

IMPORTÂNCIA E IMPACTOS DO ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM PROJETO DE FUNDAÇÃO

Daniel Santos Martins

Bacharel em Engenharia Civil (danielism2837@gmail.com)

Guilherme Nunes Ferreira

Bacharel em Engenharia Civil (gnfguilherme45@gmail.com)

Luiz Carlos Barbosa Ferreira

Bacharel em Engenharia Civil (eng.luizcarlos@gmail.com)

Vanessa Eskavron Sousa

Bacharela em Engenharia Civil (vanessaeskavron@gmail.com)

Agnaldo Antonio Moreira Teodoro da Silva

Mestre, Docente da UniEVANGÉLICA (agnaldo.silva@docente.unievangelica.edu.br)

RESUMO

A fundação é um componente crítico de uma estrutura, responsável por transferir as cargas da construção para o solo, assegurando sua estabilidade. Entre as opções de fundações profundas, a estaca hélice contínua se destaca pela eficiência e versatilidade. Sua execução envolve a perfuração do solo com uma hélice contínua, seguida de concretagem enquanto a hélice é retirada, e posterior inserção da armadura no concreto fresco. Esse método oferece vantagens como rápida execução, baixa vibração e ruído, além de boa capacidade de carga, sendo ideal para áreas urbanas e solos variados. Contudo, a técnica exige controle rigoroso e equipamentos especializados. O ensaio de carregamento dinâmico é utilizado para avaliar a capacidade de carga das estacas, aplicando golpes na cabeça da estaca para gerar ondas de tensão medidas por sensores. Isso permite uma análise precisa da resposta da estaca e do solo, fornecendo dados sobre a capacidade de carga e a integridade estrutural. A aplicação do ensaio dinâmico pode trazer várias melhorias, como estimativas precisas da capacidade de carga, validação do projeto de fundações, identificação precoce de defeitos e redução de custos.

PALAVRAS-CHAVE: fundação; ensaio de carregamento dinâmico; estaca hélice contínua; dimensionamento de projeto.

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de prova de carga dinâmica é uma técnica essencial na engenharia civil, utilizada para avaliar a capacidade de carga e o comportamento de fundações profundas, como estacas e tubulões. Este ensaio envolve a aplicação de uma carga dinâmica através de impactos, geralmente gerados por um martelo de queda livre ou dispositivos hidráulicos, simulando as condições de carregamento reais (ABNT, 2007). Sensores instalados na estaca medem a resposta ao impacto, registrando deslocamento, velocidade e aceleração, permitindo a análise da capacidade de carga, distribuição de tensões e identificação de defeitos estruturais. Esse resultado do ensaio reside na precisão da estimativa da capacidade de carga, garantindo a segurança e estabilidade das estruturas. Além disso, o ensaio identifica problemas na execução das fundações, permitindo correções antes da conclusão da obra e evitando custos adicionais. A confirmação da capacidade de carga real possibilita a otimização do projeto, evitando super dimensionamentos desnecessários e reduzindo custos. A verificação dessas premissas de projeto e o monitoramento contínuo das fundações ao longo do tempo aumentam a confiabilidade e a durabilidade das estruturas. Assim, o ensaio de prova de carga dinâmica é crucial para a segurança, eficiência e economia em projetos de engenharia civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fundação em estacas é um tipo de fundação profunda utilizada para transferir as cargas de uma estrutura para camadas mais resistentes do solo que estão situadas em profundidades maiores. Essas estacas são elementos estruturais alongados, geralmente feitos de concreto, aço ou madeira, que são cravados ou perfurados no solo até atingirem uma camada de solo resistente o suficiente para suportar as cargas da estrutura. (Braja M, 2007).

2.1 ESTACA HÉLICE CONTÍNUA

A fundação em estaca hélice contínua é uma fundação do tipo profunda, ou seja, transmite a carga de projeto através de sua resistência lateral e/ou resistência de ponta, cuja ponta deve estar assentada a uma profundidade oito vezes maior que sua menor dimensão e superando a medida de três metros de profundidade. Caracterizada como fundação moldada in loco (no local), seu processo de execução caracteriza-se por se dar através da perfuração do solo com o trado helicoidal de uma máquina perfuratriz. Ao rotacionar e promover a perfuração do terreno, este mesmo trado bombeia o concreto através de um furo na haste central do mesmo simultaneamente a sua retirada da escavação. Ao final da remoção do trado e do lançamento do concreto faz-se a introdução da armação em sequência (ABNT, 2019).

A escolha da hélice contínua requer uma avaliação criteriosa de cada projeto. A análise geotécnica detalhada, juntamente com a consideração dos desafios específicos apresentados pelo terreno e projeto, são essenciais para garantir o sucesso e eficácia dessa técnica inovadora em fundações prediais. A atenção cuidadosa a esses desafios e considerações contribui para a aplicação responsável e eficiente da hélice contínua no contexto da construção civil contemporânea (Lobo, 2016).

Dessa forma, de acordo com Hanazaki, Hideo (2005) essas estacas são escolhidas em várias situações devido às suas vantagens:

- a) Alta capacidade de carga: As estacas hélice contínua podem suportar cargas elevadas devido à sua capacidade de penetrar em camadas de solo mais firmes;
- b) Menor geração de resíduos: Como o solo é removido durante a perfuração e não precisa ser extraído para fora do furo, há uma redução na geração de resíduos em comparação com outros métodos de estacas;
- c) Menor vibração e ruído: A execução das estacas hélice contínua geralmente produz menos vibração e ruído em comparação com outros métodos de estacas, o que pode ser importante em áreas urbanas densamente povoadas;
- d) Maior controle sobre o processo: Como o processo de perfuração e preenchimento com concreto é contínuo, há um maior controle sobre a qualidade da estaca produzida.

Porém, existem algumas desvantagens associadas as estacas hélice contínua:

- a) Limitações em solos muito duros ou rochosos: Em solos muito duros ou rochosos, a perfuração pode ser mais difícil e requer equipamentos mais robustos;
- b) Custo inicial mais elevado: O equipamento necessário para a execução das estacas hélice contínua pode ser mais caro em comparação com outros métodos de estacas;
- c) Restrições de acesso: O equipamento de perfuração utilizado para a instalação das estacas hélice contínua pode exigir espaço suficiente no local da obra, o que pode ser uma limitação em áreas urbanas densamente povoadas.

Para se executar as estacas hélice contínua envolvem-se as seguintes etapas: preparação do local (limpeza e nivelamento da área onde as estacas serão instaladas), perfuração (utilização de uma máquina especializada para perfurar o solo e formar o furo para a estaca), preenchimento com concreto (concretagem do furo enquanto a haste é lentamente retirada para formar a estaca), inserção de armadura (colocação de armadura de aço no furo para reforçar a estaca) e cura do concreto (permitir que o concreto cure e ganhe resistência antes de aplicar as cargas estruturais).

