DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/10

Análise de Parâmetros de Execução e Resistência em Estacas Pré-Moldadas: um Estudo de Caso de Obra de Fundação Profunda na Cidade do Recife-PE

Giovana Lúcia Neves Pereira
Docente. Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco - UPE, Recife, Brasil, giovana_nevesp14@gmail.com

Pedro Eugênio Silva de Oliveira
Professor Doutor, Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco - UPE, Recife, Brasil, pedro.oliveira@poli.br

Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Professor Doutor, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, jtrdo@uol.com.br

RESUMO: A cidade do Recife apresenta condições geotécnicas complexas devido à presença de argilas moles e solos altamente compressíveis, típicos de sua formação flúvio-marinha, o que impõe desafios significativos às fundações profundas. Este trabalho analisa o comportamento executivo de estacas pré-moldadas de concreto em solo mole, enfatizando a influência da investigação geotécnica e do monitoramento dinâmico no desempenho das fundações. O estudo tomou como base um empreendimento real que passou por três campanhas de sondagem ao longo de quatro meses, resultando em revisões do projeto devido à insuficiência inicial de dados. A metodologia envolveu visitas de campo, análise de boletins de obra, uso do software para modelagem tridimensional do terreno e interpretação de parâmetros executivos como energia de cravação, nega e repique. Foram analisadas 27 estacas quanto à energia mobilizada, utilizandos os perfis de N_{SPT} dos furos SP01, SP02 e SP03a, e executados ensaios de carregamento dinâmico (PDA) nas estacas E20 e E40, permitindo comparações entre resistência lateral, energia aplicada e comportamento previsto pelas sondagens. Os resultados mostraram convergência significativa entre os perfis de energia, N_{SPT} e PDA, indicando consistência entre o comportamento real e a estratigrafia do subsolo. A ausência de investigação adequada na fase inicial resultou em retrabalhos, reformulação do projeto de fundação — reduzido de 63 para 41 estacas — e atraso aproximado de quatro meses na execução. O uso do método observacional foi essencial para ajustes de profundidade e validação dos parâmetros de resistência. Conclui-se que o conhecimento detalhado do subsolo, aliado ao controle dinâmico e à modelagem 3D, é fundamental para decisões seguras, evitando atrasos e garantindo confiabilidade em obras de fundações em solos moles.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Profundas, Solos Moles, Estacas Pré-Moldadas, Método Observacional, Ensaio de Carregamento Dinâmico.

ABSTRACT: The city of Recife has complex geotechnical conditions due to the presence of soft clays and highly compressible soils, typical of its fluvial-marine formation, which poses significant challenges for deep foundations. This study analyzes the performance of precast concrete piles in soft soil, emphasizing the influence of geotechnical investigation and dynamic monitoring on foundation performance. The study was based on a real project that underwent three drilling campaigns over four months, resulting in design revisions due to initial data insufficiency. The methodology involved field visits, analysis of construction reports, use of software for three-dimensional terrain modeling, and interpretation of performance parameters such as driving energy, refusal, and rebound. Twenty-seven piles were analyzed for mobilized energy, using the N_{SPT} profiles of holes SP01, SP02, and SP03a, and dynamic load tests (PDA) were performed on piles E20 and E40, allowing comparisons between lateral resistance, applied energy, and behavior predicted by the surveys. The results showed significant convergence between the energy, N_{SPT}, and PDA profiles, indicating consistency between actual behavior and subsoil stratigraphy. The lack of adequate investigation in the initial phase resulted in rework, redesign of the foundation—reduced from 63 to 41 piles—and a delay of approximately four months

in execution. The use of the observational method was essential for depth adjustments and validation of resistance parameters. It is concluded that detailed knowledge of the subsoil, combined with dynamic control and 3D modeling, is fundamental for safe decisions, avoiding delays and ensuring reliability in foundation works in soft soils.

KEYWORDS: Deep Foundations, Soft Soils, Precast Piles, Observational Method, Dynamic Load Test.

1 INTRODUÇÃO

O solo, embora seja objeto de estudo de diferentes áreas do conhecimento, assume significados específicos conforme o contexto em que é analisado. Na engenharia civil, especialmente na geotecnia, ele pode ser compreendido como o terreno de fundação, responsável por receber e transmitir ao maciço as cargas provenientes da estrutura (Oliveira, 2018). Considerando que uma edificação é composta por superestrutura, infraestrutura e terreno de fundação, a interação solo-estrutura torna-se determinante na definição do sistema de fundação, devendo compatibilizar as exigências estruturais com as características geológicas e geotécnicas do terreno (Gusmão, 2005; Terzaghi et al., 1996). Entretanto, a grande variabilidade natural dos solos e as limitações das investigações geotécnicas tornam a estimativa de seus parâmetros um dos principais desafios da engenharia de fundações (Cabette, 2014).

