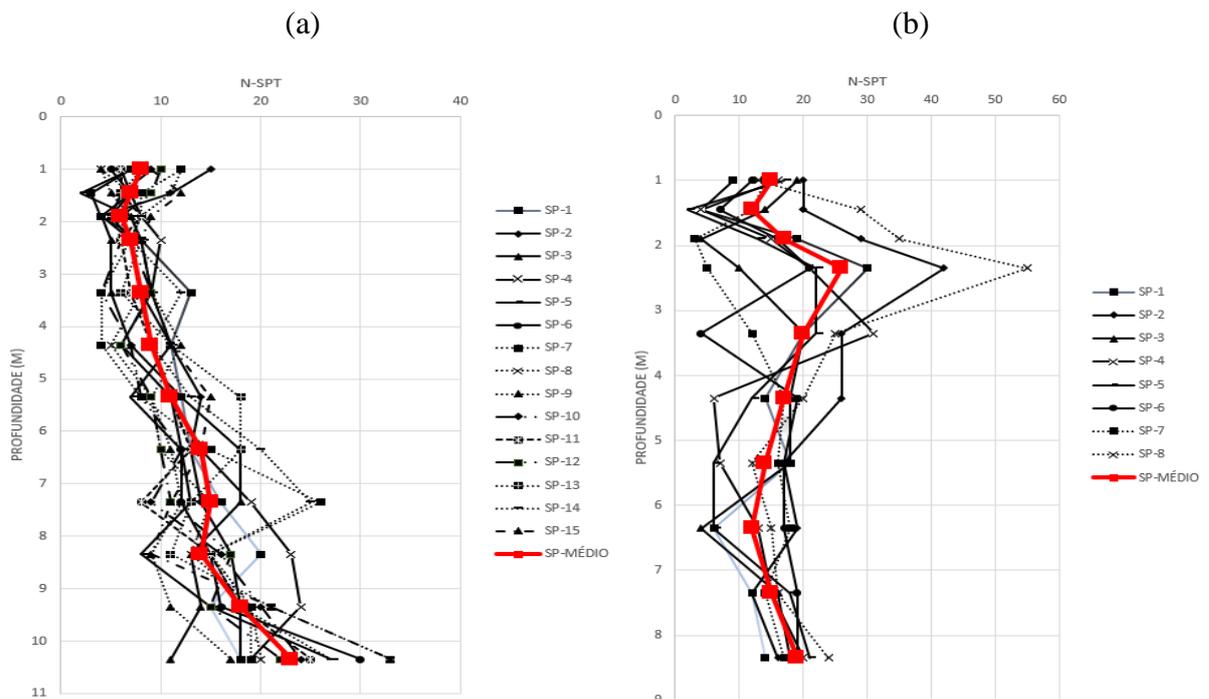
4.1 Fator melhoramento do solo

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 15a e 15b 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.

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.

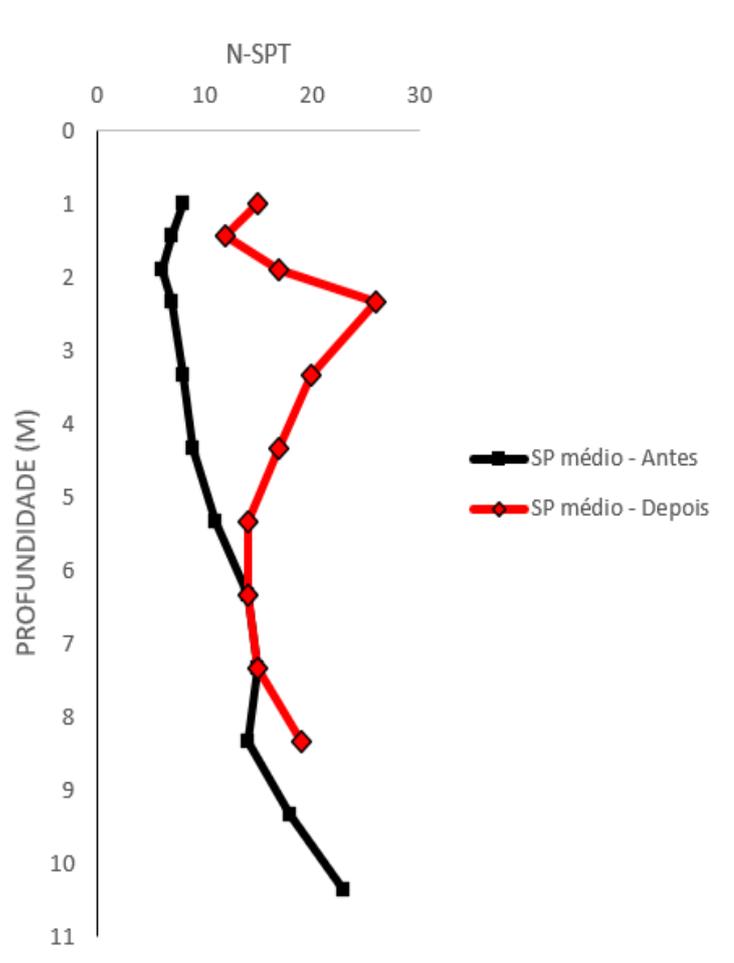
Figura 15 - Perfil N_{SPT} : (a) antes da compactação; (b) após a compactação.