2.2 ENSAIO PDA

O ensaio de carregamento dinâmico, também conhecido pela sua sigla ECD, é um ensaio que busca analisar o comportamento de, geralmente, uma estaca a um golpe dinâmico. A análise dinâmica de carga em um componente de fundação, comumente uma estaca, consiste em submeter o elemento a um carregamento axial dinâmico. O principal objetivo desse ensaio é obter uma avaliação abrangente da capacidade de carga e integridade estrutural. Esse procedimento demanda o uso de instrumentação especializada e a aplicação da teoria da equação de onda, conforme descrito por Niyama (1996).

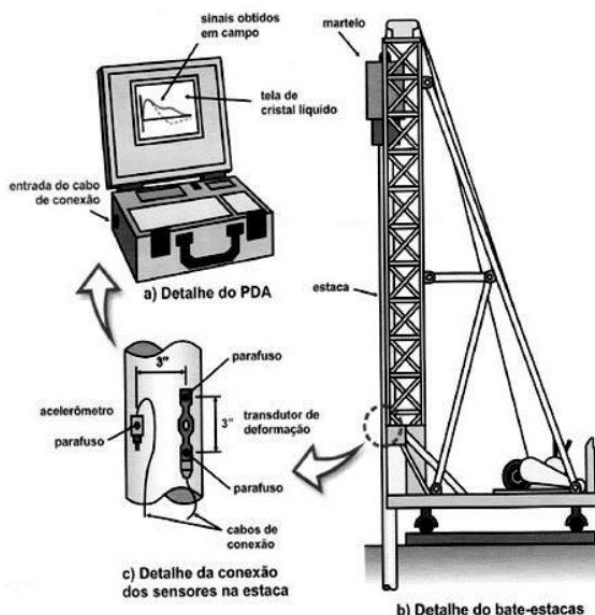
Segundo Niyama e Aoki (1998), a avaliação de estacas cravadas era tradicionalmente limitada à medida da nega, devido à simplicidade desse método. Entretanto, avanços significativos na compreensão desse fenômeno ocorreram, especialmente com a solução da equação de onda por meio de algoritmos propostos por Smith (1960). No contexto brasileiro, essa abordagem foi inicialmente implementada para controlar a cravação das estacas nas plataformas marítimas da Petrobrás durante o início da década de 1980 (Niyama *et al.*, 1983). A partir de 1983, essa técnica foi

progressivamente aplicada em projetos de fundação em terra. O procedimento envolve a aplicação de golpes sucessivos do martelo, com energias crescentes, enquanto a resistência à cravação é medida por meio de instrumentação (Aoki, 1989; Niyama e Aoki, 1991).

Essa abordagem, de acordo com os autores mencionados, representa um avanço significativo no controle de estacas cravadas, superando a limitação inicial da simples medida da nega. Essa evolução foi impulsionada pela aplicação da solução da equação de onda e pela introdução da técnica no cenário brasileiro, inicialmente em projetos da Petrobrás, seguida pela sua adaptação em projetos de fundação em terra. O método consiste em golpes progressivos do martelo, com variação de energia, e a medição da resistência à cravação por meio de instrumentação apropriada regulamentada (Aoki, 1989; Niyama e Aoki, 1991).

Como parte dos instrumentos de medição do ensaio usam-se dois pares de sensores. Os dois sensores que são usados são um tradutor de deformação específica e um acelerômetro. O primeiro mostra uma tensão equivalente à deformação causada pelo tipo de material da estaca durante o golpe e o segundo mostra uma tensão equivalente à aceleração das partículas da estaca. Para obter a evolução da força em relação ao tempo, o índice de cada transdutor de deformação é aumentado pelo módulo de elasticidade do material da estaca e pela área de seção na área dos sensores. Como resultado, os transdutores também podem ser referidos como sensores de força. Para obter os resultados do golpe, o PDA usa a média dos dois sinais. Cada acelerômetro tem um índice para aumentar a velocidade (Rodrigues e Filho, 2012).

Figura 1 - Esquema de Prova de Carga Dinâmica



Fonte: Gonçalves e Bernardes *et al.* (2007) *apud* Rodrigues e Filho (2012).

Essa evolução no entendimento e na aplicação prática demonstra a importância crescente dessa técnica no contexto geotécnico brasileiro. Hoje em dia já se compreende a importância da prova de carga dinâmica, com auxílio do PDA, como uma ferramenta auxiliadora na tomada de decisão dos projetistas (Gonçalves e Bernardes, 2007).

A Prova de Carga Dinâmica, também conhecida como *Pile Driving Analyzer* (PDA), é uma técnica específica de prova de carga dinâmica utilizada principalmente na

avaliação de estacas cravadas ou perfuradas em projetos de engenharia civil e geotécnica. Em seu livro "*Fundamentals of Soil Behavior*" (2013), os autores afirmam que o ensaio PDA é uma técnica que é utilizada com sucesso na medição da capacidade de carga das estacas, independente da condição do solo onde esta se encontra, oferecendo uma abordagem de avaliação de comportamento das estacas e fornecendo informações de grande valia para o projeto e para a análise do desempenho e característica da fundação (Mitchell, 2013).

Em "*Foundation Design and Construction*" (2014), os autores Tomlinson e Boorman mencionam que o *Pile Driving Analyser* (PDA) demonstra ser uma técnica de grande valia para a área da Geotecnia pois o ensaio permite realizar uma rápida avaliação da capacidade de carga das estacas. Da mesma forma que permite esta avaliação, ainda mantém a estrutura em sua maior integridade por ser caracterizado como um ensaio não destrutivo. Devido principalmente a esta característica, esse ensaio é útil para locais com condições geotécnicas complexas ou nos quais os ensaios de carga estática possam representar uma condição irreal de carga (Tomlinson *et al*, 2014). Portanto, a Prova de Carga Dinâmica é uma técnica poderosa e versátil na engenharia civil, oferecendo uma abordagem dinâmica e eficiente para a avaliação da capacidade de carga de estacas e outras estruturas de fundação. Sua aplicabilidade em uma variedade de cenários torna-a uma ferramenta indispensável para engenheiros e projetistas em todo o mundo. Faz parte do desenvolvimento a apresentação teórica embasada nos autores consagrados das temáticas abordadas, o reconhecimento do local onde a pesquisa foi desenvolvida, os dados coletados para pesquisa, como também sua análise e apreciação.

2.3 NORMAS

2.3.1 NBR 6.122/2022 – Projeto e Execução de Fundações

A norma NBR 6122:2022 (ABNT, 2022) – Projeto e Execução de Fundações - é um marco na engenharia civil, fornecendo diretrizes detalhadas para o projeto e execução de fundações, visando garantir a segurança e eficiência das estruturas de fundação em obras civis. Desde a seleção do tipo de fundação adequado ao solo e às cargas até os procedimentos de execução e controle de qualidade, a norma aborda todos os aspectos necessários para garantir que as fundações suportem as cargas previstas e atendam aos requisitos de desempenho ao longo do tempo.

O processo de projeto de fundações, conforme delineado na NBR 6122:2022, requer uma análise minuciosa das condições do solo e das cargas esperadas pela estrutura. A partir de investigações geotécnicas apropriadas, o projetista escolhe o tipo de fundação mais adequado, considerando fatores como capacidade de carga do solo, profundidade da camada resistente e possíveis efeitos de recalques. Essa escolha fundamentada é crucial para a estabilidade e segurança da estrutura, prevenindo problemas futuros.