Esse cenário é particularmente evidente na cidade do Recife-PE, situada em uma planície flúvio-marinha formada por depósitos sedimentares recentes, composta por camadas de areias finas, siltes, turfas e extensas argilas moles saturadas (Gusmão Filho, 1998; Oliveira et al., 2016). Tais condições geotécnicas, associadas ao processo de verticalização urbana, levaram à consolidação do uso de fundações profundas na região, uma vez que as camadas superficiais frequentemente apresentam baixa capacidade de suporte e elevada compressibilidade. Entre as soluções adotadas, destacam-se as estacas pré-moldadas de concreto, amplamente utilizadas em obras urbanas devido à elevada capacidade de carga, ao controle de qualidade associado à fabricação industrial e à durabilidade do material (Alonso, 2019).

A execução dessas estacas permite ainda o acompanhamento do processo de cravação por meio de parâmetros dinâmicos, como nega, repique e energia de cravação, que fornecem indicativos sobre a mobilização da resistência do sistema estaca-solo (Cintra et al., 2013). Esse controle pode ser complementado por ensaios instrumentados, como o ensaio de carregamento dinâmico realizado com o equipamento *Pile Driving Analyzer* (PDA), baseada na teoria da propagação de ondas, permitindo estimar a capacidade de carga mobilizada, avaliar tensões atuantes e verificar a integridade estrutural da estaca (Cintra et al., 2013).

Nesse contexto, destaca-se o Método Observacional proposto por Terzaghi e sistematizado por Peck (1969), que considera que, em obras geotécnicas, os parâmetros obtidos em projeto representam hipóteses iniciais sujeitas à verificação durante a execução. A partir do monitoramento sistemático do comportamento do solo e da fundação, torna-se possível confirmar ou ajustar as premissas de projeto, permitindo intervenções quando necessário e aumentando a segurança do empreendimento (CIRIA, 1999). Assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento de uma fundação profunda executada com estacas pré-moldadas de concreto em solo mole na cidade do Recife-PE, a partir da interpretação de dados de acompanhamento de campo obtidos durante a execução da obra.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição a Obra e Levantamento e Dados

O estudo baseia-se na análise de uma edificação industrial de três pavimentos localizada no bairro de São José, no município do Recife–PE. A estrutura é composta predominantemente por elementos de concreto armado, organizados em sistema aporticado formado por pilares, vigas e lajes, distribuídos entre bloco de fundação, pavimento térreo, primeiro pavimento e coberta.

Em função das características estruturais do empreendimento e das condições geotécnicas típicas da planície recifense, foi adotado um sistema de fundações profundas em estacas pré-moldadas de concreto. A

análise desenvolvida concentra-se na avaliação dos parâmetros de execução dessas estacas e na interpretação de seu comportamento durante a fase executiva.

A caracterização geotécnica do terreno baseou-se em três campanhas de sondagens do tipo SPT realizadas entre dezembro de 2021 e fevereiro de 2022. Inicialmente foram executados dois furos (SP01 e SP02), que permitiram uma caracterização preliminar do subsolo, indicando a presença de aterro superficial, camadas arenosas com diferentes graus de compacidade e uma camada de argila orgânica muito mole, associada a baixos valores de resistência à penetração.

Com o objetivo de complementar as informações obtidas, foi executado um terceiro furo intermediário (SP03a). Entretanto, inconsistências nos resultados motivaram a realização de uma nova perfuração adjacente (SP03b), que atingiu aproximadamente 33 m de profundidade e possibilitou uma definição mais confiável da estratigrafia local.

2.2 Elaboração dos Perfis Geotécnicos

A partir dos resultados das sondagens, foram elaborados perfis geotécnicos representativos do terreno com o objetivo de interpretar a distribuição das camadas de solo e sua continuidade lateral. Inicialmente foi desenvolvido um perfil preliminar utilizando os furos SP01, SP02 e SP03a, o qual evidenciou inconsistências estratigráficas que justificaram a realização de novas investigações.