Fonte: o Autor (2022)

A Figura 16 mostra os valores de N_{SPT} médios antes e depois do melhoramento. 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 compactidade 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.

Figura 16 - N_{SPT} 's médios antes e depois do melhoramento.



Fonte: o Autor (2022)

Na Tabela 3 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 compactidade, verifica-se a eficiência da técnica de melhoramento do solo, pois torna possível 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 compactidade de 3,71 vezes.

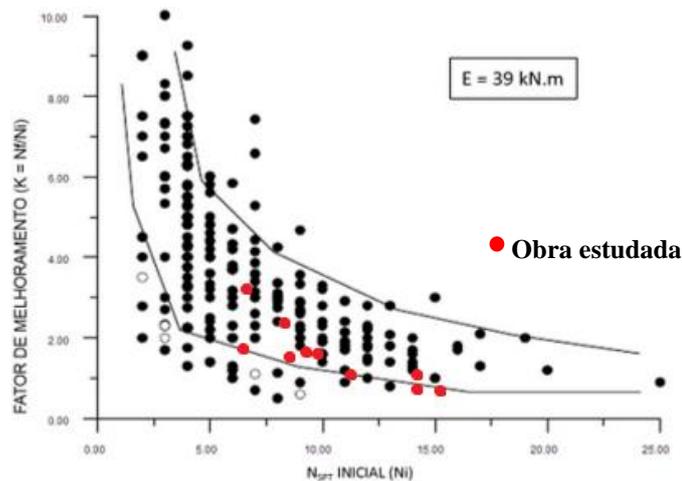
Tabela 3 - Valores de N_{SPT} médio antes e depois do melhoramento e o fator de melhoramento a cada profundidade.

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 encontrados por Gusmão e Gusmão Filho (2000) (Figura 17). 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.

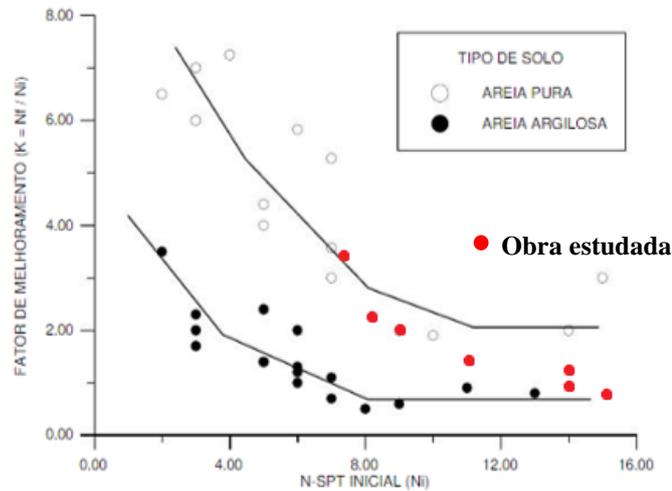
Figura 17 - Efeito da compactação inicial do solo no melhoramento com pontos da obra estudada



Fonte: o Autor (2022) adaptado de Gusmão Filho e Gusmão (2000)

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). A Figura 18 mostra em vermelho os resultados do melhoramento entre as cotas em que foram encontradas areias.

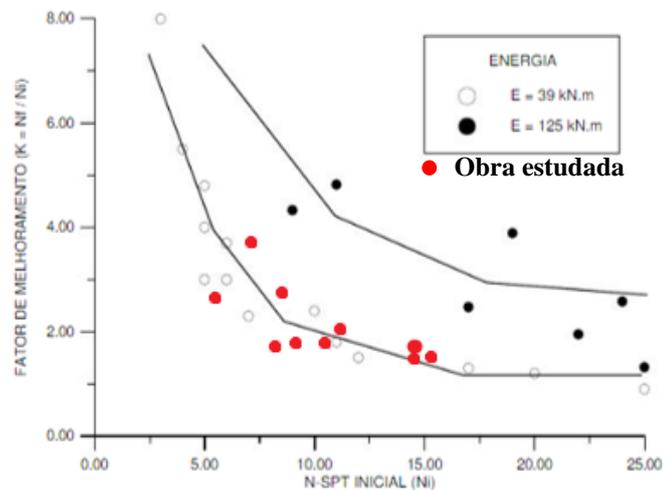
Figura 18 - Efeito da granulometria do solo no melhoramento com pontos da obra estudada



Fonte: Autor (2022) adaptado de Gusmão e Gusmão Filho (2000)

A energia de compactação prevista no projeto de melhoramento foi de **54 kn * m**. Analisando a Figura 19, notou-se que os valores encontrados para essa energia de compactação são similares aos dados coletados por Gusmão e Gusmão Filho (2000).