Durante a execução das fundações, a norma enfatiza a necessidade de seguir procedimentos rigorosos para garantir a qualidade e conformidade com o projeto. Isso inclui a preparação adequada do terreno, instalação precisa das fundações e realização de ensaios de controle de qualidade, como testes de carga. Além disso, a norma aborda aspectos de segurança no local da obra, enfatizando a importância do uso de equipamentos adequados e adoção de medidas de proteção para os trabalhadores, assegurando um ambiente de trabalho seguro durante a execução das fundações.

A documentação e o controle de qualidade ao longo de todas as fases do projeto e execução das fundações são aspectos cruciais destacados pela NBR 6122:2022. O registro detalhado de todas as etapas do processo, desde a investigação do solo até os

ensaios de controle, é essencial para garantir a rastreabilidade e conformidade com as exigências normativas. Essa documentação abrangente não só facilita a avaliação de conformidade, mas também serve como um recurso valioso para a manutenção futura e possíveis intervenções na estrutura.

2.3.2 NBR 13.208/2007 – Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico

A NBR 13.208:2007 (ABNT, 2007), Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico - estabelece os procedimentos para a realização de ensaios de carregamento dinâmico em estacas, visando fornecer diretrizes padronizadas e precisas para esses testes. O objetivo principal é avaliar a capacidade de carga das estacas de forma dinâmica, o que é fundamental para garantir a integridade e segurança das fundações em projetos de engenharia civil.

Durante a preparação das estacas para os ensaios, são instalados sensores, como acelerômetros e strain gauges, para medir as forças e deslocamentos durante a aplicação de cargas. Essa instrumentação é crucial para capturar com precisão a resposta dinâmica das estacas e fornecer dados confiáveis para análise.

Durante a execução dos ensaios, uma série de impactos controlados é aplicada à cabeça da estaca utilizando diferentes dispositivos, como martelos de queda livre ou hidráulicos. A energia de cada impacto é monitorada e registrada para garantir a repetibilidade do ensaio, enquanto as leituras dos sensores são continuamente registradas para análise posterior.

Os critérios de aceitação dos resultados são definidos pela norma, e os ensaios devem ser comparados a esses critérios para verificar a adequação das fundações. O relatório final do ensaio deve incluir uma descrição detalhada do procedimento, os dados coletados, as análises realizadas e as conclusões, garantindo a conformidade com as diretrizes da norma para assegurar clareza e precisão.

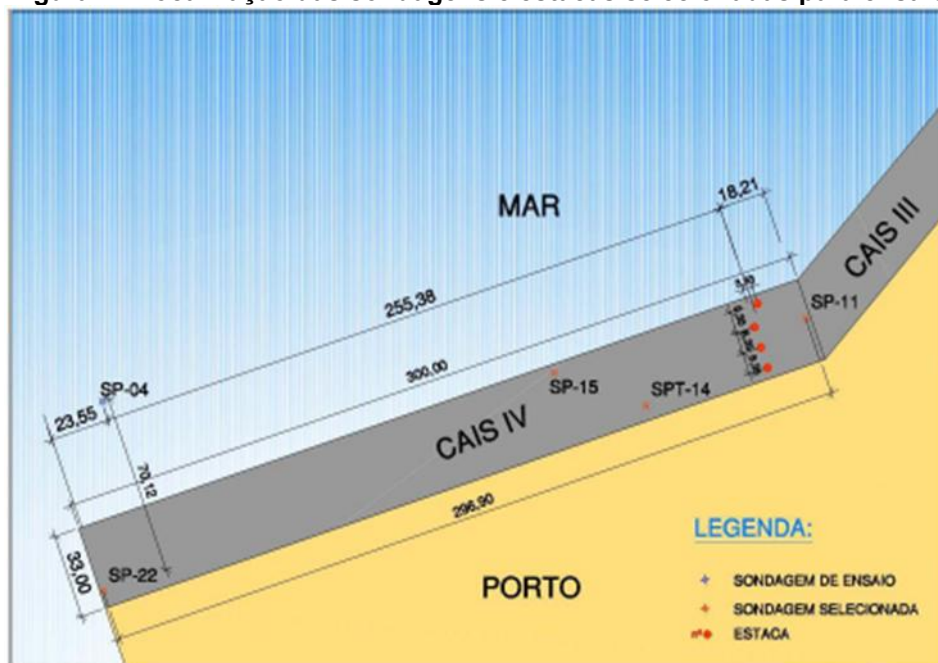
2.4 ESTUDOS REALIZADOS

2.4.1 Complexo de Obras em Suape

Visando analisar os impactos do ensaio de carregamento dinâmico, Silva [2011] estudou os resultados do ensaio aplicado em duas construções de grande porte realizadas na cidade de Suape, Pernambuco. As obras em questão tratam-se do Cais IV e do Dique Seco do Estaleiro Atlântico Sul, localizadas no Complexo Industrial-Portuário de Suape. Para essa análise foram estudadas a interação solo-estaca e feita uma comparação entre os resultados de resistência obtidos em ensaio e as previsões calculadas com base nos modelos de cálculo (Silva, 2011).

Na obra do Cais IV houve a execução de 06 (seis) estacas tubulares metálicas e núcleo de concreto armado, além de 336 (trezentas e trinta e seis) estacas pré moldadas de concreto com profundidade média de 40 (quarenta) metros, distribuídas em oitenta e quatro eixos com quatro estacas cada ao longo de uma área de 330 metros por 33,40 metros. Quanto a composição geológica do solo da região destacam-se seis tipologias de rochas: rochas vulcânicas, conglomerados, arenitos, argilitos, calcários e sedimentos (Silva, 2011). No que se refere as estacas e sondagens escolhidas para o estudo, a Figura 2 indica:

Figura 2 - Localização das sondagens e estacas selecionadas para ensaio



Fonte: Silva, 2011.