Com a substituição do furo SP03a pelo SP03b, foi possível elaborar um novo perfil geotécnico mais coerente com a realidade do subsolo, evidenciando a presença de camadas compressíveis espessas associadas a depósitos argilosos moles, intercaladas por camadas arenosas mais resistentes. Esse perfil serviu como base para o dimensionamento final das fundações do empreendimento. A Figura 1 demonstra essa comparação.

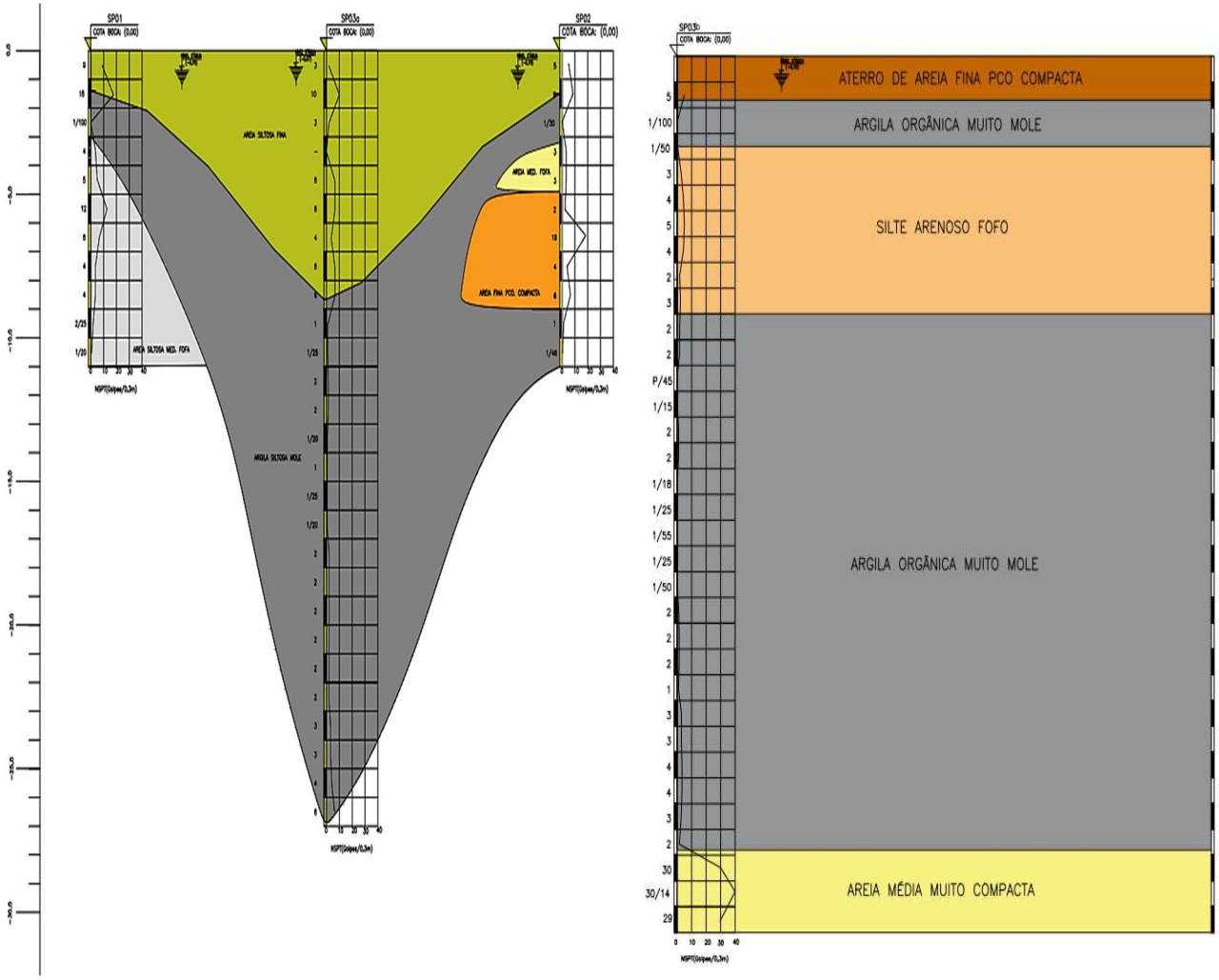


Figura 1. Comparativo entre os perfis de sondagem.