Figura 19 - Efeito da energia de compactação no melhoramento com pontos da obra estudada



Fonte: Autor (2022) adaptado Gusmão e Gusmão Filho (2000)

4.2 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. A Tabela 4 mostra a comparação entre os resultados da capacidade de carga do solo com e sem o melhoramento. Observam-se aumentos entre 96,4% e 166,7% nos valores de capacidade de carga do solo.

Tabela 4 - 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: Autor (2022)

4.3 Estimativa de recalque após o melhoramento

Aplicando o método de Schmertmann obteve-se os valores de recalque para os 4 tipos de fundação encontrados no projeto de fundação (Tabela 5). Foram utilizados os valores de N_{SPT} médios (Tabela 3) para o cálculo do recalque.

Tabela 5 – Comparação dos recalques 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: Autor (2022)

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. Portanto, as estimativas de recalque encontradas são para 6 meses após a execução da obra.

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.

4.4 Comparativo de custo das fundações projetadas com e sem melhoramento

As dimensões das sapatas executadas após o melhoramento foram as mostradas nas figuras 11(a), 11(b), 11(c), 11(d), 12(a), 12(b), 12(c) e 12(d). Por outro lado, as dimensões das sapatas que seriam executadas caso não houvesse melhoramento do solo foram calculadas utilizando o software GEO5.

Conforme explicado no tópico 3.2.2, esse software necessita dos valores de resistência de ponta, de um possível ensaio de CPT. Esses valores foram estimados utilizando a metodologia de Schmertmann (1970), a partir dos valores de N_{SPT} médios antes do melhoramento mostrados na Tabela 3. Os valores estimados de resistência de ponta são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de resistência de ponta médios

Profundidade (m)	Resistência de ponta
1	3,288
1,45	2,877
1,9	2,466
2,35	2,877
3,35	3,288
4,35	3,699
5,35	4,521
6,35	5,754
7,35	6,165
8,35	5,754
9,35	7,398
10,35	9,361
15	10,1963

Fonte: Autor (2022)

De posse das 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. As Tabelas 7 e 8 mostram as dimensões e o volume de concreto armado necessário para cada tipo de sapata, com e sem melhoramento do solo, respectivamente.

Fica evidente 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 9 compara, em termos de volume concreto armado, as sapatas com e sem melhoramento do solo.

Tabela 7 - Dimensões e volume de concreto armado para sapatas com melhoramento do solo

Sapatas	Dimensões (m)						Profundidade	Volume de concreto de cada sapata (m ³)
	A	B	a	b	H ₀	H		
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

Fonte: Autor (2022)

Tabela 8 - Dimensões e volume de concreto armado para sapatas sem melhoramento do solo

Sapatas	Dimensões (m)						Profundidade	Volume de concreto de cada sapata (m ³)
	A	B	a	b	H ₀	H		
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: Autor (2022)

Tabela 9 - Comparativo do volume de concreto armado nas sapatas com e sem melhoramento de solo

Sapatas	Quantidade de sapatas em projeto	Volume de concreto armado sem o melhoramento (m ³)		Volume de concreto armado com o melhoramento (m ³)		Economia (m ³)		
		Por sapata	Total de cada tipo de sapata	Por sapata	Total de cada tipo de sapata	Para cada tipo de sapata	Total para cada tipo de sapata	%
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 da obra			119,19		70,89		48,29	40,51

Fonte: Autor (2022)

Conforme a Tabela 9, houve uma diminuição significativa do volume de concreto armado utilizado. Em porcentagem, a redução de volume de concreto armado foi de, no mínimo 22,52%, chegando até a economia de 52% no volume de concreto armado que seria utilizado. De forma geral, a economia global, em termos de concreto armado, foi de 40,51%, ou seja, foram utilizados 48,29 m³ de concreto armado a menos.

A Tabela 10 mostra um comparativo entre as sapatas com e sem melhoramento de solo em termos de custos. Conforme observado, a economia global em termos de concreto armado foi de R\$ 112.332,00.