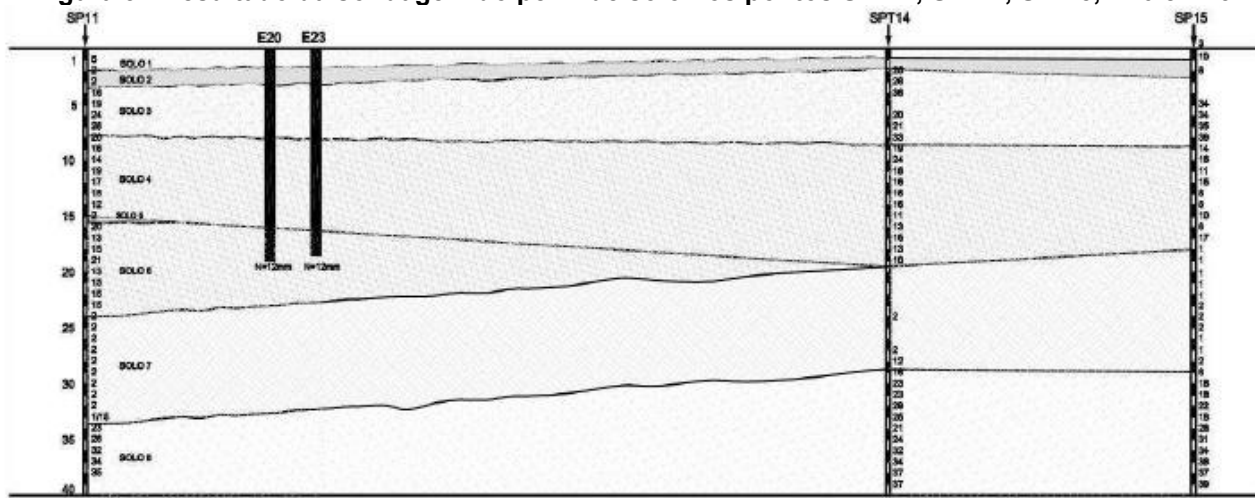
Os pontos selecionados foram ensaiados para a resistência a compressão da carga dinâmica conforme foi objeto do estudo. Realizado o ensaio no Cais em Suape, tendo-se os resultados da sondagem nos pontos selecionados, conforme ilustrado na figura 3, obteve-se as seguintes especificações de solo:

- presença de argila siltosa em uma faixa de 2 metros;
- presença de argila orgânica em uma faixa de 2 metros;
- arenito com espessura média de 5,50 metros;
- camada de areia siltosa apresentando uma espessura variável entre 8 a 11 metros;
- camada de argila siltosa com 10,50 metros;
- presença de uma camada final de areia média com espessura média de 9 metros.

Após a realização do ensaio de sondagem nos pontos previamente selecionados e tendo concluída a obtenção dos dados para melhor conhecimento sobre os perfis do solo da construção e as características do solo tornou-se possível então realizar a montagem de uma carta ilustrativa dos perfis de solo existentes nos pontos de sondagem. Este tipo de carta é utilizada para uma melhor compreensão da composição do solo e de suas camadas. Com o material em mãos, tem-se uma melhor imagem de como é, fisicamente, as camadas de perfis de solo. O exemplo de carta da obra pode ser verificada conforme ilustrado pela Figura 3, referente aos resultados obtidos nas sondagens executadas nos pontos SP-11, SP-14, SP-15, E20 e E23.

Nas estacas selecionadas foram instalados os transdutores e acelerômetros (Figura 4), que são, segundo a norma NBR ABNT 13.208/2007 - Estacas - Ensaio de carregamento dinâmico -, aparelhos usados para medir a aceleração e a deformação específica sofridas devido aos golpes na estaca ensaiada. Estes sensores foram instalados a aproximadamente 0,9 metros abaixo do topo das estacas (Figura 5). O topo destas estacas, também referidos como “cabeça de estaca”, foram golpeados com um maquinário chamado “bate estaca”. Este maquinário, normalmente utilizado na cravação de estacas metálicas, foi utilizado para promover a queda livre do martelo que golpeou a cabeça das estacas e provocou os dados do ensaio (Silva, 2011).

Figura 3 - Resultado da sondagem do perfil de solo nos pontos SP-11, SP-14, SP-15, E20 e E23



LEGENDA:

SOL01 = Areia Silteosa, fofa e pouco compacta.
 SOL02 = Argila Orgânica, muito mole.
 SOL03 = Arenito.
 SOL04 = Areia Média a fina, silteosa, compacta a medianamente compacta.
 SOL05 = Argila Orgânica, muito mole.
 SOL06 = Areia Média a fina, silteosa, compacta a medianamente compacta.
 SOL07 = Argila Silteosa, muito mole.
 SOL08 = Areia Média a fina compacta.
 N = Neca

ESCALA GRÁFICA



0 5 10

Fonte: Silva, 2011.

Figura 4 - (a) Transdutores e acelerômetro utilizados no ensaio; (b) equipamento P.D.A. (Pile Driving Analyser)



Fonte: Silva, 2011.

Figura 5 - (a) Aparelho “bate estaca” utilizado no ensaio de carregamento dinâmico; (b) preparação



Fonte: Silva, 2011.

As estacas estudadas (Tabela 1) geraram os resultados que foram compilados na Tabela 2. As especificações das estacas se encontram a seguir:

Tabela 1 - Característica das estacas

TRECHO	ESTACA	TIPO	Ø (mm)	CARGA DE TRABALHO	COMPRIMENTOS		MARTELO (t)	DATA
					TOTAL	CRAVADO		ENSAIO
B5	E31	Hélice Contínua	600	2.200	16,54	15,34	4,20	23/09/2008
	E32				15,83	14,63		23/09/2008
	E53				16,07	14,87		24/09/2008
	E74				16,08	14,88		27/09/2008
	E75				15,82	14,62		27/09/2008
D1	E31				20,80	19,60		18/07/2008
D3	E85				20,71	19,11		07/08/2008
	E114				22,13	20,93		15/08/2008
	E119				20,18	19,58		15/08/2008

Fonte: Silva, 2011.

No que se refere a coletânea dos dados obtidos para o ensaio realizado nas estacas de fundação do Estaleiro Atlântico Sul, os resultados podem ser conferidos na Tabela 2 a seguir. Compilados de acordo com o trecho estudado, a estaca analisada e suas respectivas resistências de ponta e atrito lateral (cujas medidas foram destrinchadas em forma de porcentagem), é possível fazer a montagem da tabela dos resultados do ECD conforme a tabela ilustra a seguir:

**Tabela 2 - Resultados do ensaio de carregamento dinâmico no Estaleiro Atlântico Sul
(continua)**

TRECHO	ESTACA	RU (kN)	QAL (kN)	%QAL	QP (kN)	%QP	J
B5	E31	4.630	2.732	59	1.898	41	0,35
	E32	4.730	2.554	54	2.176	46	0,30

**Tabela 2 - Resultados do ensaio de carregamento dinâmico no Estaleiro Atlântico Sul
(conclusão)**

TRECHO	ESTACA	RU (kN)	QAL (kN)	%QAL	QP (kN)	%QP	J
	E53	4.810	2.790	58	2.020	42	0,30
B5	E74	5.090	3.665	72	1.425	28	0,30
	E75	4.900	2.450	50	2.450	50	0,15
D1	E31	5.200	3.120	60	2.080	40	0,60
	E85	5.720	4.976	87	744	13	0,05
D3	E114	5.530	4.811	87	719	13	0,10
	E119	5.910	4.492	76	1.418	24	0,15

Fonte: Silva, 2011.