2.3 Definição e Evolução do Projeto de Fundações

O projeto de fundações evoluiu à medida que novas informações geotécnicas foram obtidas durante as campanhas de sondagem. A primeira proposta de fundação foi elaborada com base nas sondagens iniciais e previa a execução de 63 estacas pré-moldadas de diferentes seções. Com a execução da terceira campanha de sondagem e melhor definição das camadas resistentes do subsolo, o projeto foi revisado, resultando em uma solução mais racional e economicamente viável. A comparação entre as soluções adotadas no projeto inicial e no projeto revisado é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Comparativo entre os projetos de fundações.

PROJETO	ESTACA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO	NÚMERO DE ESTACAS	COTA DE PONTA (m)	COMPRIMENTO UNITÁRIO (m)	COMPRIMENTO TOTAL (m)
Projeto Inicial	26x26	6	-29	29	**174,00**
	EC-500	57	-29	29	**1.653,00**
Projeto Final	26x26	41	-32	32	**1.312,00**

A comparação entre as soluções evidencia a redução do número total de estacas de 63 para 41 unidades, todas com seção padronizada de 26 × 26 cm em concreto armado ou protendido. Essa padronização contribuiu para simplificar o processo executivo e otimizar os custos da obra.

Durante a execução das estacas, entretanto, observou-se que algumas unidades não atingiam a nega prevista na profundidade de projeto, exigindo cravações adicionais em determinados pontos do terreno. Após períodos de repouso, verificou-se aumento da resistência dinâmica, comportamento compatível com o fenômeno de set-up em solos argilosos moles.

2.4 Modelagem Tridimensional do Terreno

Com base nos dados das sondagens SP01, SP02 e SP03b, foi desenvolvido um modelo tridimensional do subsolo com o objetivo de representar espacialmente a variabilidade geotécnica identificada no local. A modelagem foi realizada por meio de técnicas de interpolação de dados geotécnicos, utilizando como variáveis de entrada as coordenadas das sondagens, os valores de N_{SPT} e as profundidades das camadas identificadas nos boletins de sondagem. O modelo tridimensional resultante é apresentado na Figura 2, permitindo visualizar a continuidade lateral das camadas e suas variações ao longo do terreno.

O modelo também serviu de base para a sobreposição das coordenadas das estacas executadas, possibilitando correlacionar os parâmetros executivos com as condições geotécnicas locais.

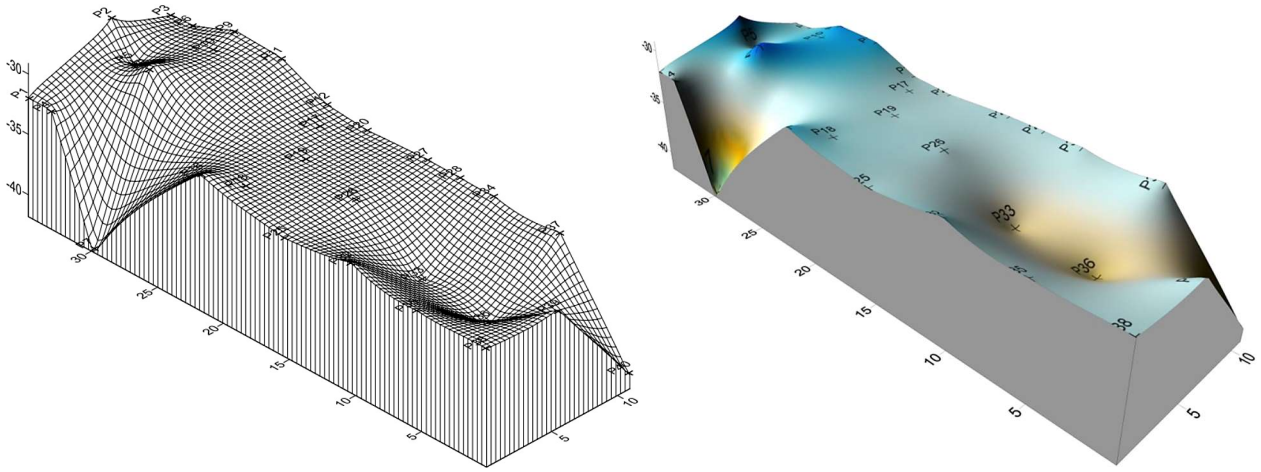


Figura 2. Modelagem tridimensional do perfil geotécnico.