Tabela 10 - Comparativo de custos entre as fundações com e sem melhoramento

Custo do concreto armado (R\$/m ³) - SINAPI 04/2022	Volume de concreto armado total para a fundação da obra sem melhoramento (m ³)	Volume de concreto armado total para a fundação da obra com melhoramento (m ³)	Custo total de concreto armado sem melhoramento (R\$)	Custo total de concreto armado com melhoramento (R\$)	Economia (R\$)
2326,16	119,19	70,89	277.244,81	164.912,58	112.332,23

Fonte: Autor (2022)

Para verificar a viabilidade do melhoramento de solo, ou seja, analisar se foi vantajoso economicamente ou não, é necessário o cálculo do custo do melhoramento. A Tabela 11 mostra os custos envolvidos apenas com a argamassa usada no melhoramento. O traço da argamassa e o volume total de argamassa foram obtidos no projeto de melhoramento (Figuras 8 e 9).

Foi observado que o custo apenas com argamassa para realizar o melhoramento foi de R\$ 25.021,02. Além dos custos com argamassa, ainda houve o custo com a máquina utilizada para a realização do melhoramento. Segundo o dono da construtora, o custo com a máquina totalizou 8 mil reais. A Tabela 12 mostra o custo total estimado do melhoramento do solo, que foi de R\$ 33.021,02.

Tabela 11 - Gasto com argamassa no melhoramento

Materiais	Custo (R\$/m ³)	Custo do traço 1:6:3 (R\$/m ³)	Volume de argamassa dado em projeto (m ³)	Custo total com argamassa no melhoramento (R\$)
Cimento – SINAPI 04/2022	720			
Areia – SINAPI 04/2022	115	162,492	153,98	25021,02
Brita – SINAPI 04/2022	71,64			

Fonte: Autor (2022)

Tabela 12 - Custo total do melhoramento do solo

Argamassa 1:6:3	25021,02
Máquina utilizada	8000
Total	33021,02

Autor: Fonte (2022)

A Tabela 13 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. Conforme visto houve uma economia significativa no custo final da fundação. Mesmo com o gasto envolvido no melhoramento do solo, houve economia de R\$ 79.311,21. Esse comparativo deixou claro a viabilidade econômica e o efeito positivo que teve o melhoramento de solo na execução da obra em estudo.

Tabela 13: Comparativo entre o custo final da fundação da obra com e sem melhoramento

Custo da obra de fundação sem o melhoramento em termos de volume de concreto armado (R\$)	Custo da obra de fundação com melhoramento em termos de volume de concreto armado somado ao valor do melhoramento do solo (R\$)	Economia Obtida	
		R\$	%
277244,8185	197933,60	79311,21	28,61

Fonte: Autor (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 de k foram maiores que 1 em praticamente todas as profundidades. Por tratar-se de solos de baixa compactidade, verifica-se a eficiência da técnica de melhoramento do solo. Os maiores valores foram encontrados no trecho entre 1,9 m e 3,35m, chegando a um aumento de compactidade 3,71 vezes.

Observou-se um aumento de 96,4% e 166,7% nos valores de capacidade de carga do solo com a realização da técnica de melhoramento por estacas de compactação.

Após o melhoramento do solo, 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. Portanto, o melhoramento do solo foi bastante positivo para a obra, trazendo vantagens estruturais e econômicas para a edificação.

REFERÊNCIAS

AMORIM, M. D et al. Plate Load Tests on Improved Ground with Construction and Demolition Wastes Compaction Piles. In: 5TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS' CONFERENCE. Proceedings... Paris, 2013. p. 69-72.

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.

FIGUEIROA, H. (2021). Projeto de fundações

GARCIA, J. R., Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas. 2015. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2015.

GUSMÃO, A.D. et al. Geotecnia no Nordeste. Recife, PE: Editora Universitária, 2005.

GUSMÃO FILHO, J. A. Fundações do conhecimento geológico à prática de engenharia. Ed. Universitária, da UFPE, Recife, 1998.

GUSMÃO FILHO, J. A. Fundações de Pontes. Ed. Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

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. Anais..., São Paulo, 2012.

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

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.

RICARDO SÉRGIO MACÊDO TABOSA FILHO

**MELHORAMENTO DE SOLO ARENOSO POR ESTACAS DE ARGAMASSA: UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por vídeoconferência

Área de concentração: Geotecnia

Aprovado em 27 de maio de 2022.

Prof. Dra. Sc. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)
Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Sc. Débora Cristina Almeida de Assis (Avaliadora)
Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M. Sc. Lutemberg Ferreira de Araújo (Avaliador)
Universidade Maurício de Nassau (UNINASSAU)