2.4.2 Avaliação do Emprego de Prova de Carga Estática e Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estacas Tipo Hélice Contínua

Para analisar o desempenho da fundação em estaca hélice contínua, no Brasil, comumente realizam-se dois ensaios: o Ensaio de Prova de Carga Estática (também conhecido por sua sigla ECPE) e o Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD). No que se refere ao Ensaio de Carregamento Dinâmico, é realizado com um aparelho denominado PDA (*Pile Driving Analyzer*) e um software conhecido como CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*), onde é feita a análise dos resultados. Este ensaio fornece as medições de tração e compressão, uniformidade e integridade do fuste da estaca, energia fornecida pelo golpe e resistência estática do sistema solo estaca (Souza; Albuquerque, 2016). Já o software CAPWAP pode fornecer os resultados de capacidade de carga em estacas não uniformes, prevendo sua capacidade de carga no fuste e na ponta da estaca, além de gerar um relatório carga aplicada x deslocamento. Os autores Souza e Albuquerque (2016) citam que, segundo Rausche, a massa mínima de martelo necessária para mobilizar a carga última de ensaio deve ser equivalente a um valor entre 1% a 2% da capacidade de carga da estaca.

Debatendo o estudo dos autores, trata-se da execução de ensaios de carga estática e carregamento dinâmico em 28 estacas hélice contínua. O resultado previsto era de uma carga de 1.158 KN. Os dados coletados foram sintetizados na forma de tabela e apresentados na Tabela 3 a seguir, onde se encontram os valores da resistência obtida no ensaio e sua distribuição, em porcentagem, entre a contribuição por resistência de ponta e o atrito lateral da estrutura da estaca (descarga da energia através do fuste)

Tabela 3 - Resultados do ensaio de carregamento dinâmico

ESTACA	R_{Mob}	%	%	MQ
	(kN)	(FUSTE)	(PONTA)	
EECD01	1952	51,80	48,20	0,94
EECD02	2128	57,60	42,40	1,20
EECD03	2334	55,20	44,80	0,95
EECD04	2319	61,90	38,10	1,98
EECD05	2132	53,80	46,20	1,50
EECD06	1299	60,00	40,00	0,98
EECD07	1598	46,00	54,00	0,99
EECD08	1574	52,60	47,40	1,36
EECD09	2697	74,90	25,10	1,10
EECD10	1471	67,00	33,00	1,46
EECD11	1167	69,70	30,30	1,28
EECD12	1652	57,60	42,40	1,39
EECD13	1265	74,00	26,00	1,12
EECD14	1402	64,30	35,70	1,49
EECD15	1491	61,00	39,00	1,42
EECD16	1491	59,20	40,80	1,54
EECD17	2216	46,50	53,50	0,97
EECD18	2221	56,10	43,90	1,39
EECD19	1446	47,80	52,20	0,98
EECD20	1765	62,20	37,80	1,46
EECD21	1937	66,10	33,90	1,36
EECD22	2834	63,30	36,70	1,72
EECD23	2398	62,00	38,00	2,04
EECD24	1716	56,90	43,10	1,33
EECD25	1358	47,70	52,30	1,33
EECD26	1564	61,80	38,20	1,26
EECD27	2236	72,40	27,60	1,39
EECD28	2358	55,10	44,90	1,23
MÉDIA	1858	59,40	40,60	1,33

Fonte: Souza; Albuquerque, 2016.

2.4.3 Análise de Resultados dos Ensaio Bidirecional e de Carregamento Dinâmico – Estudo Comparativo

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece que as estacas de hélice contínua são a opção de fundação mais adequada para projetos. De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 6122, é necessário realizar testes para verificar a interação entre o solo e a estrutura. A norma estipula que uma prova de carga estática pode ser substituída por cinco ensaios de carregamento dinâmico ou por um ensaio bidirecional, embora esta última opção não seja normatizada. Acredita-se que o ensaio bidirecional pode ser um substituto viável para a prova de carga estática (ABNT, 2022).

Por meio de métodos semiempíricos, é possível estimar os valores de carga admissível e carga de ruptura da estaca de forma isolada. O objetivo desta pesquisa é avaliar a confiabilidade dos ensaios de carregamento dinâmico e bidirecional, comparando-os com os resultados obtidos por meio dos métodos semiempíricos. Serão analisados 14 ensaios de carregamento dinâmico e um ensaio bidirecional, e as cargas

de ruptura serão comparadas utilizando os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma (Silva *et al.*, 2021).

Para extrapolar a curva de carga de ruptura, serão utilizados os métodos de Van der Veen, Chin-Kondner e Décourt. Entre esses métodos, o de Van der Veen demonstrou ser o mais conservador e mais próximo das cargas calculadas pelos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma (Silva *et al.*, 2021).

No contexto de projetos de fundações, um dos desafios é garantir a conciliação entre os parâmetros semiempíricos utilizados no projeto e os resultados da interação entre a estrutura e o solo no local da obra. É importante avaliar se as premissas de segurança e conforto serão garantidas ao longo da vida útil da edificação (Silva *et al.*, 2021).

A fundação tem a responsabilidade de transmitir os carregamentos da estrutura (laje, viga e pilar) para o solo. Existem dois tipos de fundação: as superficiais, também conhecidas como diretas ou rasas, e as profundas, também chamadas de indiretas. Nesta pesquisa, serão abordadas as fundações profundas (Silva *et al.*, 2021).

Para as fundações profundas, a ABNT estabelece metodologias de testes *in loco* para avaliar o desempenho da fundação, sendo eles a prova de carga estática (PCE) e o ensaio de carregamento dinâmico (ECD). O ECD é um potencial substituto da PCE, embora não forneça todos os resultados obtidos pela PCE, ainda é uma solução viável para a obra, considerando aspectos logísticos e de cronograma. Através da análise numérica dos dados do ECD, é possível prever uma curva de carga versus recalque, semelhante à obtida pela PCE. Outro método para avaliar o desempenho da fundação é o ensaio bidirecional, que é um tipo de prova de carga estática. Embora previsto pela NBR 6122, não há uma metodologia específica descrita em normas brasileiras. A interpretação dos resultados do ensaio bidirecional é feita através da extrapolação de dados para obter a curva equivalente, assim como ocorre na interpretação dos resultados do ECD (Silva *et al.*, 2021).

Diante dessas informações, o questionamento é: qual é a confiabilidade da curva estimada de carga versus recalque obtida a partir do ensaio bidirecional ou do ECD, quando comparada aos resultados obtidos pelos métodos semiempíricos? O objetivo desta pesquisa é compreender o desempenho das estacas de hélice contínua, monitoradas através da análise das curvas de carga versus recalque obtidas pelo ensaio bidirecional e ensaios de carregamento dinâmico, e comparar os resultados com os obtidos pelos métodos de cálculo semiempíricos, visando garantir uma maior segurança na execução do projeto (Silva *et al.*, 2021).

As fundações profundas são responsáveis por suportar e transmitir os carregamentos da estrutura para o solo de forma segura. São adotadas quando o carregamento é elevado ou o solo apresenta baixa resistência. Existem dois tipos principais de estacas: pré-moldadas e moldadas *in loco*. O controle de capacidade de carga é essencial após a instalação das estacas. As estacas de hélice contínua são um tipo específico que não possui revestimento externo e utiliza um trado helicoidal para perfurar o solo. São vantajosas por não causarem vibrações e funcionarem bem em solos de alta resistência. Após a perfuração, o concreto é colocado gradualmente e a estaca é finalizada com a inserção da armadura e o nivelamento após a cura do concreto (Silva *et al.*, 2021).