2.5 Análise dos Parâmetros de Cravação e Controle de Execução

O controle executivo das estacas foi realizado por meio do registro sistemático dos parâmetros de cravação, incluindo comprimento final das estacas, valores de nega, repique e energia aplicada durante o processo. Essas informações foram registradas em planilhas de campo e posteriormente organizadas em banco de dados para análise. A energia de cravação foi calculada a partir da relação entre peso do martelo, altura de queda e número de golpes por metro cravado, permitindo a elaboração de diagramas de energia ao longo da profundidade. Esses diagramas possibilitaram identificar variações de resistência do solo e comparar o desempenho entre diferentes estacas.

Adicionalmente, foram realizados ensaios de carregamento dinâmico (PDA) em duas estacas selecionadas – denominadas neste estudo de E20 e E40, instrumentadas com acelerômetros e transdutores de deformação. Os dados obtidos foram processados pelo equipamento *Pile Driving Analyzer*, permitindo estimar a resistência mobilizada, as tensões atuantes e a energia efetivamente transmitida à estaca. A integração entre os registros de campo, os cálculos analíticos e os resultados instrumentados permitiu uma análise abrangente do comportamento das fundações durante a execução.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos tiveram como objetivo analisar o comportamento das estacas pré-moldadas durante a execução das fundações, correlacionando os parâmetros de cravação registrados em campo com as condições geotécnicas identificadas nas sondagens e no modelo tridimensional do terreno. A partir da sistematização dos registros de comprimento final, nega, repique e energia de cravação, buscou-se avaliar a coerência entre as previsões de projeto e o comportamento observado durante a execução.

3.1 Análise dos parâmetros de cravação

Os comprimentos finais de cravação variaram entre aproximadamente 29 m e 42 m, leituras possíveis através da Figura 3, sendo que a maior parte das estacas se estabilizou entre 30 m e 32 m, valores compatíveis com as profundidades definidas após a revisão do projeto de fundações. Destacam-se as estacas E7 e E40, que atingiram maiores profundidades, indicando ocorrência local de camadas mais compressíveis.

Os valores de nega, (Figura 4), variaram de 2 mm a 340 mm por golpe, refletindo a heterogeneidade do subsolo. Estacas com maiores valores de nega, como E40, E34 e E12, indicam mobilização rápida da resistência em camadas mais competentes. Em contrapartida, valores reduzidos sugerem a presença de solos mais compressíveis ou zonas de transição entre camadas de diferentes resistências

Os valores de repique, por sua vez (Figura 5), variaram entre 0,5 mm e 23 mm. Valores baixos indicam maior dissipação da energia aplicada, típica de solos mais deformáveis, enquanto repiques mais elevados sugerem resposta elástica associada a materiais mais rígidos. Em conjunto, os parâmetros analisados evidenciam comportamento compatível com a estratigrafia identificada nas sondagens, caracterizada por argilas moles intercaladas com camadas arenosas, típicas da planície sedimentar do Recife.

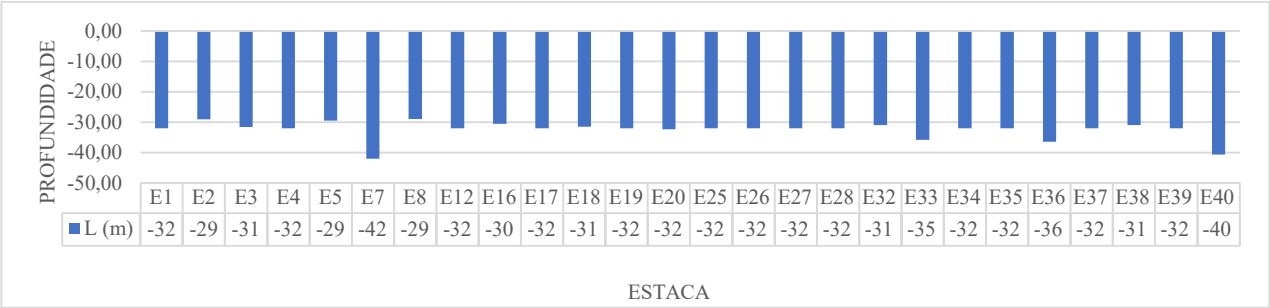


Figura 3. Comprimento final de cravação das estacas.