O ensaio bidirecional, conforme descrito por Dada (2019), utiliza células expansivas introduzidas na estaca durante sua execução, empurrando os trechos do fuste em direções opostas para gerar valores de atrito lateral, tração e compressão. O dispositivo conectado a tubos hidráulicos é utilizado para alimentação e pressão, permitindo a obtenção da resistência de ponta real. O ensaio é realizado através da introdução de pressão nos tubos de alimentação, com cada incremento de carga medido

por manômetros, enquanto os deslocamentos são medidos por deflectômetros ou transdutores de deslocamento. Após o ensaio, os vazios e fissuras criados são preenchidos com nata de cimento (Silva *et al.*, 2021).

Uma análise dos custos entre o Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), o ensaio bidirecional e a Prova de Carga Estática (PCE) revela que os dois primeiros são mais vantajosos economicamente. Para a obra considerada neste estudo, o custo da PCE pode chegar ao dobro do custo do ECD e do ensaio bidirecional, incluindo execução, mobilização, equipamentos e equipe. Embora o custo do ECD e do ensaio bidirecional seja equivalente, o ECD demanda mais espaço para mobilidade do equipamento na obra (Silva *et al.*, 2021).

Quanto aos resultados dos ensaios, foram realizadas quinze sondagens, com os valores de comprimento e diâmetro das estacas variando entre 15,95 e 19,10 m e entre 60 e 80 cm, respectivamente. Os resultados do ECD foram analisados com base em métodos de extrapolação de Van der Veen, Chin-Konder e Décourt para determinar a carga de ruptura das estacas. Comparando os métodos, o de Van der Veen apresentou menor dispersão nos valores de carga de ruptura, sendo mais conservador (Silva *et al.*, 2021).

3 ESTUDO DE CASO

Para análise deste artigo foi selecionada uma obra executada na cidade de Anápolis - GO. A obra é composta por duas torres residenciais com 24 (vinte e quatro) pavimentos cada, área de lazer e 2 (dois) pavimentos garagem. A fundação da obra foi definida como estaca hélice contínua monitorada, a qual foi projetada considerando um fator de segurança (FS) 2,0. Porém, para efeito de revisão do projeto para melhoria da execução, foi realizado um Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD) para validação dos dados e possibilidade de revisão do projeto, visando uma redução do fator de segurança calculado para a fundação (Sete Engenharia, 2023).

Como fundação de ensaio deste projeto, foram executadas 12 (doze) estacas hélice contínua de 50 (cinquenta) centímetros de diâmetro e profundidade aproximada de 16 (dezesesseis) e 20 (vinte) metros com concreto de 30 MegaPascal (Mpa) e slump 25 ± 3 cm. O solo predominante no local é um solo com predominância de silte e argila, onde se buscou uma capacidade de resistência a compressão de 118 tf (cento e dezoito tonelada-força) para a validação do ensaio. O referido ensaio buscou a redução do fator de segurança (FS) do projeto de fundação de 2,0 para 1,6.

A tabela 4 ilustra a tipologia das estacas usadas no ensaio. Estas estacas foram executadas considerando-se um fator de segurança de 1,6 (para comprovar a eficiência na prática da fundação utilizando um fator de segurança mais baixo do que o FS 2,0) e mantendo-se o uso do concreto de resistência de 30 MPa com slump 25 ± 3 cm, de característica mais fluida. Em resumo, ilustram-se os dados na tabela 4:

Tabela 4 - Tipologia das Estacas Ensaaiadas
(continua)

ESTACA	DIÂMETRO (cm)	COMPRIMENTO TOTAL (m)
TA ECD01	50	20,30
TA ECD02	50	20,20
TA ECD03	50	20,30
TA ECD04	50	20,30
TA ECD05	50	20,30

Tabela 4 - Tipologia das Estacas Ensaaiadas

ESTACA	DIÂMETRO (cm)	(conclusão)
		COMPRIMENTO TOTAL (m)
TB ECD01	50	16,20
TB ECD02	50	15,20
TB ECD03	50	16,20
TB ECD04	50	15,30
TB ECD05	50	16,30
TB ECD06	50	16,30
TB ECD07	50	16,30

Fonte: Sete Engenharia, 2023.

Para a realização do ensaio foram selecionados alguns pontos definidos em projeto para a execução das estacas hélice contínua de ensaio, sendo que estas foram executadas em um período de mais de 10 (dez) dias anteriormente a data de realização do ensaio. Em cada estaca foi feito um complemento de concretagem na altura de 1,50 metros acima do nível da superfície do terreno para posicionamento da aparelhagem e golpeamento do ensaio. Foram instalados alguns sensores/transdutores de deformação específica e um par de acelerômetros piezo-elétrico devidamente calibrados, sendo dispostos de forma diametralmente oposta no fuste da estaca para detectar e compensar os efeitos de flexão da variação no golpeamento. Com a aparelhagem montada, iniciou-se o ensaio com o golpeamento sequencial e com alturas de quedas cada vez maiores sobre o corpo de prova. Os sinais obtidos em cada golpeamento foram armazenados em um aparelho de medição denominado Analisador de Cravação de Estacas. Para aplicar os golpes foi utilizado um martelo em queda livre de massa de 50kN fixado em um bate-estaca sobre rolo, registrado na Figura 6:

Figura 6 - Montagem do aparelho bate-estaca sobre rolo



Fonte: Autores, 2023.

O martelo foi projetado em queda livre em alturas múltiplas de 30 (trinta) centímetros (0,30m; 0,60m; 0,90m; 1,20m; 1,50m; 1,80m; 2,10m; 2,40m; 2,70m; 3,00m a depender da estaca) em relação ao nível do topo da estaca hélice. Essas mesmas estacas foram concretadas de forma que atingissem a profundidade desejada e ainda mantivessem uma área acima do nível do solo com uma altura equivalente a 1,20 metros e golpeado em queda livre através do aparelho bate estaca conforme representado na Figura 7:

Figura 7 - Execução do ensaio PDA



Fonte: Autores, 2023.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

As estacas do projeto inicial foram projetadas considerando um fator de segurança 2,0, conforme referência para cálculo de fundações em estaca hélice contínua da empresa responsável pelo projeto. Para o ensaio de carregamento dinâmico, as doze estacas ensaiadas foram calculadas, projetadas e executadas considerando um fator de segurança de 1,6. Os resultados obtidos no ensaio de carga dinâmica foram compilados na tabela 5:

Tabela 5 - Resultados do Ensaio de Carregamento Dinâmico

ESTACA	RESISTÊNCIA (kN)			
	FSPFRADA	ORTIDA	I ATFRAI	PONTA
TA ECD 01	1180	1950	1744	206
TA ECD 02	1180	2650	2339	311
TA ECD 03	1180	2230	2031	199
TA ECD 04	1180	2100	1920	180
TA ECD 05	1180	2350	2125	225
TB ECD 01	1180	2428	2185	253
TB ECD 02	1180	2384	2076	308
TB ECD 03	1180	2355	2076	279
TB ECD 04	1180	2178	1872	306
TB ECD 05	1180	2404	2094	310
TB ECD 06	1180	2522	2227	295
TB ECD 07	1180	3306	2899	407

Fonte: Sete Engenharia, 2023.

Nota-se que houve uma descarga maior dos esforços estruturais por atrito lateral em comparação a resistência de ponta das estacas. Estes dados demonstram o aproveitamento das características siltosa e argilosa do solo com melhor resistência ao atrito lateral da estaca. Desta forma, a distribuição percentual da resistência entre atrito lateral e resistência de ponta se deu da seguinte maneira compilada na Tabela 6:

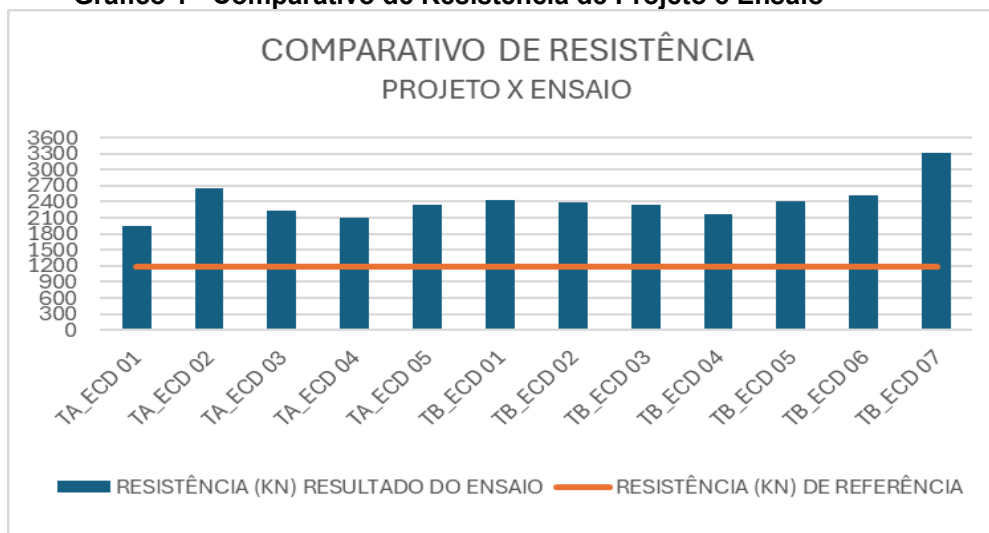
Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Carregamento Dinâmico

ESTACA	RESISTÊNCIA (KN)			RESISTÊNCIA (%)	
	OBTIDA	LATERAL	PONTA	LATERAL	PONTA
TA ECD 01	1.950	1.744	206	89,44%	10,56%
TA ECD 02	2.650	2.339	311	88,26%	11,74%
TA ECD 03	2.230	2.031	199	91,08%	8,92%
TA ECD 04	2.100	1.920	180	91,43%	8,57%
TA ECD 05	2.350	2.125	225	90,43%	9,57%
TB ECD 01	2.428	2.185	253	89,99%	10,42%
TB ECD 02	2.384	2.076	308	87,08%	12,92%
TB ECD 03	2.355	2.076	279	88,15%	11,85%
TB ECD 04	2.178	1.872	306	85,95%	14,05%
TB ECD 06	2.522	2.227	295	88,30%	11,70%
TB ECD 07	3.306	2.899	407	87,69%	12,31%
MÉDIA	2.369,50	2.091,88	277,621459	88,28%	11,72%

Fonte: Sete Engenharia, 2023.

A tabela 6 traz os dados para o comparativo da resistência da fundação. A referência de resistência estabelecida foi uma carga de resistência a compressão equivalente a 118 toneladas-força ou 1.180 quilonewtons. Esta referência foi definida pois este foi o menor valor de resistência obtido no comparativo entre a resistência da peça estrutural (a estaca de concreto) e a capacidade resistida pelo solo na profundidade projetada. Os valores obtidos compilados no gráfico 1 ilustram a disparidade entre os valores projetados e os dados empíricos do ensaio:

Gráfico 1 - Comparativo de Resistência de Projeto e Ensaio



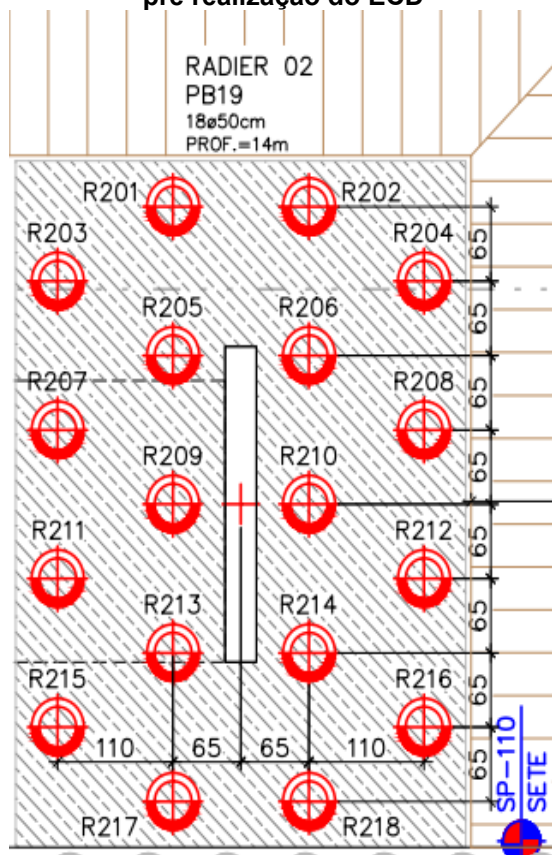
Fonte: Sete Engenharia, 2023.

Desta forma, nota-se que as resistências superaram a expectativa de projeto, variando entre 65,25% (estaca TA ECD 01) e 180,17% (estaca TB ECD 07) acima da referência de 1.180kN. Como os resultados se mostraram positivos, foi possível fazer a redução do fator de segurança de 2,0 para 1,6.

Ao verificar-se que os dados de resistência das estacas foram positivos com um fator de segurança menor, foi possível fazer a remodelação do projeto de fundação. Devido a alta resistência obtida nas estacas, a distribuição de carga da estrutura da edificação na fundação pode ser feita em uma quantidade menor de estacas por bloco. A mudança pode ser percebida no bloco PB19 (Figuras 7 e 8). Este bloco é um dos dois blocos da região de elevador de uma das torres da construção. Anteriormente previsto com um total de 18 (dezoito) estacas de diâmetro de 50 (cinquenta) centímetros e profundidade de 14 (quatorze) metros, o mesmo bloco passou a portar um total de 15 (quinze) estacas de diâmetro 50 (cinquenta) centímetros e profundidade de 15 (quinze) metros.