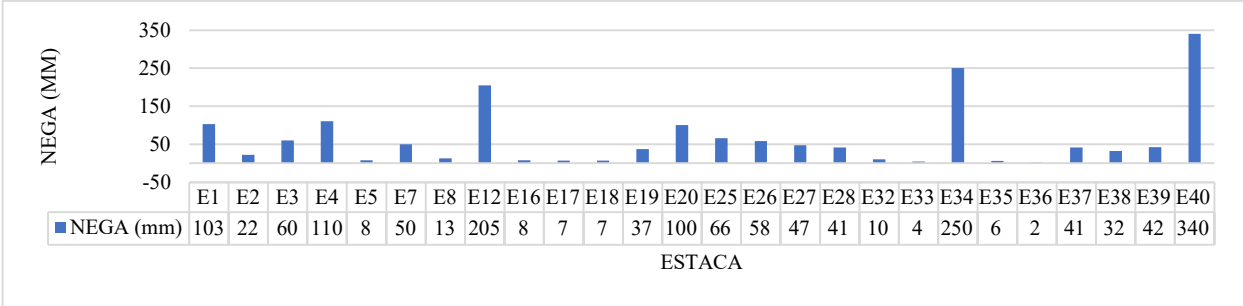


Figura 4. Variação dos valores de nega das estacas.

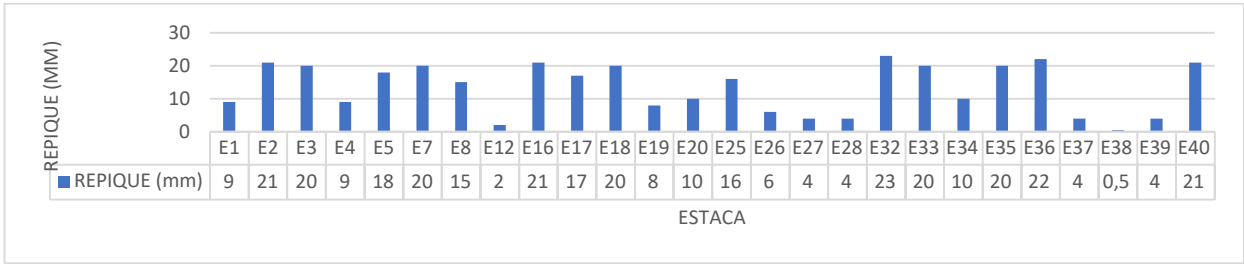


Figura 5. Variação dos valores de repique das estacas.

3.2 Comparação entre parâmetros de execução e investigação geotécnica

A análise espacial dos parâmetros de execução das estacas (Figura 6) evidenciou variações nos comprimentos de cravação e nos valores de nega e repique ao longo da área estudada. A comparação com o modelo tridimensional do terreno indica correlação entre as zonas de menor resistência do subsolo e as estacas que atingiram maiores profundidades. Mesmo diante da variabilidade geotécnica, os resultados mostraram coerência e confirmam a eficácia do controle executivo aliado ao método observacional, além de destacar a utilidade do modelo 3D como ferramenta de apoio à execução.

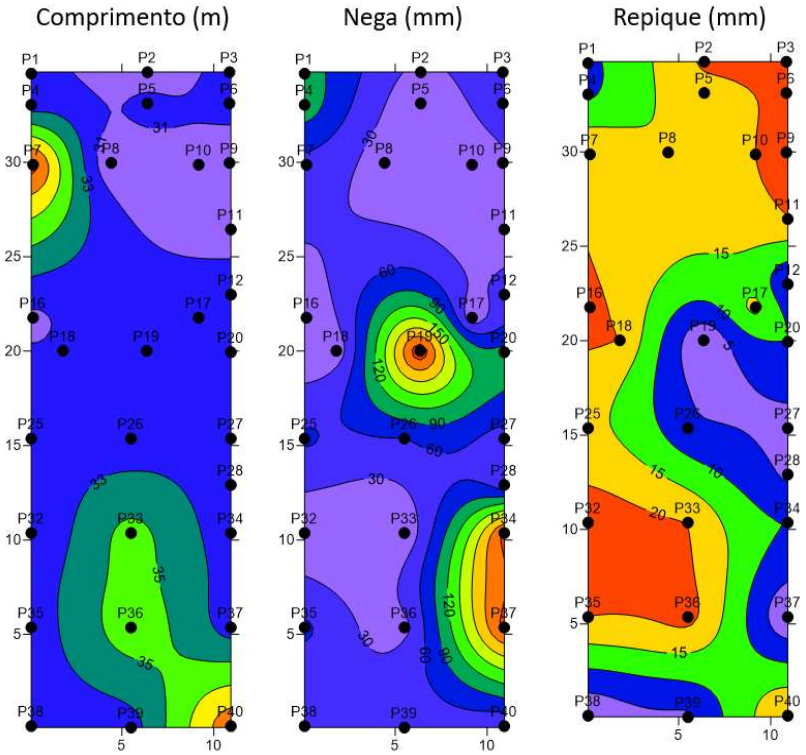


Figura 6. Disposição espacial dos parâmetros de execução das estacas.