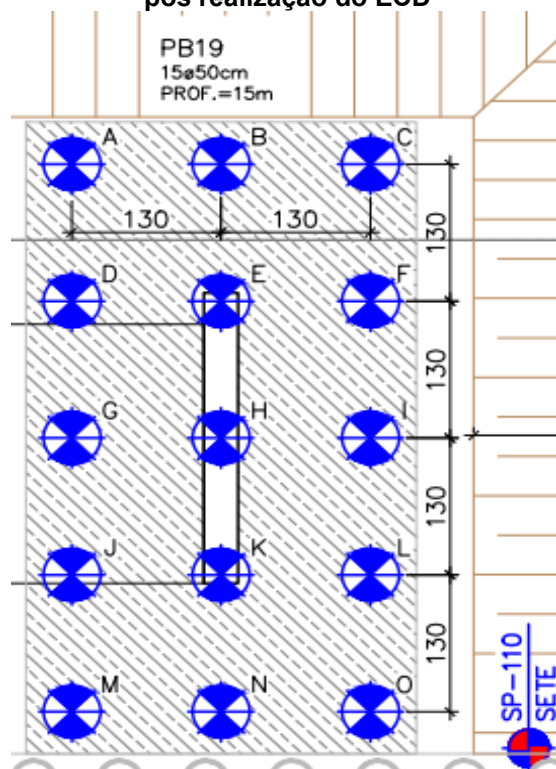
Com isto, conseguiu-se uma redução de quantitativo total de estacas, passando de 654 estacas totais e 10.891,00 metros lineares perfurados para 647 estacas totais e 10.554,00 metros lineares escavados. Com esta redução foi possível gerar uma economia estimada em mais de R\$360.000,00 na execução da fundação.

**Figura 7 - Projeto de bloco de fundação
pré realização do ECD**



Fonte: Sete Engenharia, 2023.

**Figura 8 - Projeto de bloco de fundação
pós realização do ECD**



Fonte: Sete Engenharia, 2023.

5 CONCLUSÃO

Em suma, os solos de Anápolis possuem uma característica silto-argilosa em grandes profundidades, o que faz com que as fundações de grandes edificações sejam definidas como estacas hélice contínua monitorada. Porém, por norma, o dimensionamento para projeto de fundação em estacas considera um fator de segurança alto, equivalente a 2,0, para evitar possíveis problemas durante a vida útil da edificação. Dessa forma, torna-se necessário, com o objetivo de economia, análises detalhadas na tentativa de redução do custo final do projeto de edificação com base em características reais do solo. Com vias deste objetivo, o presente trabalho demonstra a importância do ensaio em estacas para a tentativa de redução dos custos, fato estes comprovados nos artigos de estudo de caso apresentados no tópico 2.5 dos autores Souza e Albuquerque (2016) e Silva (2011).

Em seguida, realizou-se um estudo de caso em uma obra na cidade de Anápolis-GO, onde tinha-se, inicialmente, adotando um padrão da cidade e de norma com fator de segurança 2,0 para o projeto de estacas e com o ensaio, observou-se que a resistência foi maior, em média, em 100,81% em relação a resistência de compressão definida em projeto de 1.180 quilonewtons, superando o valor de projeto final, o que possibilitou uma redução no dimensionamento do quantitativo e da metragem total de estacas em 7 (sete) estacas e 337,00 (trezentos e trinta e sete) metros a menos para escavação, reduzindo o custo final da obra em mais de R\$360.000,00. O presente trabalho demonstra, portanto, a importância de não apenas confiar nas características exclusivas da norma e nos conhecimentos da região mas de também utilizar alguns testes empíricos e mais econômicos a fim de reduzir o custo final da edificação. Este trabalho demonstra também para os acadêmicos de Engenharia Civil que esse ensaio pode promover grande economia com os seus resultados, o que promove sua viabilidade. Tem-se ainda como

objetivo futuro analisar os impactos do ensaio na execução prática da fundação em canteiro e as melhorias que, acompanhado de demais dados da obra, promove para o cotidiano do canteiro.

REFERÊNCIAS

AOKI, N. (1997). **Estacas: Projeto e Execução**. Pini.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13208: ESTACAS - ENSAIO DE CARREGAMENTO DINAMICO**. Rio de Janeiro: ABNT (2007).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6122: PROJETO E EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES**. 4 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2022. 120 p.

BEZERRA, Bruno Oliveira *et al.* ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO: INDICAÇÃO DE APLICAÇÃO PARTINDO DO PRÉ-PROJETO. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - Unit - Sergipe**, Aracaju, v. 8, n. 2, p. 25-41, maio 2024.

Disponível em:

<https://periodicos.grupotiradentes.com/cadernoexatas/article/view/11920/5598>. Acesso em: 17 maio 2024.

DADA, T. L. (2019). **Ensaio Bidirecional em Estacas Moldadas In loco: Técnicas de Execução e Métodos de Interpretação com Aplicação a Casos de Obra**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DAS, Braja. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007.

FERREIRA, C.V., ALBIERO, J.H., LOBO, A.S.; CARVALHO, D. (1998). **Correlações entre atrito lateral medido em provas de carga, em estacas apiloadas, instrumentadas e resultados de ensaios SPT-T e CPT**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v.1, n.1, p. 3-18

GONÇALVES, S. F. **Estudo do comportamento à compressão de estacas metálicas curtas em solo sedimentar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2008.

HANAZAKI, Hideo. **Vantagens das Estacas em Hélice Contínua**. 2005.

MASSAD, F. (2008). **Aplicação de métodos dinâmicos na avaliação da capacidade de carga de estacas**. XXIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.

MITCHELL, J. K., & SOGA, K. (2013). **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey.

NIYAMA, S. (1991). **Provas de Carga Dinâmica em Estacas**. In: SEFE II, 2º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, São Paulo, vol.2.

NIYAMA, S.; AOKI, N.; (1998). **Verificação de Desempenho. Fundação: Teoria e Prática**, Hachich et al. (eds), Ed. Pini Ltda., São Paulo, Cap.20.

RODRIGUES B. C.; FILHO J. F. Estudo comparativo entre prova de carga dinâmica, carga estática de projeto e métodos dinâmicos em estacas de perfis metálicos: estudo de

caso. **TCC (Graduação em Engenharia) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia.** Belém-PA. 2012

SETE ENGENHARIA (Goiânia). Sete Engenharia (org.). **RELATÓRIO PDA 028-23.** 28. ed. Goiânia: Sete Engenharia, 2023. 92 p.

SETE ENGENHARIA (org.). **RELATÓRIO RL - 079/22.** Goiânia: Sete Engenharia, 2022. 45 p.

SILVA, Felipe Lima da *et al.* ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS BIDIRECIONAL E DE CARREGAMENTO DINÂMICO – ESTUDO COMPARATIVO. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 32-62, jun. 2021.

SILVA, T. **ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACAS NO COMPLEXO DE SUAPE.** 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco - Unicap, Recife, 2011.

SOUZA, E. S., & CUNHA, R. P. (2001). **Análise de provas de carga dinâmicas em estacas de fundação.** Revista Solos e Rochas, 24(2), 103-112.

VELLOSO, D. A., & LOPES, F. R. (2015). **Fundações: Teoria e Prática.** Oficina de Textos.