Para aprofundar essa análise, foram comparados os perfis de energia de cravação, valores de N_{SPT} das sondagens e resistência lateral obtida por meio de ensaios dinâmicos (PDA), conforme apresentado na Figura 7. Observou-se boa aderência entre os três conjuntos de dados: trechos de maior energia mobilizada durante a cravação correspondem a faixas de maiores valores de N_{SPT}, indicando coerência entre a resistência dinâmica mobilizada e a resistência geotécnica do terreno.

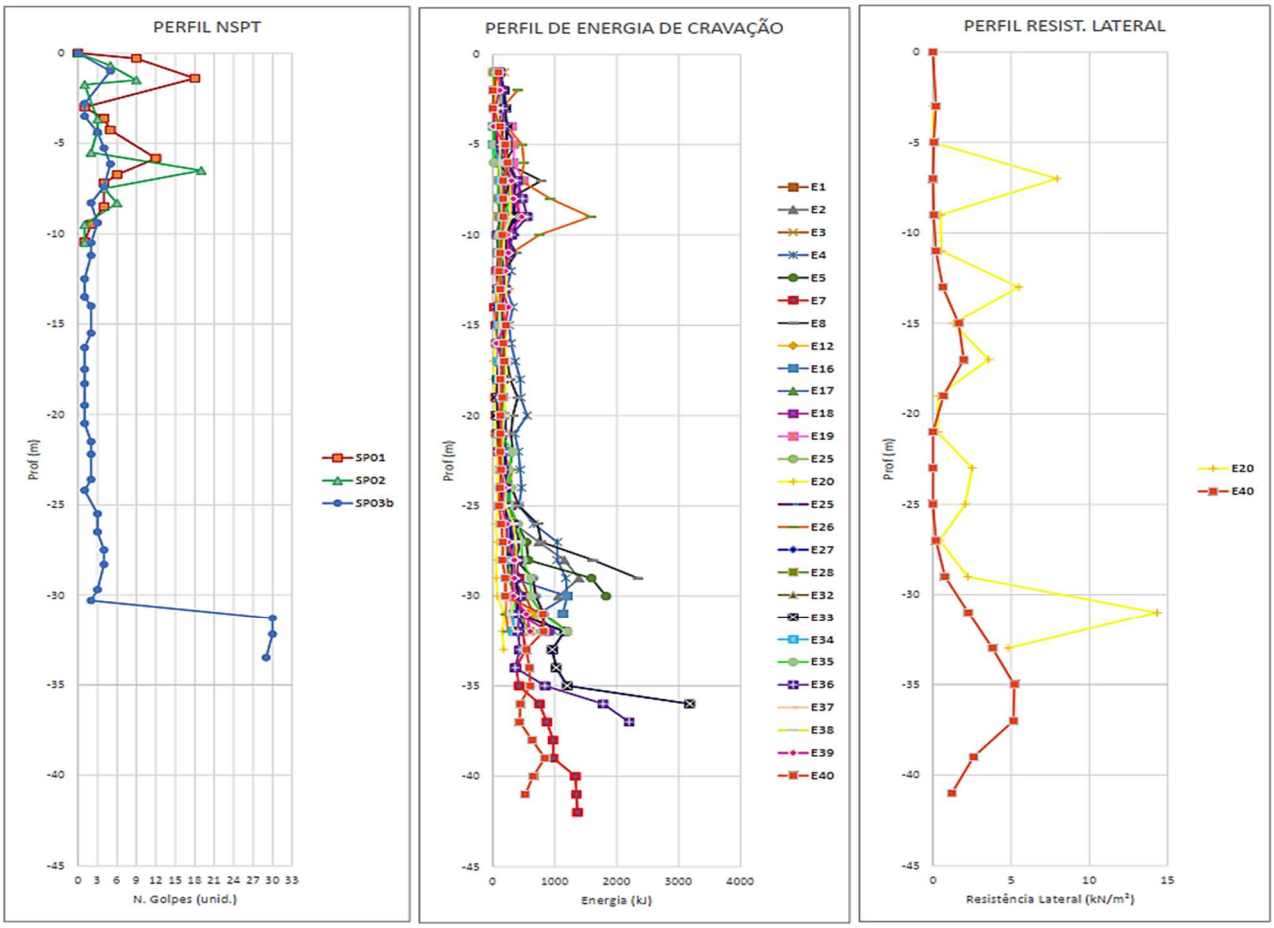


Figura 7. Comparativo dos resultados de acompanhamento da execução das estacas.

Observou-se que nas estacas instrumentadas (E20 e E40), os picos de resistência lateral obtidos no PDA coincidem com zonas de maior energia de cravação e maiores valores de N_{SPT}, reforçando a convergência entre os métodos de avaliação. Essa correlação confirma que os parâmetros executivos registrados em campo refletem adequadamente as condições geotécnicas do subsolo.

3.3 Impactos da investigação geotécnica no processo executivo

Com base nos registros da obra, foi elaborada uma linha do tempo técnica do processo de investigação e revisão do projeto de fundações, sintetizada na Tabela 2. A análise demonstra que a investigação geotécnica inicial, composta apenas pelos furos SP01 e SP02, resultou em um primeiro projeto de fundações superdimensionado, com 63 estacas de diferentes tipologias.

A realização de uma terceira sondagem mais profunda (SP03b) permitiu redefinir o modelo geotécnico e otimizar o projeto, reduzindo o número total para 41 estacas pré-moldadas, solução posteriormente adotada na execução. No entanto, o processo de revisão do projeto e complementação das investigações resultou em atraso aproximado de quatro meses no início das obras.

Esse resultado evidenciou a importância de uma investigação geotécnica inicial adequada para o desenvolvimento de projetos de fundação. A ausência de dados representativos nas fases preliminares gerou retrabalhos, revisões de projeto e impactos significativos no cronograma e nos custos da obra.

Tabela 2 – Cronologia do processo executivo.

Etapa	Período	Descrição
Execução do SP01 e SP02	dez/21	Realização das sondagens iniciais para caracterização do subsolo.
Interpretação preliminar dos resultados	jan/22	Análise dos dados obtidos e definição inicial da estratigrafia do terreno.
Execução da sondagem SP03a	jan/22	Perfuração complementar para refinamento das informações.
Identificação de inconsistências	fev/22	Verificação de divergências nos resultados obtidos na sondagem SP03a.
Execução da sondagem SP03b	mar/22	Nova perfuração próxima para confirmação da estratigrafia.
Consolidação final dos dados	abr/22	Revisão das interpretações e validação das condições de subsolo para o projeto de fundações.

4 CONCLUSÕES

O estudo permitiu compreender o comportamento das estacas pré-moldadas executadas em solos moles do Recife, demonstrando que a investigação geotécnica inicial insuficiente impactou diretamente o projeto, gerando retrabalhos, reformulações e atraso significativo no cronograma da obra. Conclui-se que a eficácia das fundações profundas em solos moles depende de investigação adequada, controle executivo contínuo e capacidade de adaptar decisões ao comportamento real do terreno, elementos que, quando integrados, garantem maior eficiência, segurança e confiabilidade ao empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, Urbano. (2019) Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle da qualidade em fundações. 3. ed. São Paulo: Blucher. 154 p. ISBN 978-85-212-1388-8.

CABETTE, J. F. (2014) Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-frabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico. 2014, 161 p. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. H. C.; GIACHETI, H. L. (2013) Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

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

GUSMÃO, A. D. (2005) Prática de Fundações no Recife. Geotecnia no Nordeste. Gusmão, A. D., Gusmão Filho, J. A., Oliveira, J. T. R., Maia, G. B. (Orgs). Editora Universitária da UFPE, Recife.

NICHOLSON, D. TSE, C.-M. PENNY, C. (1999) *The the Observational Method in Ground Engineering: Principles and Applications*. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA).

OLIVEIRA, M. S. (2018) In*fluência geológico-geotécnica na escolha dos tipos de fundações do bairro de boa viagem / recife e elaboração de banco de dados de medições de recalques em edifícios*. 2018, 102 p. Dissertação (mestrado). Universidade de Pernambuco (UPE), Recife.

OLIVEIRA, M. S. et al. (2016) Identificação e classificação de perfis típicos na planície do Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais*... Belo Horizonte: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.

PECK, R. B. (1969) *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*. Géotechnique, v. 19, n. 2, p. 171–187. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171

TERZAGHI, K.; BRAZELTON, R.; MESRI, G. (1996) *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley.