

ENSAIOS DE CARREGAMENTO EM FUNDAÇÕES: ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE PROJETOS DE FUNDAÇÕES

Daniel Santos Martins

Bacharel em Engenharia Civil (danielsm2837@gmail.com)

Guilherme Nunes Ferreira

Bacharel em Engenharia Civil (gnfguilherme45@gmail.com)

Luiz Carlos Barbosa Ferreira

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

Vanessa Eskavron Sousa

Bacharela em Engenharia Civil (vanessaeskavron@gmail.com)

Eduardo Martins Toledo

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (eduardo.toledo@ueg.br)

Aginaldo Antonio Moreira Teodoro da Silva

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA (agnaldo.silva@docente.unievangelica.edu.br)

RESUMO

A fundação é um elemento responsável por transferir as cargas das estruturas para o solo, auxiliando na segurança da estrutura. Portanto, a correta execução de uma fundação é importante para garantir estabilidade e segurança para a obra. Neste cenário, as estacas hélice contínua são fundações amplamente utilizadas no Brasil e, portanto, seguem regulamentações de normas técnicas para sua validação. Para assegurar que as estacas hélice contínua atendam aos requisitos de resistência de projeto e de qualidade de execução é necessário realizar ensaios que avaliem seu comportamento sob carga. Os principais métodos de ensaio são o carregamento estático e o dinâmico para determinar a capacidade máxima de carga das estacas e avaliar a resposta da interação estrutura-solo durante a instalação e sua capacidade de suportar cargas variáveis e de curto prazo, monitorando a integridade das estacas frente a forças dinâmicas como vibrações e impactos. Desta forma, ambos os ensaios podem fornecer uma verificação de desempenho completa da fundação profunda, permitindo validar projetos e execução simultaneamente enquanto realiza uma conferência da integridade e qualidade da execução justamente nos estágios iniciais da obra, evitando maiores danos. O presente trabalho traz uma análise da importância dos ensaios de carregamento para a execução de uma obra situada na cidade de Anápolis na sua busca por uma validação de sua fundação.

PALAVRAS-CHAVE: ensaios de fundações; carregamento dinâmico e estático; projeto de fundação.

1 INTRODUÇÃO

A fundação é um dos componentes iniciais em projetos de engenharia civil, responsável por transferir as cargas de uma estrutura para o solo de forma segura e eficiente. Em projetos de grande porte, como edifícios de múltiplos andares e pontes, a escolha da fundação adequada é essencial para garantir a estabilidade e a segurança ao longo da vida útil da estrutura. As estacas hélice contínua são uma solução amplamente utilizada por sua eficiência em diferentes condições geológicas e por sua capacidade de suportar cargas significativas (Gusmão, 2002).

Para assegurar que as estacas hélice contínua atendam aos requisitos projetuais e operem de maneira eficaz é necessário realizar ensaios que avaliem seu comportamento sob carga. Dois métodos fundamentais nesse processo são os ensaios de carregamento estático e dinâmico. O ensaio de carregamento estático é utilizado para determinar a capacidade de carga máxima das estacas, fornecendo dados sobre sua resposta a cargas contínuas e prolongadas. Este ensaio é essencial para garantir que a fundação possa suportar as cargas projetadas e atender às normas técnicas vigentes (Hachich *et al*, 1998).

A metodologia do *PDA* fundamenta-se no princípio da propagação de ondas, onde o impacto na estaca gera uma onda que se propaga ao longo de seu comprimento. Através dos sensores posicionados na cabeça da estaca, é possível registrar essas ondas, permitindo a concepção da força e do posicionamento da estaca durante o impacto. Desta forma, o *PDA* determina a capacidade de carga dinâmica, fornecendo uma estimativa mais ágil e eficiente da capacidade de carga estática da fundação. Para além disso, o ensaio permite a identificação de danos estruturais em tempo real ao monitorar variações nas ondas de tensão que podem indicar fraturas ou descontinuidades nas estações. Esse monitoramento é crucial para garantir que as estacas estejam em condições adequadas (Hachich *et al*, 1998).

O ensaio de carga estática, que consiste na aplicação gradual de cargas sobre uma estação enquanto se medem os deslocamentos resultantes. O objetivo principal deste ensaio é avaliar a relação carga versus deslocamento e determinar a carga máxima que a fundação pode suportar, garantindo sua estabilidade e segurança. Por sua vez, o ensaio de carregamento dinâmico é realizado para avaliar a resposta das estacas durante a instalação e sua capacidade de suportar cargas variáveis e de curto prazo (ABNT, 6122).

A segurança e a eficiência das fundações são aspectos cruciais na construção de edificações, principalmente em projetos de grande porte, como a obra residencial em Anápolis, Goiás, que se tornou o estudo de caso do presente trabalho. A escolha por uma fundação em estaca hélice contínua, visa otimizar a distribuição de cargas aproveitando as características do solo silto-argiloso da edificação (Sete Engenharia, 2023).

Para garantir que a fundação atenda às exigências estruturais do projeto, é fundamental a realização de ensaios de carga dinâmica e estática. O ensaio de carga dinâmica, conhecido como *Pile Driving Analyzer (PDA)*, desempenha um papel crucial ao monitorar o comportamento das estacas durante a cravação. Essa técnica permite que os engenheiros avaliem, em tempo real, a capacidade de carga dinâmica das estacas, fornecendo informações imediatas sobre sua integridade estrutural. A identificação precoce de possíveis anomalias é essencial para o ajuste das práticas de cravação, assegurando que as estacas atinjam a resistência esperada e cumpram as exigências do projeto.

Complementarmente, o ensaio de carga estática, regulamentado pela norma NBR 6122, é essencial para validar a capacidade de carga das estacas em condições controladas. A norma exige que um percentual representativo das estacas seja testado, garantindo que a fundação seja capaz de suportar as cargas previstas ao longo de sua vida útil. Este ensaio fornece uma validação adicional do desempenho da fundação,

aumentando a confiabilidade do projeto e contribuindo para a segurança da edificação (Aoki *et al*, 2013).

A combinação dos ensaios de carga dinâmica e estática é vital para a avaliação abrangente do desempenho das fundações. Enquanto o ensaio dinâmico oferece uma visão imediata e contínua durante o processo de cravação, o ensaio estático proporciona uma avaliação definitiva sob condições de carregamento estático. Essa sinergia entre os dois métodos assegura que as soluções adotadas sejam seguras, eficientes e em conformidade com as normas técnicas vigentes (Hachich *et al*, 1998).

Em suma, a aplicação dos ensaios de carregamento é um passo que valoriza o projeto, além de garantir a integridade estrutural e a durabilidade da obra. Essa prática reflete o compromisso com a qualidade na engenharia civil, assegurando que a fundação atenda às exigências de segurança e eficiência, garantindo de forma empírica a qualidade da execução dessa etapa primordial do empreendimento (Chow; Small, 2005).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a NBR 6122/2022 - Projeto e Execução de Fundações -, as fundações profundas são elementos de fundação cuja ponta situa-se apoiada em uma profundidade igual ou superior a oito vezes a sua menor dimensão de planta, e esta profundidade precisa ser superior também a 3 metros. Além disto, as fundações profundas realizam a transferência da carga da estrutura para o solo por dois meios: a resistência de ponta e/ou a resistência de fuste. A resistência de ponta é responsável pela descarga dos esforços no terreno através da ponta ou base da estaca, enquanto a resistência de fuste, também conhecida como atrito lateral, é responsável pela dissipação da carga através do comprimento lateral do fuste (corpo cilíndrico da estaca) no terreno (ABNT, 2022).

Dentro do grupo das fundações profundas há um tipo de fundação que se destaca devido a seu amplo uso: o grupo das estacas. As estacas podem ser executadas por meio de cravação ou por meio de perfuração. Dentre as estacas implantadas por perfuração, um dos tipos mais comumente executados são as estacas hélice contínua monitorada (Hachich *et al*, 1998).

2.1 ESTACAS

As estacas são elementos de fundação profunda projetados para transferir as cargas de uma construção para camadas mais profundas do solo, caracterizadas por uma maior capacidade de suporte. Esses elementos podem ser executados em concreto, aço ou madeira, sendo instalados por cravação ou moldagem in loco. O sistema de fundação em estacas é constituído pelo solo de fundação, pelas estacas e pelo elemento de transição, que pode ser um bloco ou um radier, responsável por receber as cargas da superestrutura e transmiti-las ao solo por meio das estacas. Dessa forma, o comportamento do sistema depende das interações entre esses componentes, exigindo uma análise cuidadosa para garantir o desempenho estrutural adequado (Chow; Small, 2005).

Para uma fundação ser classificada como fundação profunda necessita-se atender ao seguinte critério: possuir uma profundidade igual ou superior a oito vezes a sua menor dimensão, sendo que esta profundidade precisa ser superior também a três metros no local onde a ponta se apoia. Dentre as fundações profundas, destacam-se dois grupos: as estacas e os tubulões, cuja aplicação é recomendada em solos com baixa capacidade de carga superficial e/ou elevada compressibilidade, tornando inviável o uso de fundações rasas. Assim, as cargas estruturais são transmitidas para camadas mais profundas do subsolo, caracterizando as fundações profundas como soluções viáveis para projetos,

especialmente no caso das estacas, que oferecem diversas vantagens. Dentre as principais vantagens podem ser citadas (Gusmão, 2002):

- A resistência as cargas podem ser realizadas pela lateral do corpo da fundação, pela ponta ou de forma mista, através de uma combinação de atrito lateral e resistência de ponta;
- As cargas estruturais são transferidas nas maiores profundidades do subsolo;
- Podem realizar a função de cortinas de contenção, resistindo a empuxos laterais por estacas justapostas, estacas pranchas ou paredes de diafragma;
- Função de reforço estrutural para o solo, como realizado pelas estacas mega, ou de melhoramento do solo, como feito pelas estacas de compactação.

Na Engenharia Civil, estacas são elementos estruturais profundos essenciais usados para garantir a estabilidade e a segurança de uma construção quando o solo superficial não possui capacidade suficiente para suportar as cargas impostas pela estrutura. Estes elementos são projetados para transferir e distribuir as cargas da edificação para camadas de solo mais profundas e resistentes, alcançando substratos que podem suportar as forças de compressão e, ocasionalmente, de cisalhamento (Aoki *et al.*, 2013).

Estacas são caracterizadas por sua estrutura vertical e por serem inseridas no solo até atingir camadas com maior capacidade de carga. Elas podem ser confeccionadas com diferentes materiais, como concreto, aço ou madeira, dependendo das condições específicas do local e dos requisitos da construção. O concreto, por exemplo, pode ser utilizado em estacas pré-moldadas ou moldadas no local, enquanto o aço é frequentemente usado em estacas tubulares ou perfiladas. As estacas de madeira, embora menos comuns atualmente, ainda encontram aplicação em projetos com restrições orçamentárias ou em terrenos específicos (Gusmão, 2002).

A instalação das estacas pode ser realizada de várias maneiras, dependendo do tipo e das condições do solo. Estacas cravadas são inseridas por impacto ou vibração, um método que é eficiente para estacas pré-moldadas de concreto ou aço. No caso das estacas moldadas in loco, o processo envolve a perfuração do solo e o preenchimento do furo com o fluido do corpo da estaca, podendo este ser um concreto ou uma argamassa (Aoki *et al.*, 2013).

Esses elementos desempenham seu papel na transferência de cargas verticais e, em alguns casos, de cargas horizontais, para garantir que a estrutura seja suportada adequadamente. Estacas também podem melhorar as condições do solo ao redor da construção, especialmente em terrenos fracos ou saturados. Elas atuam não apenas como suportes, mas também como elementos de reforço para estabilizar o terreno (Hachich *et al.*, 1998).

2.1.1 Classificação

Dentro do grupo das estacas ocorrem subdivisões quanto a execução e uso das estacas. De forma geral, pode-se dividir as estacas em dois grandes grupos: as estacas moldadas in loco e as estacas pré-moldadas. Estacas moldadas in loco são estacas cuja execução é realizada perfurando-se o terreno no qual será instalada e preenchendo-o com concreto, argamassa ou calda de cimento, podendo ser integralmente ou parcialmente armada (ABNT, 2022). Já as estacas pré-moldadas são fundações em estaca cravadas no solo por meio de percussão, prensagem ou vibração, sendo, geralmente, compostas por um único elemento estrutural, como madeira, aço ou concreto, ou pela junção de dois desses elementos (Hachich *et al.*, 1998). Dentre os exemplos de estacas moldadas in loco e pré-moldadas temos as seguintes estacas:

- Estaca tipo Franki: tipo de estaca cravada desenvolvida na Bélgica, é feita de concreto armado moldada a qual é introduzida no solo através de contínuos

golpes de um pilão em queda livre numa bucha de concreto seco ou de seixo rolado (Hachich *et al*, 1998);

- Estaca tipo Hélice Contínua Monitorada: estaca de concreto moldada in loco, sendo executada por meio de um trado contínuo, o qual injeta o concreto através de uma haste central do trado ao mesmo tempo em que promove a remoção do trado do terreno escavado. Comumente usada no meio urbano, é amplamente indicada para obras industriais e de centros urbanos, além de poder ser usada também como elemento de contenção (Hachich *et al*, 1998);
- Estaca Raíz: estaca moldada in loco através da perfuração do solo e preenchimento com argamassa de cimento e areia e de sua armadura (ABNT, 2022);
- Estaca de Madeira: exemplo de estaca pré-moldada e cravada, é um dos tipos de fundação mais antigos empregados na construção civil, sendo instaladas por meio de cravação. Atualmente, é um modelo de fundação em desuso devido a dificuldade de se obter madeira de boa qualidade e devido a sua capacidade reduzida de resistência a carga das estruturas das edificações atuais (Hachich *et al*, 1998);
- Estaca Metálica: estaca pré-moldada cravada, seu corpo é constituído de elemento metálico industrializado do tipo perfil soldado ou laminado tais como elementos de seção I ou H ou tubos e chapas dobrados, com ou sem costura de trilhos (ABNT, 2022);
- Estaca pré-moldada de Concreto: sendo feita de um dos materiais mais resistentes utilizados na construção civil, a estaca pré-moldada de concreto é normalmente executada em concreto armado ou protendido adensado, podendo ser instalada por meio de cravação ou de adensamento por centrifugação (Hachich *et al*, 1998).

2.1.2 Critérios de Escolha

A seleção do tipo de fundação mais adequado para o empreendimento é um passo que afeta diretamente a segurança e estabilidade da estrutura, tornando-se, assim, um fator decisivo para o projeto estrutural. Anteriormente, fundação eram peças enterradas que faziam a intermediação entre a estrutura e o terreno, sendo fundamentais devido a sua função de transmitir, da forma mais propícia, as cargas estruturais para o solo seguindo a forma mais adequada de garantir no processo uma base que seja resistente aos esforços e sólida a ponto de manter a integridade da estrutura (Gusmão, 2002).

Para realizar a escolha mais adequada do tipo de fundação correta levam-se em consideração alguns fatores, tais como (Gusmão, 2002):

- Análise das características do solo: de acordo com as características do solo, as estacas podem ser empregadas de modo a resistir a cargas mais altas ou de modo a terem maior resistência por atrito lateral;
- Esforços nas fundações: com o estudo prévio das cargas advindas dos pilares e da estrutura da obra, define-se o tipo de fundação mais viável operacionalmente e economicamente para este tipo de obra;
- Características do local em particular: considerar fatores que impactam, tais como facilidade de acesso e locomoção de operários e maquinários;
- Restrições ambientais e de vibrações: leva-se em consideração características das construções da vizinhança e possíveis impactos às mesmas, presença de subsolos, sensibilidade a vibrações e danos pré-existentes no local;
- Aspectos econômicos e de prazo: custo de instalação e operação para execução das estacas, considerando-se para isto custos de maquinário, mão de obra e

materiais (avaliar disponibilidade e custo dos materiais na proximidade ao local da execução).

2.2 FUNDAÇÃO EM ESTACA HÉLICE CONTÍNUA

A fundação em estaca hélice é um tipo de fundação profunda executada com estacas de concreto moldadas no local (*in loco*) por meio de um trado contínuo, o qual injeta o concreto através do furo que há no centro de seu trado. Este tipo de fundação foi desenvolvida nos Estados Unidos entre o final dos anos 1960 e início dos anos 1970, sendo difundida e aprimorada na Europa e no Japão durante a década de 1980. (Hachich *et al.*, 1998).

O primeiro registro de execução da estaca hélice contínua no Brasil data de 1987. Na ocasião, relata-se o uso de equipamentos desenvolvidos em território nacional e com capacidade de executar estacas até 15 metros de profundidade. Na metade final da década de 1990, o país passou a importar massivamente maquinário do continente europeu, em especial vindos da Itália, para a execução das estacas com profundidade de 24 metros ou menos (Hachich *et al.*, 1998).

2.2.1 Critérios de Escolha

A escolha do tipo de estaca para um projeto de edificação depende de vários critérios importantes. A primeira consideração é a característica do solo. A capacidade de suporte do solo, a profundidade das camadas resistentes e as condições de saturação são fatores cruciais na determinação do tipo e da profundidade das estacas necessárias. Além disso, o tipo e a magnitude das cargas que a estrutura irá suportar devem ser avaliados, pois isso influencia diretamente o dimensionamento e a escolha do tipo de estaca. As condições ambientais, como a presença de água subterrânea e a corrosividade do solo, também desempenham um papel significativo na escolha do material e do método de instalação das estacas. Por fim, aspectos econômicos e logísticos, incluindo o custo das estacas e a viabilidade técnica do método de instalação, devem ser considerados para garantir a solução mais eficiente e econômica para o projeto (Hachich *et al.*, 1998).

Em resumo, a seleção e o uso de estacas na engenharia civil envolvem uma análise detalhada das condições do solo, das cargas da estrutura, das características ambientais e dos fatores econômicos. Cada tipo de estaca tem suas próprias vantagens e limitações, e a escolha apropriada é fundamental para garantir a estabilidade e a durabilidade da edificação (Aoki *et al.*, 2013).

2.2.2 Vantagens e Desvantagens

Amplamente utilizada no Brasil, a fundação em estaca hélice contínua monitorada é um modelo que está se tornando economicamente mais acessível no decorrer dos anos devido a sua popularização. Alguns fatores positivos que influenciam na sua escolha como modelo de fundação são (Chow; Small, 2005):

- Baixa produção de ruídos e vibrações: tornando-a mais indicada em áreas populosas;
- Operação abaixo do nível do lençol freático: devido ao concreto ser bombeado pelo interior do trado diretamente no local de perfuração, isto faz com que, na maioria das vezes, a estaca hélice trabalhe em um nível inferior ao lençol freático, sofrendo menor interferência do mesmo no processo;

- Alta produtividade: a elevada capacidade de produção pode promover a redução de forma significativa do cronograma de execução com o auxílio de apenas uma equipe de trabalho;
- Adaptabilidade de perfuração a diversidade de terrenos: na maioria dos tipos de solos, o maquinário apresenta capacidade de trabalho. Isto se torna exceção quando em solos com presença de matacões e rochas.

Já no que se refere as desvantagens do emprego de uma fundação em estaca hélice contínua podem ser citados (Chow; Small, 2005):

- Locomoção em terrenos íngremes: devido ao grande porte da máquina perfuratriz, a área de trabalho é preferível ser plana e de fácil movimentação;
- Necessidade de maquinário auxiliar: ao remover o trado do solo, o mesmo traz consigo parte do solo escavado e empolado, dificultando o acesso ao furo da estaca para a inserção da armadura. Desta forma, torna-se necessário ter o auxílio de um maquinário que possa realizar a limpeza do local, tal como uma pá carregadeira;
- Custo de mobilização do equipamento: por mais que o custo da execução da estaca hélice tenha reduzido ao longo dos anos, ainda assim, a depender do quantitativo de estacas a serem executadas, o custo de mobilização pode não ser justificável se aplicado a uma pequena quantidade de elementos de fundação;
- Limitação do comprimento da armação: em casos de estacas com grandes profundidades, caso sua armação também seja de grande comprimento (como 18 metros, por exemplo), isso torna mais difícil a inserção da armadura.

2.3 ENSAIOS DE CARREGAMENTO EM ESTACAS

Ensaio de carga em estacas é um procedimento experimental utilizado para determinar a capacidade de carga e o comportamento estrutural das estacas de fundação. Este teste é essencial para assegurar a segurança e a eficácia das fundações em projetos de construção (Hachich *et al.*, 1998).

Existem dois principais métodos para a realização de ensaios em estacas (Hachich *et al.*, 1998):

- Teste de Carga Estática: Consiste na aplicação de uma carga controlada sobre a estaca e na medição da resposta da estaca, como assentamento ou deformação, até atingir sua capacidade máxima de carga ou até ocorrer uma falha. Esse método é amplamente descrito na NBR 16903 (2022), que fornece diretrizes específicas para o projeto e execução de fundações.
- Teste de Carga Dinâmica: Envolve a aplicação de uma carga dinâmica na estaca, geralmente através de um martelo ou outro dispositivo de impacto, e a análise da resposta da estaca. Esse método é útil para avaliar o comportamento da estaca durante a cravação e verificar sua integridade.

Os ensaios de carga das estacas têm por objetivo a verificação de desempenho da fundação. Para isto, faz-se necessário demonstrar que o comportamento da fundação é correspondente ao previsto em projeto, confirmando, na execução, os cálculos e projeções do especialista. Para garantir que a estaca cumpra as previsões de projeto aplica-se um conjunto de procedimentos e técnicas em campo que são regidos por normas técnicas. Esses procedimentos podem ser aplicados através de métodos estáticos ou dinâmicos, destrutivos ou não destrutivos. Quando os resultados dos procedimentos correspondem ao que foi previsto no projeto ou superam os valores estimados considera-se que o desempenho da estrutura é satisfatório (Hachich *et al.*, 1998).

A verificação do desempenho da fundação faz parte das verificações do comportamento do conjunto formado pelos elementos estruturais da superestrutura da obra. No caso da estaca hélice contínua, o resultado da verificação do seu desempenho tem influência da execução da fundação, da sua interação com a estrutura e interação com o solo no qual se encontra. Considerando isto como uma cadeia de eventos, a efetividade da fundação depende da interação de cada componente deste elo estrutural. O principal aspecto estrutural a verificar é a segurança à ruptura. Ao executar os ensaios de carga estática e dinâmica, visa-se anotar a resistência do elemento e sua integridade após a exposição as cargas de ensaio, as quais devem ser comprovadas durante ou após a execução do serviço de fundação. Com os resultados, objetiva-se minimizar a probabilidade de ruptura da estaca nas cargas de projeto (Hachich *et al.*, 1998).

2.3.1 Importância dos Ensaios

O ensaio em estacas desempenha um papel fundamental na engenharia civil e geotécnica, especialmente na construção de fundações. Sua importância pode ser destacada em várias áreas (Aoki *et al.*, 2013):

- **Determinar a Capacidade de Carga:** Um dos objetivos primários dos ensaios em estacas é medir a capacidade de carga das estacas. Isso envolve avaliar a carga máxima que a estaca pode suportar antes de atingir um estado de falha ou assentamento excessivo. Esta informação é crucial para garantir que a fundação possa suportar as cargas esperadas da estrutura.
- **Verificar a Integridade da Estaca:** Os ensaios ajudam a verificar a integridade estrutural das estacas, identificando possíveis defeitos como rachaduras, falhas de cravação ou outros problemas que possam comprometer sua eficácia. Testes dinâmicos, por exemplo, podem detectar problemas não visíveis por inspeção visual.
- **Avaliar o Comportamento da Estaca sob Carga:** Os ensaios fornecem informações sobre como a estaca se comporta quando submetida a cargas. Isso inclui observar o assentamento da estaca, a deformação e o comportamento geral da estaca em relação às cargas aplicadas. Esses dados ajudam a prever o desempenho da estaca ao longo da vida útil da estrutura.
- **Confirmar as Condições do Solo:** Os ensaios em estacas permitem a avaliação das condições do solo ao redor da estaca, como resistência e compressibilidade. Esse conhecimento é essencial para ajustar o projeto da fundação às características reais do solo, garantindo uma adequada interação entre a estaca e o solo.
- **Validar e Ajustar Projetos de Fundações:** Com base nos resultados dos ensaios, os engenheiros podem validar ou ajustar os cálculos e os projetos das fundações. Isso assegura que o projeto está adequado às condições reais e que a fundação atenderá aos requisitos de segurança e desempenho.
- **Prevenir Problemas e Riscos Futuramente:** Realizar ensaios em estacas ajuda a identificar problemas potenciais antes da construção ou durante as fases iniciais da obra. Isso contribui para prevenir falhas graves e problemas de assentamento que poderiam levar a custos adicionais e riscos para a segurança da estrutura.
- **Assegurar a Conformidade com Normas:** Os ensaios garantem que a execução das estacas esteja em conformidade com normas técnicas e regulamentações, como a NBR 6122. A conformidade com essas normas é fundamental para garantir a qualidade e a segurança das fundações.

2.3.2 Vantagens e Objetivos

Além de sua eficiência, o ensaio de carga dinâmica, também conhecido como ECD na sua sigla em português, pode oferecer uma solução mais econômica em comparação com os métodos tradicionais de ensaio de fundações. A necessidade reduzida de equipamentos adicionais e a rapidez com que os dados obtidos resultam em um custo-benefício superior, especialmente em obras de grande porte onde a reprodução dos ensaios estáticos pode ser financeiramente inviável. Além disso, a possibilidade de identificar falhas ou defeitos nas estacas durante a cravação permite que correções sejam feitas de imediato, evitando custos adicionais relacionados a reparos ou substituições tardias (Aoki *et al*, 2013).

Por fim, o ECD é uma ferramenta fundamental para garantir a segurança estrutural das obras, oferecendo uma análise abrangente do comportamento das situações em condições dinâmicas. A sua capacidade de fornecer uma estimativa precisa da capacidade de carga e de identificar defeitos estruturais em tempo real faz com que o ensaio de carga dinâmica seja ampliado em projetos de engenharia civil em todo o mundo, tornando-se um padrão para a avaliação de estacas cravadas. Contudo, é importante destacar que, embora o *PDA* seja um método eficiente, ele ainda depende de calibrações e ajustes, especialmente em solos com características geotécnicas complexas, onde as estimativas dinâmicas podem não ser específicas com precisão ao comportamento estático da fundação (Aoki *et al*, 2013).

Em resumo, o ensaio de carga dinâmica é um método sonoro que se destaca pela sua capacidade de fornecer informações rápidas e precisas sobre o desempenho de estações durante o processo de cravação. Sua aplicabilidade em obras de grande porte, aliada à eficiência no diagnóstico da capacidade de carga e da integridade estrutural das estacas, faz dele uma ferramenta indispensável na engenharia de fundações profundas. Embora apresente algumas limitações, como a necessidade de deficiência em solos mais complexos, o *PDA* permanece uma das técnicas mais práticas e econômicas para a avaliação de estações, garantindo a segurança e a eficiência das obras de infraestrutura (Gusmão, 2002).

O objetivo principal do ensaio de carga dinâmica é realizar a avaliação eficiente e precisa da capacidade de carga dinâmica das estacas, além de verificar sua integridade estrutural durante o processo de cravação. Este método é amplamente utilizado em projetos de fundações profundas devido à sua capacidade de fornecer informações em tempo real, ou que facilita a tomada de decisões durante a execução da obra. A possibilidade de monitorar e analisar o comportamento da estaca à medida que é cravada no solo torna este ensaio uma ferramenta essencial para garantir a qualidade e a segurança de estruturas como edifícios altos, pontes, viadutos e outras grandes obras de infraestrutura (Aoki *et al.*, 2013).

Ao realizar o ensaio *PDA*, objetiva-se medir as forças dinâmicas que atuam sobre a estaca durante o impacto do martelo, além de avaliar a posição resultante dessa força. Essas consequências, que envolvem a coleta de dados de variação e deformação, permitem calcular a capacidade de carga dinâmica da estação e prever seu desempenho sob condições estáticas de carregamento. Assim, o objetivo final do *PDA* é fornecer uma avaliação precisa e detalhada do desempenho das estacas antes que a estrutura seja concluída, minimizando riscos de falhas ou deformações excessivas (Hachich *et al.*, 1998).

Outro objetivo fundamental do *PDA* é identificar possíveis defeitos estruturais nas estacas durante a cravação. Devido às forças de impacto aplicadas, estas podem sofrer danos, como fraturas, descontinuidades ou esmagamentos. Esses defeitos podem comprometer a integridade estrutural da fundação e, conseqüentemente, a estrutura que será apoiada por ela. O *PDA* é capaz de detectar esses problemas em tempo real,

garantindo que ações corretivas sejam tomadas de maneira imediata, evitando prejuízos mais graves ou a necessidade de intervenção após a conclusão da obra (Aoki *et al*, 2013).

Junto ao ECD tem-se também a execução do ensaio de carga estática, que objetiva determinar a carga máxima que uma fundação pode suportar. Esse teste é importante para garantir que a fundação possa sustentar o peso da estrutura sem comprometer sua estabilidade ao fim do ensaio de verificação de desempenho. Além de realizar a medição da carga máxima, o ensaio fornece informações sobre o comportamento da fundação sob diferentes níveis de carga. Isso inclui a observação de recalques e deslocamentos que ocorrem quando a carga é aplicada de forma gradual. Esses dados são importantes para avaliar como a fundação se comporta ao longo do tempo e para garantir que ela funcione adequadamente seguindo os padrões da NBR 16903. Em resumo, o ensaio ajuda a garantir que a fundação seja segura e eficaz para a construção planejada (ABNT, 2020).

2.4 NORMAS DE ENSAIOS DE CARGA

Para a verificação do desempenho pode-se realizar ensaios de estudo do elemento de forma isolada, de um grupo de elementos ou de forma conjunta pela superestrutura e a fundação. Devido a questões de custo, normalmente realiza-se o estudo dos elementos de forma isolada. Para a realização dessa verificação, existe uma diversidade de técnicas que podem ser aplicadas para fazer sua análise. Dentre estas, podemos destacar as técnicas de ensaio de carregamento. Esses ensaios podem se distinguir em duas formas principais: o ensaio de carga dinâmica e o ensaio de carga estática (Hachich *et al*, 1998).

2.4.1 Ensaio de Prova de Carga Dinâmica

O ensaio *PDA* (*Pile Driving Analyzer* / Analisador de Cravação, em português) é um método utilizado na engenharia civil, especialmente no contexto de fundações profundas, para monitorar e analisar o comportamento dinâmico de estacas durante o processo de cravação ou recalque. Este método se baseia na instrumentação das estacas com sensores que captam as ondas de tensão geradas pelo impacto de um martelo na cabeça da estaca. Os dados obtidos a partir dessas pesquisas permitem aos engenheiros determinar, em tempo real, parâmetros fundamentais para o projeto e execução de fundações, como a capacidade de carga dinâmica e a integridade estrutural da estação (Hachich *et al*, 1998).

De forma mais detalhada, o *PDA* é um ensaio que se baseia no princípio da propagação de ondas. Quando um impacto é aplicado à cabeça de uma estaca, seja durante sua cravação ou em um recalque, uma onda de tensão é gerada e se propaga ao longo do comprimento da estaca. Essa onda é o resultado de um carregamento dinâmico axial, onde os sensores instalados, geralmente na cabeça da estaca, captam essas ondas e, a partir da densidade de deformação e destruição, é possível determinar parâmetros como a força e a posição que a estaca experimenta durante o impacto. O equipamento *PDA* processa esses dados em tempo real, fornece aos engenheiros informações avançadas sobre o desempenho da situação durante a cravação, como sua capacidade de suportar cargas e sua integridade estrutural (Aoki *et al*, 2013).

Um dos principais objetivos do ensaio *PDA* é a determinação da capacidade de carga dinâmica da estaca. A mesma refere-se à capacidade da estaca de suportar cargas aplicadas sob as condições de impacto do martelo, e é uma estimativa preliminar da capacidade de carga estática, ou seja, da capacidade que a estação terá de suportar as cargas de serviço ao longo da vida útil da estrutura. A vantagem dessa abordagem é a rapidez com que os resultados podem ser obtidos, em contraste com métodos mais demorados, como o ensaio de carregamento estático, que requer mais tempo e recursos para ser executado (Aoki *et al*, 2013).

O ensaio *PDA* também permite a avaliação da integridade estrutural da estaca. Durante a cravação, as estacas estão sujeitas a diversos esforços que podem causar danos estruturais, como fraturas ou descontinuidades ao longo do seu comprimento. O *PDA* é capaz de identificar esses defeitos em tempo real, monitorando as variações nas ondas de tensão e detectando anomalias no comportamento da estaca. Isso é essencial para garantir que a estaca esteja em condições adequadas para suportar as cargas previstas no projeto, evitando falhas estruturais futuras que possam comprometer a segurança da obra (Hachich *et al*, 1998).

O processo de execução do ensaio *PDA* começa com a instrumentação da estação, que envolve a instalação de sensores específicos de tração e deformação em sua cabeça. Esses sensores são conectados ao sistema *PDA*, que coleta e processa os dados gerados durante a cravação. O impacto do martelo na cabeça da estaca gera uma onda de detalhes que se propaga ao longo do fuste da estaca, refletindo-se em diferentes pontos conforme encontra variações de material ou defeitos. Essas reflexões são captadas pelos sensores e provas pelo *PDA* para determinar a resposta da estaca ao impacto. A partir dos dados de tração e deformação, o sistema calcula a força e o deslocamento experimentados pela estaca, o que permite estimar sua capacidade de carga e integridade estrutural. O *PDA* utiliza algoritmos baseados em modelos teóricos, como a Teoria de Smith, para calcular a capacidade de carga dinâmica. Essa teoria baseia-se na suposição de que a estaca e o solo podem ser modelados como um sistema de massa-mola-amortecedor, onde as forças geradas pelo impacto do martelo causam uma deformação do metalurgia na estaca, transmitindo a carga para o solo. O comportamento do solo ao redor da estaca é fundamental para determinar a capacidade de carga, e o *PDA* utiliza os dados sonoros para calcular a resistência oferecida pelo solo à medida que a estaca é cravada (Aoki *et al*, 2013).

A capacidade de realizar o ensaio durante a própria cravação das estações é uma das grandes vantagens do *PDA*. Diferentemente dos ensaios estáticos, que desativam a interrupção das obras para a aplicação de cargas lentas e graduais na estaca, o *PDA* oferece uma alternativa mais ágil e eficiente, fornecendo dados imediatos sem a necessidade de interrupção do processo de cravação. Isso é especialmente útil em projetos de grande escala, como pontes, edifícios altos e obras de infraestrutura, onde o tempo é um fator crítico e a avaliação rápida e precisa das fundações é essencial para garantir a continuidade dos trabalhos sem atrasos significativos (Gusmão, 2002).

Além de sua eficiência, o ensaio *PDA* também oferece uma solução mais econômica em comparação com os métodos tradicionais de ensaio de fundações. A necessidade reduzida de equipamentos adicionais e a rapidez com que os dados obtidos resultam em um custo-benefício superior, especialmente em obras de grande porte onde a reprodução dos ensaios estáticos pode ser financeiramente inviável. Além disso, a possibilidade de identificar falhas ou defeitos nas estacas durante a cravação permite que correções sejam feitas de imediato, evitando custos adicionais relacionados a reparos ou substituições tardias (Gusmão, 2002).

Por fim, o *PDA* é uma ferramenta muito utilizada para garantir a segurança estrutural das obras, oferecendo uma análise abrangente do comportamento das situações em condições dinâmicas. A sua capacidade de fornecer uma estimativa precisa da capacidade de carga e de identificar defeitos estruturais em tempo real faz com que o ensaio *PDA* seja ampliado em projetos de engenharia civil em todo o mundo, tornando-se um padrão para a avaliação de estacas cravadas. Contudo, é importante destacar que, embora o *PDA* seja um método altamente eficiente, ele ainda depende de calibrações e ajustes, especialmente em solos com características geotécnicas complexas, onde as estimativas dinâmicas podem não ser específicas com precisão ao comportamento estático da fundação (Aoki *et al*, 2013).

Em resumo, o ensaio *PDA* é um método sonoro que se destaca pela sua capacidade de fornecer informações rápidas e precisas sobre o desempenho de estações durante o processo de cravação. Sua aplicabilidade em obras de grande porte, aliada à eficiência no diagnóstico da capacidade de carga e da integridade estrutural das estacas, faz dele uma ferramenta que pode se tornar útil e popular na engenharia de fundações profundas (Gusmão, 2002).

2.4.1.1 Objetivo

O objetivo principal do ensaio *PDA* (*Pile Driving Analyzer*) é avaliar de maneira eficiente e precisa a capacidade de carga dinâmica das estações, além de verificar sua integridade estrutural durante o processo de cravação. Este método é amplamente utilizado em projetos de fundações profundas devido à sua capacidade de fornecer informações em tempo real, ou que facilita a tomada de decisões durante a execução da obra. A possibilidade de monitorar e analisar o comportamento da estação à medida que é cravada no solo torna o ensaio *PDA* uma ferramenta essencial para garantir a qualidade e a segurança de estruturas como edifícios altos, pontes, viadutos e outras grandes obras de infraestrutura (Chow; Small, 2005).

Ao realizar o ensaio *PDA*, o objetivo é medir as forças dinâmicas atuantes sobre a estaca durante o impacto do martelo, além de avaliar a posição resultante dessa força. Essas consequências, que envolvem a coleta de dados de variação e deformação, permitem calcular a capacidade de carga dinâmica da estação e prever seu desempenho sob condições estáticas de carregamento. Assim, o objetivo final do *PDA* é fornecer uma avaliação precisa e detalhada do desempenho das estacas antes que a estrutura seja concluída, minimizando riscos de falhas ou deformações excessivas (Sete Engenharia, 2023).

Outro objetivo fundamental do *PDA* é identificar possíveis defeitos estruturais nas estacas durante a cravação. Devido às forças de impacto aplicadas, estas podem sofrer danos, como fraturas, descontinuidades ou esmagamentos. Esses defeitos podem comprometer a integridade estrutural da fundação e, conseqüentemente, a estrutura que será apoiada por ela. O *PDA* é capaz de detectar esses problemas em tempo real, garantindo que ações corretivas sejam tomadas de maneira imediata, evitando prejuízos mais graves ou a necessidade de intervenção após a conclusão da obra (Gusmão, 2002).

A eficiência do *PDA* reside no fato de que ele permite uma análise rápida e em campo, rápida o tempo de resposta e o custo associado a outros métodos mais lentos e complexos, como o ensaio de carregamento estático. Os ensaios estáticos, embora precisos, exigem uma logística mais elaborada, envolvendo uma interrupção das atividades de cravação, instalação de equipamentos pesados, e um período longo de espera para a obtenção de resultados. Já o *PDA*, ao fornecer resultados quase instantâneos, permite que os engenheiros ajustem o processo de cravação em tempo real, garantindo uma maior eficiência no cronograma da obra e uma redução significativa de custos (Gusmão, 2002).

No contexto de fundações profundas, a avaliação da capacidade de carga das estacas é essencial para garantir que elas suportem as cargas impostas pela estrutura ao longo de sua vida útil. Uma falha na avaliação precisa da capacidade de carga pode levar ao subdimensionamento ou sobredimensionamento das fundações, ambas com consequências negativas. O subdimensionamento pode resultar em recalques excessivos ou falhas de fundação, enquanto o sobredimensionamento pode aumentar significativamente os custos da obra sem uma justificativa técnica adequada. O uso do *PDA/ECD* contribui para um dimensionamento mais preciso e otimizado, proporcionando maior segurança e economia para o projeto (Hachich *et al*, 1998).

O ensaio *PDA* também é utilizado para avaliar o desempenho das estações em diferentes condições geotécnicas. Solos heterogêneos, com variações abruptas de resistência ou com camadas de materiais de baixa capacidade de suporte, podem gerar desafios adicionais para o cravamento de estacas. Nesses casos, o *PDA* oferece uma solução eficaz ao permitir a avaliação da interação entre o solo e a estaca em cada estágio do processo de cravação. Isso permite que os engenheiros identifiquem rapidamente possíveis zonas de fraqueza no solo ou problemas relacionados à descoberta da estaca, ajustando o procedimento conforme necessário (Aoki *et al*, 2013).

Finalmente, o objetivo do ensaio *PDA* está relacionado à prevenção de riscos e à garantia de segurança estrutural (Gusmão, 2002). Ao fornecer uma análise em tempo real e permitir a identificação precoce de problemas, o *PDA* contribui para a redução dos riscos associados a falhas nas fundações, prevendo a segurança dos usuários da edificação. Essa característica torna o ensaio *PDA* uma ferramenta com um potencial de popularização de seu uso em projetos de engenharia civil para garantir a confiabilidade das fundações nos estágios iniciais da obra (Aoki *et al*, 2013).

2.4.1.2 Metodologia

O ensaio de carga sonora, também conhecido como ensaio acústico, é um método utilizado para avaliar a integridade de estacas e outras estruturas em fundações profundas. Este tipo de ensaio baseia-se na propagação de ondas sonoras ao longo da estaca, com o objetivo de detectar possíveis falhas, descontinuidades ou defeitos internos no material, como fissuras, cavidades ou variações na densidade. O princípio fundamental do ensaio é que as ondas sonoras se comportam de maneira diferente quando encontram materiais com propriedades variadas, sendo refletidas ou alteradas em presença de defeitos. Essa técnica tem ganhado cada vez mais espaço devido à sua natureza não destrutiva e à possibilidade de ser realizada com rapidez e precisão. O procedimento envolve a aplicação de um impulso sonoro, geralmente gerado por um martelo de impacto ou outro dispositivo similar, na cabeça da estaca. A resposta do material é captada por sensores dispostos ao longo da estaca ou em sua base. Essas informações são processadas por *softwares* que interpretam as ondas de retorno e permitem a identificação de eventuais irregularidades (Aoki *et al*, 2013).

Esse método se distingue pela sua capacidade de fornecer dados de integridade estrutural sem a necessidade de grandes intervenções no processo de cravação ou instalação das estacas. A técnica envolve a aplicação de golpes sucessivos com variações de energia no martelo, enquanto os sensores instalados na estaca capturam os dados necessários para a análise. A medição da resistência à cravação é feita em tempo real, com os resultados sendo processados por *softwares* especializados que utilizam a teoria da pesquisa de onda para calcular a capacidade de carga e a integridade da estaca. Este método é conhecido como método *CAPWAP*. Essa evolução no controle da cravação das estacas representou um avanço ao se comprovar a melhoria da abordagem simplista da medida da nega por uma técnica mais detalhada e precisa, capaz de fornecer uma visão abrangente do comportamento da fundação sob carregamento (Hachich *et al*, 1998).

O ensaio *PDA* utiliza dois tipos de sensores principais: o transdutor de deformação específico e o acelerômetro. O transdutor de deformação mede a tensão causada pela deformação do material da estaca durante o golpe do martelo, enquanto o acelerômetro registra a radiação das partículas da estaca. Esses sensores são essenciais para determinar a força e a velocidade associada ao impacto. Os dados obtidos são analisados pelo *PDA*, que calcula a evolução da força em relação ao tempo, utilizando as propriedades do material da estaca, como o módulo de especificação e a área da seção transversal na região (Sete Engenharia, 2023; ABNT, 2007).

A prova de carga dinâmica se destaca por ser um ensaio não destrutivo, ou seja, não comprometer a integridade estrutural da estação durante o processo de avaliação. Isso é especialmente vantajoso em locais com condições geotécnicas complexas, onde os ensaios de carga estática podem não representar com precisão a capacidade de carga real. A utilização dessa técnica no Brasil trouxe importantes benefícios para o controle de qualidade das fundações, permitindo ajustes em tempo real durante a cravação e proporcionando maior segurança aos projetos (Gusmão, 2002).

A evolução dessa técnica no Brasil, desde sua aplicação inicial em plataformas marítimas até seu uso em projetos de fundações terrestres, destaca a importância crescente da prova de carga dinâmica como uma ferramenta auxiliar e confiável na tomada de decisões em projetos de fundações profundas. Hoje, a prova de carga dinâmica é reconhecida como uma técnica precisa e eficiente, sendo utilizada para monitorar e ajustar a cravação de estacas em uma gama de condições e estacas (Hachich *et al.*, 1998).

2.4.2 Ensaio de Carregamento Estático

O ensaio de carga estática em fundações profundas consiste em aplicar esforços sobre a fundação para obter-se os valores dos deslocamentos correspondentes a cada força aplicada. Os esforços aplicados podem ser esforços de tração, compressão ou flexocompressão, os quais são medidos através de células de carga ou manômetros, os quais são instalados junto ao conjunto hidráulico. Estes valores de deslocamento obtidos são analisados para a validação do comportamento da fundação caso ela reaja positivamente (dentro do esperado) quando submetida aos esforços previstos sem deformação excessiva (ABNT, 2022).

No Brasil, relata-se o primeiro uso deste ensaio em 1928, para estudo da fundação do edifício Martinelli, em São Paulo. Historicamente também podem ser citados os ensaios de carga estática realizados para verificação das estacas tipo Franki nas obras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo: a Estação da Estrada de Ferro Noroeste, em Bauru, 1936, e o Instituto de Resseguros do Brasil, no Rio de Janeiro, 1942 (Hachich *et al.*, 1998).

2.4.2.1 Objetivo

De acordo com a ABNT NBR 16903, o ensaio de carregamento estático, também denominado prova de carga estática, tem como objetivo avaliar o comportamento da relação carga versus deslocamento do elemento de fundação, permitindo a estimativa da capacidade de carga real. Resumidamente, o ensaio consiste na aplicação gradual de carga sobre a estaca e no registro dos deslocamentos correspondentes (ABNT, 2020).

As cargas são aplicadas utilizando macacos hidráulicos, cuja capacidade deve ser aumentada em 20% em relação ao máximo de carregamento previsto. Esses macacos, operados por bombas elétricas ou manuais, não devem causar choques ou vibrações durante o processo. Tanto as cargas aplicadas quanto os deslocamentos e o tempo associado devem ser monitorados rigorosamente (ABNT, 2020).

O ensaio tem como objetivo principal determinar a carga máxima que uma fundação pode suportar, conforme definido pela NBR 16903. Esse teste é crucial para garantir que a fundação possa sustentar o peso da estrutura sem comprometer sua estabilidade. Além de medir a carga máxima, o ensaio fornece informações sobre o comportamento da fundação sob diferentes níveis de carga. Isso inclui a observação de recalques e deslocamentos que ocorrem quando a carga é aplicada de forma gradual. Esses dados são importantes para avaliar como a fundação se comporta ao longo do tempo e para garantir que ela funcione

adequadamente. Em resumo, o ensaio ajuda a garantir que a fundação seja segura e eficaz para a construção planejada (ABNT, 2020).

A metodologia do ensaio envolve a aplicação controlada de cargas e a medição das respostas da fundação. Segundo a NBR 16903, essas medições devem ser precisas para avaliar o comportamento real da fundação. Monitorar os recalques e deslocamentos fornece uma visão detalhada sobre o desempenho da fundação em condições práticas. Esses resultados são essenciais para o projeto e a análise da segurança da construção (ABNT, 2020).

O ensaio de carregamento estático da fundação, também conhecido como prova de carga tradicional ou estática, é um ensaio similar ao estudo Tensão x Deformação, onde realiza-se um estudo do complexo comportamento do conjunto solo-fundação sob a influência da modificação que se provoca no solo devido aos efeitos da aplicação da carga da infraestrutura e da execução da fundação. Este ensaio, aprimorado através do tempo, tornou-se mais preciso, rápido e econômico, além de obter notável confiabilidade pela similaridade com a situação real da ação das cargas da estrutura sobre o conjunto da fundação executado (Hachich *et al.*, 1998).

Os ensaios realizados tem por principal finalidade a obtenção de dados de ruptura e recalque que sirvam para verificação do desempenho do elemento de fundação sob ação da carga de projeto. Porém, apesar de ser um ensaio que possui maiores similaridades com uma situação real da superestrutura, deve-se salientar que o mesmo desconsidera alguns aspectos que podem influenciar o comportamento do solo ou da fundação estudados, como históricos de carregamento, por exemplo (Hachich *et al.*, 1998).

2.4.2.2 Metodologia

A prova de carga estática pode realizar o carregamento de quatro formas (ABNT, 2020):

A. Lento (PCE):

O carregamento lento, também conhecido como Prova de Carga Estática (PCE), é um método de ensaio utilizado para avaliar o comportamento de fundações, como estacas e tubulões, sob aplicação gradual de cargas estáticas. Esse tipo de ensaio é amplamente empregado para determinar a capacidade de carga, a rigidez e o deslocamento das fundações em condições controladas (Hachich *et al.*, 1998).

De acordo com a ABNT NBR 16903/2020, o carregamento é aplicado de forma progressiva e mantido em níveis predefinidos, com monitoramento constante para registrar os deslocamentos ao longo do tempo. A carga é medida por meio de dispositivos como manômetros ou células de carga, enquanto os deslocamentos são registrados com extensômetros de alta precisão. Este método permite traçar curvas carga versus deslocamento que indicam o desempenho estrutural da fundação (ABNT, 2020).

O PCE é considerado um dos métodos mais precisos para validar a capacidade de carga real de uma fundação, pois fornece dados diretos sobre o comportamento da estrutura em campo. A análise dos resultados da prova de carga estática é essencial para identificar aspectos como a interação solo-estrutura e possíveis recalques excessivos (Sete Engenharia, 2023).

B. Rápido (PCR):

A Prova de Carga Rápida (PCR) é um método amplamente utilizado para avaliar a capacidade de carga ou a resistência de fundações, como estacas e sapatas, em projetos de engenharia civil. Diferentemente das provas de carga estática convencionais, a PCR aplica forças de maneira rápida, geralmente por meio de sistemas hidráulicos ou métodos

dinâmicos, simulando as condições reais de carregamento que a fundação enfrentará em serviço. Esse procedimento é especialmente útil quando há necessidade de resultados rápidos, com menor custo e logística simplificada. Apesar de sua eficiência, a interpretação dos resultados da PCR requer critérios rigorosos, uma vez que o comportamento da fundação sob cargas aplicadas rapidamente pode diferir do comportamento sob carregamentos estáticos (Hachich *et al*, 1998).

C. Misto (lento seguido de rápido) (PCM):

A Prova de Carga Mista (PCM) é um procedimento híbrido para avaliação do desempenho de fundações profundas, combinando características das provas de carga estática (lenta) e dinâmica (rápida). O ensaio é conduzido em duas fases: na primeira, aplica-se uma carga gradativa permitindo a obtenção de parâmetros relacionados ao comportamento de longo prazo, como recalques residuais e deformações elásticas. Na segunda fase, realiza-se uma aplicação de carga rápida, utilizando atuadores hidráulicos ou outros sistemas dinâmicos, para avaliar a resposta estrutural em condições transitórias de carregamento (ABNT, 2020)

Esse método apresenta como principal vantagem a integração de dados provenientes de diferentes regimes de carregamento, proporcionando uma avaliação mais abrangente da capacidade de carga e da rigidez da fundação. Além disto, ainda demonstram que a combinação de métodos estáticos e dinâmicos na PCM resulta em maior confiabilidade na interpretação dos resultados, sobretudo em solos de comportamento não-linear (Aoki *et al*, 2013).

D. Cíclico, lento (PCCL) ou rápido (PCCR):

A Prova de Carga Cíclica (PCC) é um ensaio empregado para avaliar o comportamento de fundações profundas ou rasas submetidas a ciclos de carregamento e descarregamento, simulando condições de solicitação repetitiva. Esse método é essencial em projetos onde a fundação está sujeita a esforços dinâmicos, como os gerados por ondas, máquinas industriais, tráfego cíclico ou eventos sísmicos. A PCC pode ser classificada em dois tipos principais, dependendo da taxa de aplicação das cargas (ABNT, 2020):

- Prova de Carga Cíclica Lenta (PCCL): Caracteriza-se pela aplicação gradativa de ciclos de carga e descarga, conforme diretrizes normativas como a ABNT NBR 12131:2010. Esse procedimento permite estudar o comportamento quase estático da fundação, analisando fenômenos como acúmulo de recalques plásticos, variação da rigidez ao longo dos ciclos e dissipação de pressões intersticiais no solo;
- Prova de Carga Cíclica Rápida (PCCR): Utiliza ciclos de carga aplicados em alta frequência ou velocidade, geralmente por sistemas hidráulicos ou equipamentos de impacto. Estudos, como os de Fellenius (2001), indicam que a PCCR é eficaz para simular cargas transitórias ou de curta duração, permitindo avaliar a resposta estrutural em situações dinâmicas, como vibrações industriais ou impacto de cargas móveis.

Os resultados da PCC, tanto lenta quanto rápida, incluem dados sobre deformações acumuladas, comportamento histerético e mudanças na rigidez dinâmica da fundação. Esses parâmetros são críticos para o dimensionamento de fundações em solos de comportamento não-linear, contribuindo para maior confiabilidade estrutural em condições de carregamento complexo (Aoki *et al*, 2013).

De modo geral, as cargas aplicadas sobre a fundação profunda devem ser similares a solicitação prevista pelo projetista, sendo aplicadas em intervalos de tempo de parcelas significativas de carga. Cada estágio de carga é executado e mantido até que o controle de

recalque indique que atingiu-se a estabilidade; em outras palavras, as variações atingiram valores onde se tornam nulas ou próximas a nulidade devido aos pequenos valores obtidos. Para fins didáticos, a estabilização é definida como a condição em que, ao se realizar duas medições consecutivas do recalque, o valor observado não excede 5% do recalque total registrado durante o mesmo estágio de carregamento (Aoki *et al.*, 2013). Cada estágio de carregamento deve ter um período mínimo de 30 minutos. Essa relação percentual é fundamental para assegurar a confiabilidade das medições e a estabilidade do sistema em análise (Hachich *et al.*, 1998).

O carregamento final do ensaio necessita atingir o dobro da carga de projeto ou admissível para a estrutura ensaiada para a conclusão do ensaio. À parte de se obter o carregamento final, o ensaio só pode ser dado como concluído caso haja a ruptura da estrutura ou uma deformação excessiva que impeça o prosseguimento do ensaio (ABNT, 2020).

Entre a instalação da estaca e o início do carregamento da estaca precisa-se respeitar um período mínimo de três dias para solos com comportamento não coesivo e dez dias para solos com comportamento coesivo. Precisa-se também, para o caso de estacas moldadas in loco, garantir um prazo mínimo para que a obtenção da resistência do elemento estrutural seja compatível com a carga máxima do ensaio. Outra parte do processo de preparação da estaca de ensaio é a preparação do topo do elemento de fundação profunda, também conhecido como “cabeça de estaca”, para que a estaca hélice não seja comprometida durante a execução do ensaio (ABNT, 2020).

Para a montagem do sistema de medição é permitido por norma a utilização de vigas de madeira ou metálicas limitadas a 12 metros de comprimento, apoiadas sobre piquetes de metal ou madeira embutidos no solo para a garantia da estabilidade do sistema. Para a medição do deslocamento vertical do topo das estacas ou do bloco de coroamento utiliza-se o deflectômetro, um aparelho que pode ser digital ou analógico e montado em quatro unidades por dois eixos perpendiculares em relação as vigas de referência. Com a estrutura das vigas e do deflectômetro montados faz-se uma estrutura de proteção contra as intempéries sobre a estrutura do ensaio, podendo ser montada com o auxílio de uma lona ou com outro material que ofereça proteção contra o sol, chuva e outras possíveis intempéries. Para uma execução mais precisa do ensaio, recomenda-se que não haja vibrações em um raio de 30 metros do ponto de carregamento. Com a estrutura disposta, prossegue-se para a aplicação dos carregamentos conforme descrito no processo do carregamento lento ao início deste tópico (Hachich *et al.*, 1998).

3 ESTUDO DE CASO

Para estudo sobre a utilização dos ensaios foi analisada uma obra residencial situada na cidade de Anápolis, Goiás. A obra em questão consiste em duas torre residencial de 25 pavimentos, sendo 4 (quatro) pavimentos de área comum (estacionamento, lojas, áreas de uso comum e de lazer) e 21 (vinte e um) pavimentos habitacionais. No solo, de caráter silto-argiloso, foi realizada a execução de fundação em estaca hélice contínua monitorada. A escolha da fundação profunda foi promovida de modo a aproveitar as características do solo já que o solo mais fino, com caráter silto-argiloso, apresenta uma melhor distribuição da carga ao longo do fuste da estaca, diminuindo a carga descarregada na ponta da fundação. Para verificar o desempenho do projeto de fundação foram realizados dois ensaios: os ensaios de carga dinâmica (também conhecido pelo seu nome em inglês *Pile Driving Analyzer - PDA*) e de carga estática. De acordo com a NBR 6122, é necessário realizar um ensaio de carga estática em, no mínimo, 1% das estacas da fundação (ABNT, 2022). Além do ensaio de prova de carga estática foi executado o ensaio

de prova de carga dinâmica para validação do projeto de fundação. Para a realização de ambos os ensaios foram executadas estacas hélice contínua monitoradas com diâmetro de 50 centímetros, utilizando concreto de 30 MPa de resistência e slump definido na faixa de 25 ± 3 cm (Sete Engenharia, 2023).

Visando obter resultados que pudessem validar a fundação da obra residencial do estudo de caso, foram realizados os dois ensaios de carregamento. Desta forma, pode-se realizar o carregamento dinâmico, para validação do projeto, e o carregamento estático, para validação da estrutura (Sete Engenharia, 2024).

3.1 ENSAIO DE CARGA DINÂMICA

Na obra em questão, o ensaio de carregamento dinâmico foi executado para a validação de um projeto de fundação. O projeto inicial previa uma configuração de estacas hélice projetadas com fator de segurança (FS) equivalente a 2,0. O ensaio, portanto, foi executado para validar um novo projeto onde se reduzia o FS para um valor igual a 1,6. Para esta validação foram dispostas cinco estacas hélice, posicionadas arbitrariamente sobre o terreno de modo a cobrir a maior área possível para a obtenção dos resultados. Estas estacas de ensaio foram projetadas com 50 centímetros de diâmetro e profundidade média de 16 metros, projetadas com fator de segurança equivalente a 1,6 para a finalidade de validação de um novo layout de projeto. Para a execução do *PDA* as estruturas foram dispostas de forma arbitrária sobre o terreno a fim de que fosse possível obter dados sobre a maior área do solo da construção. Após escavadas as estacas hélice, aguardou-se um período superior a dez dias corridos para a preparação do topo dos elementos de fundação. O mesmo foi preparado com a concretagem de um complemento da estaca com a altura de 1,50 metros (um metro e cinquenta centímetros) acima do nível da superfície do terreno por onde a máquina bate-estaca se locomoveria (Sete Engenharia, 2023).

Com a concretagem do complemento das estacas e sua cura concluídas, deu-se prosseguimento a preparação para o ensaio. No complemento da fundação fez-se uma lixação do concreto em um dos lados para a instalação dos transdutores/sensores de deformação. Além destes sensores são também instalados um par de acelerômetros posicionados diametralmente opostos na face da estaca para fazerem a leitura e detecção dos efeitos de flexão da variação no golpeamento dos corpos de prova. Com as estacas preparadas e a aparelhagem instalada (Figura 01), inicia-se o ensaio de carga estática com o golpeamento sequencial promovido pela máquina “bate-estaca” sobre o topo do corpo de prova e, a cada golpe, elevava-se a altura de queda do martelo de ensaio, cuja massa era equivalente a 50kN (Figura 02). 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. Com o impacto da queda nas alturas determinadas, os aparelhos instalados no fuste da estaca faziam a leitura dos sinais, os quais foram armazenados em um aparelho conhecido como Analisador de Cravação de Estacas (Sete Engenharia, 2023).

Conforme pode se observar nas Figuras 01 e 02 a seguir, a contratada optou pela execução do ensaio com o auxílio de um aparelho popularmente conhecido como “bate estaca” para o golpeamento dinâmico. A NBR 13208 recomenda a utilização de um martelo hidráulico ou de um aparelho com martelo em queda livre, opção que foi escolhida pela contratada por ser mais econômica (Sete Engenharia, 2023).

Figura 01 – Montagem do aparelho bate estaca sobre rolo



Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Figura 02 – Execução do ensaio *PDA*



Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

3.2 ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA

Com o projeto de fundação validado, foram executadas as estacas de fundação com o auxílio do trado perfuratriz. Em sua maioria, as estacas hélice contínua da obra em questão se tratavam de estacas com 50 (cinquenta) centímetros de diâmetro na região da torre residencial. De toda a fundação da obra, foram definidas duas estacas para o ensaio de carga estático, ensaio obrigatório definido pela norma NBR 6122 (ABNT, 2022).

O ensaio de prova de carga estática é realizado para a verificação da resistência das estacas executadas na obra. Para isto, verifica-se, com base na resistência informada em projeto, a referência de carga por estaca para a validação do projeto. No caso da obra estudada, a referência é de 240 tonelada-força. Para executar o ensaio, faz-se a escavação do entorno das estacas a serem ensaiadas. Na configuração do projeto da obra, ensaiaram-se dois blocos de 9 estacas de 50 centímetros de diâmetro, dispostas em 3 linhas com 3 estacas cada. A estaca central deste bloco foi submetida a um esforço de compressão, enquanto 4 estacas periféricas no bloco foram analisadas quanto aos esforços de tração. Para isto, montou-se uma estrutura de vigas metálicas sobre as estacas a serem ensaiadas. As vigas que compunham esta estrutura eram uma viga metálica central, com 6,0 metros de comprimento, 1,10 metros de altura e 5,6 toneladas de massa, onde se apoiaram duas vigas metálicas secundárias com 3,50 metros de comprimento, 0,75 metros de altura e 2,0 toneladas de massa, cuja montagem se encontra ilustrada na Figura 03 a seguir (Sete Engenharia, 2024):

Figura 03 – Montagem das vigas metálicas do ensaio PCE



Fonte: SETE ENGENHARIA, 2024.

Com as vigas metálicas instaladas, fez-se a soldagem das longarinas com os feixes de quatro barras de aço CA-50 25,0mm das estacas com as referidas longarinas do ensaio, conforme ilustrado na Figura 04 abaixo (Sete Engenharia, 2024):

Figura 04 – Soldagem e montagem do sistema de reação



Fonte: SETE ENGENHARIA, 2024.

Ressalta-se que esta estrutura dos vergalhões foi soldada, concretada com a estaca e montada para que alcançassem as vigas e, assim, pudessem ser registradas as reações das estacas periféricas a tentativa de recalque da fundação ensaiada (Sete Engenharia, 2024).

Com o entorno das estacas preparado e protegido das intempéries e com as vigas metálicas sobrepostas nas estacas, inicia-se a aplicação de carga e leitura dos dados do ensaio. Com o auxílio de um computador e de uma balança, a qual informava a carga aplicada sobre a estrutura, foram feitas as medições dos dados que alimentam o ensaio e servem de base para o resultado (Sete Engenharia, 2024; ABNT, 2020).

Vale ressaltar que, para que a realização do ensaio pudesse ser efetuada, fez-se necessário que se tivesse o resultado do rompimento dos corpos de prova do concreto utilizado nas estacas. Para a permissão do ensaio, o concreto necessitava obter, no mínimo, a resistência do FCK projetado; resultado, este, o qual foi obtido (Sete Engenharia, 2024).

O ensaio de carregamento estático do tipo lento foi programado para ser executado em 13 (treze) estágios com um carregamento inicial de, aproximadamente, 10% da carga total de ensaio. Nos estágios seguintes, fez-se o acréscimo de 10% em cada carga até se atingir a carga de ensaio de 240 tonelada-força ou 2.400 quilonewtons. Concluída a etapa de carregamento, a mesma foi mantida por 12 horas para, após, iniciar-se o processo de descompressão em 4 estágios (Sete Engenharia, 2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a conclusão dos ensaios foram gerados os relatórios com os resultados obtidos em campo. Para melhor discorrer, os ensaios terão seus resultados discutidos separadamente. A análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios *PDA* e *PCE* é fundamental para avaliar a eficácia do projeto de fundação em termos de economia e desempenho estrutural. Neste contexto, partiu-se de um projeto inicial que, com um fator de segurança equivalente a 2,0, previa a execução de 654 estacas. Contudo, visando a otimização de custos sem comprometer a segurança, o ensaio foi conduzido em estacas hélice contínua de 50 centímetros de diâmetro, com profundidade média de 16 metros e um fator de segurança reduzido para 1,6 (Sete Engenharia, 2023).

Os resultados da análise *CAPWAP*, que serão discutidos em detalhes a seguir, revelam a importância do monitoramento dinâmico durante a cravação das estacas. Esse método permite registrar e interpretar as forças atuantes ao longo do tempo, por meio do sinal de velocidade capturado durante o ensaio. A compreensão do comportamento do solo é crucial para converter esses dados em estimativas precisas de força, possibilitando uma avaliação mais detalhada do desempenho das estacas sob as cargas aplicadas (Sete Engenharia, 2023).

Além disso, os dados coletados indicam que a resistência das estacas é predominantemente lateral, refletindo as características geológicas do solo local, que favorecem o atrito lateral e limitam a resistência de ponta. A análise contínua e aprimorada do modelo *CAPWAP*, juntamente com a aplicação do método *CASE*, fornecem uma visão abrangente sobre a mobilização de resistência das estacas, permitindo uma avaliação confiável da integridade estrutural e da capacidade de carga da fundação (Sete Engenharia, 2023). Dessa forma, esta seção apresentará os resultados detalhados dos ensaios realizados, incluindo a análise dos dados obtidos, a interpretação dos índices de resistência e o impacto desses resultados para a obra.

4.1 ENSAIO DE CARGA DINÂMICA

O ensaio *PDA* foi realizado com a finalidade de redução do fator de segurança utilizado na produção do projeto de fundação para, desta forma, validar um projeto mais econômico enquanto se mantém a segurança e estabilidade da estrutura. Desta forma, obtiveram-se os resultados da análise *CAPWAP* apresentados na Tabela 01 (Sete Engenharia, 2023):

Tabela 1 – Resultados da análise *CAPWAP*

Estaca	Diâmetro (cm)	Resistência (kN)			Resistência (%)			Nº do Golpe
		Total	Lateral	Ponta	Lateral	Ponta	Jc	
TA_ECD01	50	1950	1744	206	89	11	0,36	4
TA_ECD02	50	2650	2339	311	88	12	0,47	9
TA_ECD03	50	2229	2031	198	91	9	0,41	4
TA_ECD04	50	2100	1920	180	91	9	0,37	4
TA_ECD05	50	2350	2125	225	90	10	0,49	6

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Sobre os resultados da Tabela 01, observa-se que as estacas apresentaram uma resistência majoritariamente lateral. De modo geral, nota-se que a resistência lateral obteve resultados em torno de 90% da resistência total, enquanto a resistência de ponta obteve valores próximos a apenas 10% (Sete Engenharia, 2023). Estes valores justificam a escolha da fundação em estaca hélice pois, conforme informado no relatório do ensaio sobre os resultados do ensaio *SPT* (*Standard Penetration Test*/Teste Padrão de Penetração, popularmente conhecido como Sondagem a Trado Percussão), trata-se de um solo silto

argiloso, um perfil de solo que é caracterizado por sua baixa resistência para a distribuição da carga sobre a sua superfície mas de elevada resistência a dissipação de carga através do atrito lateral do fuste do corpo do elemento estrutural com o solo. Desta forma, promoveu-se a melhor associação para o conjunto solo-estrutura (Gusmão, 2002).

Associado a estes valores, a tabela 01 também fornece os valores obtidos para o índice J_c , reconhecido como uma constante de amortecimento do perfil do solo. Esta constante é um indicativo referencial da capacidade do solo de resistir e dissipar a energia dos golpes do carregamento dinâmico, sendo que o valor que prevalece é o resultado do solo de assentamento da ponta da estaca. Quanto maior o resultado do índice J_c , maior também é a capacidade de resistência do perfil de solo ao golpeamento. Os autores Hachich e associados fornecem os valores referentes a constante de amortecimento para cada tipo de solo conforme representado no Quadro 01 abaixo (Hachich *et al.*, 1998):

Quadro 01 – Valores da constante de amortecimento por tipo de solo

J_c	Tipo de solo
0,10 – 0,15	Areia pura
0,15 – 0,25	Areia siltosa
0,25 – 0,40	Silte
0,40 – 0,70	Argila siltosa
0,70 – 1,00	Argila

Fonte: Hachich *et al.*, 1998.

Comparando os resultados obtidos na Tabela 01 com os valores referenciais fornecidos por Hachich no Quadro 01 podemos observar como os dados complementam as informações fornecidas sobre o solo. As constantes obtidas no ensaio *PDA* para o solo da região corroboram com o resultado da sondagem já que os valores para a constante de amortecimento obtidos na Tabela 01 variam entre 0,36 e 0,49 (Sete Engenharia, 2023). Quando comparados com o Quadro 01, nota-se que estes valores habitualmente são relativos a solos classificados como siltosos e/ou silte argilosos, o que corresponde a análise realizada durante a sondagem do terreno (Hachich *et al.*, 1998).

Quanto ao modelo *CAPWAP*, apresentado na Tabela 01, vale destacar que o mesmo é iterativamente aprimorado para se obter o melhor ajuste entre a curva de força medida e força calculada. Além destes dados, a aparelhagem capta também as tensões máximas obtidas na região dos sensores (tabela 02), que servem para indicar a maior tensão gerada no local de instalação dos sensores e demonstrar sua sensibilidade as leituras (Sete Engenharia, 2023):

Tabela 2 – Tensões máximas durante o ensaio

Estaca	Tensões de compressão média dos sensores (MPa)	Tensão de compressão máxima dos 2 sensores (MPa)	Tensão de tração (MPa)
TA_ECD01	50	0,36	2,1
TA_ECD02	50	0,47	4,4
TA_ECD03	50	0,41	2,2
TA_ECD04	50	0,37	1,7
TA_ECD05	50	0,49	2,3

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Outro método utilizado para calcular as resistências do ensaio foi o método *CASE*. O método *CASE* constitui uma abordagem simplificada que permite a estimativa imediata da resistência estática de estacas submetidas a impacto dinâmico, por meio da análise das medidas de força e velocidade registradas em seu topo. Este método foi desenvolvido com base na solução analítica da equação da onda, utilizando correlações empíricas obtidas a partir de resultados de provas de carga estática (AOKI *et al.*, 2013). Quando submetidos ao

método *CASE*, temos recalculados os valores da seguinte maneira apresentado na Tabela 03 abaixo:

Tabela 3 – CASE – Resistências máximas mobilizadas

Estaca	Resistência (kN)	BTA (%)	Nº do Golpe
TA_ECD01	1959	100	4
TA_ECD02	2576	100	9
TA_ECD03	2233	78	4
TA_ECD04	2091	79	4
TA_ECD05	2342	76	6

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Os dados calculados referem-se a resistência mobilizada, podendo corresponder ou não a ruptura geotécnica. De acordo com a literatura, resultados abaixo de 60% para o índice BTA indicam que a peça estrutural encontra-se rompida; porém, esta classificação é arbitrária e não implica em uma inutilização definitiva da estrutura, devendo ser consultada a finalidade de utilização da estaca e o local do dano. Além do índice BTA como indicador de integridade, outro fator que deve ser ressaltado é a identificação da integridade visual dos complementos das estacas de ensaio, as quais não apresentaram anomalias significativas durante o ensaio, apresentando-se intactas visualmente em seu exterior. Como os corpos de prova apresentaram valores para o índice BTA superiores a 75%, descarta-se a hipótese de ruptura da estrutura ensaiada (Aoki *et al*, 2013).

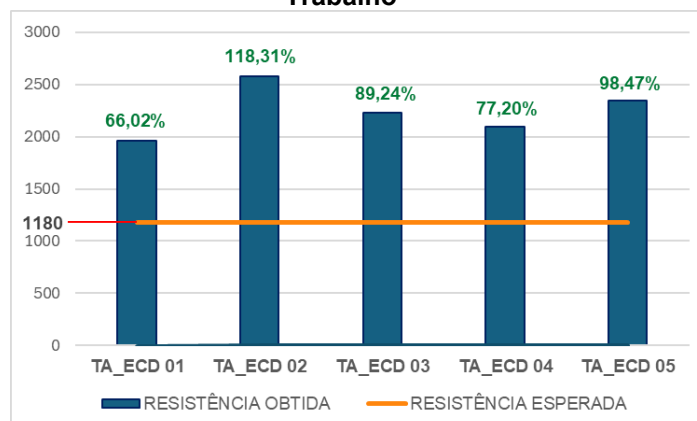
Com base nos resultados obtidos do ensaio de carregamento dinâmico, pode-se formular um comparativo entre os valores calculados e a resistência esperada, sendo os dados apresentados na Tabela 04 e no Gráfico 01 apresentados a seguir (Sete Engenharia, 2023):

Tabela 4 – Comparativo de carga de ensaio x carga de trabalho

Estaca	Resistência Esperada (kN)	Resistência Obtida (kN)	Varição (%)
TA_ECD01	1180	1959	+66,02
TA_ECD02	1180	2576	+118,31
TA_ECD03	1180	2233	+89,24
TA_ECD04	1180	2091	+77,20
TA_ECD05	1180	2342	+98,47

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Gráfico 01 - Comparativo Carga de Projeto x Carga de Trabalho



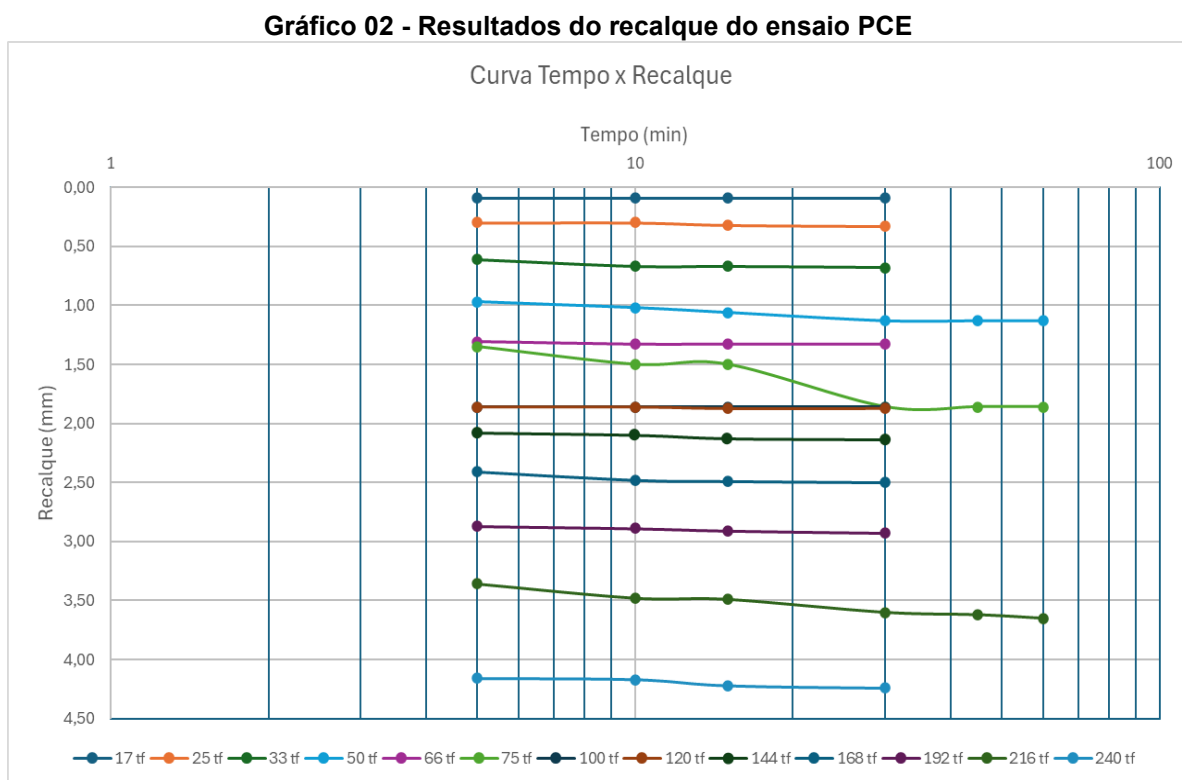
Fonte: SETE ENGENHARIA, 2023.

Como pode se observar, os valores obtidos superaram de forma satisfatória a resistência esperada apesar da redução do fator de segurança. A economia gerada não afetou a resistência esperada para as estacas; ao contrário disto, ainda promoveu uma ampla margem de segurança para a carga resistida pela estrutura de fundação. Desta forma, nota-se que os resultados obtidos foram excepcionalmente positivos, superando com uma ampla margem a resistência esperada mesmo apresentando o coeficiente mais baixo para a verificação da segurança da fundação em estaca. Isto pode ser visualmente compreendido através do Gráfico 01, o qual demonstra o quão positivo para a obra o resultado se mostrou já que, apesar da economia de material, mão de obra e tempo, ainda assim a segurança, eficiência, durabilidade e qualidade da fundação podem ser apontadas através dos resultados abaixo, além de sua desejada resistência (Sete Engenharia, 2023):

Sendo assim, 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. Desta forma, gerou-se uma economia de aproximadamente R\$360.000,00 e 337,00 metros a menos para escavação (Sete Engenharia, 2023).

4.2 ENSAIO DE CARGA DINÂMICA

Por normativa, toda obra que execute fundação em estaca hélice contínua deve realizar o ensaio de carregamento estático. Seguindo a determinação da norma, concluída a execução do ensaio PCE, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 03, que se encontra no Anexo I, e foram sintetizados no Gráfico 02 abaixo (Sete Engenharia, 2023):



Fonte: SETE ENGENHARIA, 2024

O gráfico da Curva Tempo x Recalque é representado através dos dados Tempo, em minutos (eixo X, em escala logarítmica), e Recalque, em milímetros (eixo Y). Os dados compilados e analisados são referentes aos treze estágios de compressão das estacas aos

quais a estrutura foi submetida, nos quais houveram a elevação gradual do esforço aplicado até que se obtivesse as leituras do recalque sob a carga de ensaio, que foi determinada em 240 tonelada-força. Esse carregamento de ensaio foi determinado devido ao fato de ser o dobro da carga de trabalho estimada para as estacas de fundação, correspondente a aproximadamente 120 tonelada-força. Para a montagem da curva Recalque por Tempo é necessário que sejam feitas leituras da aplicação da carga e reação de recalque sob o tempo de, pelo menos, trinta minutos. Em cada estágio, a força determinada é aplicada e medida em intervalos mínimos de 5, 10, 15 e 30 minutos, conforme procedimento padrão da empresa responsável pela execução do ensaio sob a sugestão da norma técnica NBR 16903. Ao final dos tempos informados faz-se a leitura do recalque da estrutura até que se obtenham duas leituras sequenciais de recalque com resultados estáveis. Em casos onde há uma maior variação do recalque sob a mesma carga faz-se necessário a análise de, no mínimo, mais dois pontos de leitura (no caso do ensaio analisado, com tempo de 45 e 60 minutos de aplicação da carga por procedimento da empresa contratada para o ensaio), os quais devem apresentar um resultado estável para que se dê por concluída a aplicação do esforço e se passe para o próximo estágio de compressão. Um exemplo onde realizou-se esta leitura de tempos extra foi sob a carga de 75 tonelada-força, na qual obteve-se uma leitura de recalque de 1,50 milímetros ao tempo de 15 minutos mas, no tempo de 30 minutos de exposição a mesma carga, obteve-se um recalque de 1,86 milímetros. Para concluir a aplicação da carga de 75 tonelada-força realizou-se a leitura de dois pontos extras: uma leitura após 45 minutos de exposição a carga e outra leitura após 60 minutos de exposição. Em ambos os tempos, o resultado obtido para a deformação foi equivalente a 1,86 milímetros, valor similar a leitura de 30 minutos (Sete Engenharia, 2023). Sendo assim, os resultados apresentaram uma estabilidade, ponto o qual é considerado como conclusão da leitura da carga, de acordo com a norma técnica que rege a execução do ensaio, a NBR 16903 (ABNT, 2020).

De maneira geral, nota-se no gráfico que a estrutura de estacas comportou-se de forma a sofrer baixos valores para os recalques registrados. Em resumo, o desempenho da estaca PA5-E pode ser demonstrado conforme o Quadro 02 a seguir (Sete Engenharia, 2023):

Quadro 02 - Resultados do ensaio de carregamento estático na estaca PA5-E

Estaca	Profundidade executada (m)	Carga de trabalho (tf)	Carga de ensaio (tf)	Recalque médio para carga de trabalho (mm)	Recalque médio para carga de ensaio (mm)
PA5-E	20,16	120	240	1,33	4,51

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2024.

O Quadro 02 apresenta um resumo com os valores obtidos no ensaio PCE para a estrutura do relatório apresentado. Para a estaca PA5-E, submetida a uma carga de ensaio de 240 tf, nota-se que o recalque médio obtido foi equivalente a 4,51 milímetros sob os esforços de compressão. Este resultado é considerado satisfatório por ser um valor baixo quando comparado aos dois valores referenciais para o ensaio: o primeiro, um recalque equivalente a 25 milímetros segundo os padrões da empresa contratada, e o segundo, equivalente a 50 milímetros (referente a NBR 16903, que estima um recalque equivalente a 10% do diâmetro da estaca; no caso da estaca ensaiada, a mesma possuía diâmetro de 50 centímetros). Desta forma, o recalque obtido foi de aproximadamente 18% do referencial estipulado pela contratada e de aproximadamente 9% do referencial da norma NBR 16903 (Sete Engenharia, 2023; ABNT, 2020). Com isto, observou-se que, da mesma maneira que os ensaios de carregamento utilizados para a verificação de desempenho trouxeram uma remodulação do projeto e economia na execução da fundação, também promoveu a

manutenção da segurança, confiabilidade e estabilidade da estrutura, mantendo o padrão de segurança desejável para a obra em questão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho enfatiza a relevância da utilização conjunta dos ensaios *PDA* (*Pile Driving Analyzer*) e *PCE* (Prova de Carga Estática) na análise de fundações em estacas hélice contínua, especialmente em solos silto-argilosos, como os presentes em Anápolis. Esses solos, por apresentarem características peculiares em grandes profundidades, justificam a adoção desse tipo de fundação, que otimiza o aproveitamento das propriedades geotécnicas do terreno como sua alta resistência ao atrito lateral do fuste da estaca.

O estudo de caso analisado evidenciou que a aplicação dos dois ensaios em uma mesma obra possibilita uma avaliação mais abrangente e confiável do desempenho das estacas, oferecendo dados complementares que corroboram tanto a capacidade de carga quanto o comportamento estrutural das fundações. O ensaio *PDA*, por sua vez, proporciona resultados rápidos, permitindo identificar possíveis falhas durante a execução das estacas ao mesmo tempo em que fornece dados de resistência a carregamentos de curto prazo, enquanto o ensaio *PCE* fornece uma verificação direta e precisa da capacidade de carga estática da fundação em uma simulação dos esforços ativos da estrutura pronta da edificação.

Apesar do uso de um maquinário mais básico como o é o aparelho bate estaca frente ao martelo hidráulico, ainda assim foi possível realizar um ensaio correto conforme o procedimento da norma e as exigências normativas tanto da NBR 13208 quanto da empresa contratada para a realização do ECD. Portanto, a aplicação do ensaio *PDA* permitiu uma reavaliação criteriosa do projeto, possibilitando a redução do fator de segurança das estacas e, conseqüentemente, uma diminuição na profundidade de assentamento. Essa otimização resultou em uma economia significativa, da ordem de R\$ 360 mil, no custo total da obra devido à redução no consumo de materiais, na mobilização de equipamentos e nos custos de mão de obra direta e indireta. Por outro lado, o ensaio *PCE*, obrigatório conforme a NBR 6122, que prevê sua aplicação em pelo menos 1% das estacas executadas na obra, comprovou que a redução sugerida pelo *PDA* não comprometeu a integridade estrutural. Além disso, o *PCE* evidenciou baixos índices de recalque mesmo em um solo de granulometria fina como o da obra, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela norma e pelos parâmetros da executora do ensaio e do relatório.

Conclui-se, portanto, que a combinação desses dois métodos de ensaio permite uma análise mais robusta e completa do sistema de fundação e sua funcionalidade junto ao solo, reduzindo incertezas quanto a segurança, execução e, conseqüentemente, durabilidade da estrutura, e aumentando a segurança tanto no projeto quanto na execução de fundações do tipo profundas, em especial. Essa abordagem não apenas assegura maior confiabilidade estrutural, mas também reforça a importância da integração de diferentes ferramentas de análise no controle de qualidade e desempenho das fundações em contextos geotécnicos específicos. Assim, recomenda-se que, em obras situadas em solos com características similares aos de Anápolis, a prática conjunta dos ensaios *PDA* e *PCE* seja adotada como padrão, a fim de garantir eficiência, segurança, confiabilidade e economia no processo construtivo.

REFERÊNCIAS

AOKI, Nelson *et al.* **Fundações**: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 144 p.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16903**: Solo - Prova de Carga Estática em Fundação Profunda. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2020. 11 p.

CHOW, H. S. W.; SMALL, J. C. ***Behaviour of Piled rafts with Piles of different lengths and diameters under vertical loading***. *Geotechnical Special Publication*, v. 40778, n. 130–142, p. 841–855, 2005.

GUSMÃO F., Jaime de A. **Fundações do conhecimento geológico a prática de engenharia**. Pernambuco: UFPE, 2002. 333 p.

HACHICH, Waldemar *et al.* **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. 751 p.

SETE ENGENHARIA (Goiânia). Sete Engenharia (org.). **RELATÓRIO PCE 008-24**. Goiânia: Sete Engenharia, 2024. 52 p.

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

ANEXO

Quadro 03 – Dados de compressão do ensaio PCE

(continua)

Tempo de Leitura	Estágio	Carga (tf)	Carga (bar)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	Desloc. Médio (mm)
00:00:00	1	17	20	0,14	0,20	0,00	0,00	0,09
00:05:00				0,14	0,20	0,00	0,00	0,09
00:10:00				0,14	0,20	0,00	0,01	0,09
00:15:00				0,14	0,20	0,00	0,01	0,09
00:30:00				0,14	0,20	0,00	0,01	0,09
Estabilização								0,00%
00:00:00	2	25	30	0,37	0,35	0,37	0,10	0,3
00:05:00				0,38	0,36	0,37	0,10	0,3
00:10:00				0,38	0,36	0,37	0,10	0,3
00:15:00				0,40	0,39	0,37	0,11	0,32
00:30:00				0,41	0,41	0,37	0,11	0,33
Estabilização								3,16%
00:00:00	3	33	40	0,54	0,49	0,52	0,17	0,43
00:05:00				0,68	0,64	0,73	0,37	0,61
00:10:00				0,75	0,69	0,81	0,43	0,67
00:15:00				0,75	0,69	0,81	0,44	0,67
00:30:00				0,75	0,70	0,81	0,44	0,68
Estabilização								0,71%
00:00:00	4	50	60	0,78	0,70	0,81	0,44	0,68
00:05:00				1,07	0,94	1,16	0,69	0,97
00:10:00				1,14	0,99	1,22	0,74	1,02
00:15:00				1,22	1,06	1,22	0,74	1,06
00:30:00				1,25	1,10	1,34	0,84	1,13
00:45:00				1,25	1,10	1,34	0,84	1,13
01:00:00				1,25	1,10	1,34	0,84	1,13
Estabilização								0,00%
00:00:00	5	66	80	1,25	1,10	1,34	0,84	1,13
00:05:00				1,44	1,26	1,54	0,98	1,31
00:10:00				1,46	1,28	1,56	1,00	1,33
00:15:00				1,46	1,28	1,56	1,00	1,33
00:30:00				1,46	1,28	1,56	1,00	1,33
Estabilização								0,00%
00:00:00	6	75	90	1,44	1,26	1,63	1,08	1,35
00:05:00				1,44	1,26	1,63	1,08	1,35
00:10:00				1,66	1,43	1,76	1,14	1,50
00:15:00				1,66	1,43	1,76	1,14	1,50
00:30:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:45:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
01:00:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
Estabilização								0,00%
00:00:00	7	100	120	1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:05:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:10:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:15:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:30:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
Estabilização								0,00%

Quadro 03 – Dados de compressão do ensaio PCE

(conclusão)

Tempo de Leitura	Estágio	Carga (tf)	Carga (bar)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	Desloc. Médio (mm)
00:00:00	8	120	143	1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:05:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:10:00				1,97	1,79	2,15	1,54	1,86
00:15:00				1,97	1,79	2,16	1,54	1,87
00:30:00				1,97	1,79	2,16	1,54	1,87
Estabilização								0,00%
00:00:00	9	144	172	2,07	1,89	2,21	1,61	1,95
00:05:00				2,19	2,00	2,36	1,76	2,08
00:10:00				2,23	2,04	2,37	1,76	2,10
00:15:00				2,23	2,04	2,43	1,82	2,13
00:30:00				2,23	2,05	2,45	1,84	2,14
Estabilização								4,50%
00:00:00	10	168	200	2,43	2,26	2,64	2,02	2,34
00:05:00				2,47	2,29	2,77	2,09	2,41
00:10:00				2,55	2,37	2,84	2,16	2,48
00:15:00				2,55	2,37	2,85	2,17	2,49
00:30:00				2,56	2,38	2,87	2,20	2,50
Estabilização								4,86%
00:00:00	11	192	229	2,83	2,66	3,17	2,50	2,79
00:05:00				2,93	2,74	3,26	2,56	2,87
00:10:00				2,95	2,74	3,27	2,58	2,89
00:15:00				2,96	2,77	3,30	2,62	2,91
00:30:00				2,97	2,79	3,33	2,63	2,93
Estabilização								4,40%
00:00:00	12	216	257	3,28	3,08	3,66	2,96	3,25
00:05:00				3,38	3,21	3,78	3,07	3,36
00:10:00				3,53	3,32	3,90	3,17	3,48
00:15:00				3,53	3,33	3,91	3,19	3,49
00:30:00				3,65	3,44	4,01	3,29	3,60
00:45:00				3,67	3,46	4,04	3,32	3,62
01:00:00				3,71	3,49	4,06	3,34	3,65
Estabilização								3,82%
00:00:00	13	240	286	4,06	3,83	4,46	3,75	4,03
00:05:00				4,18	3,98	4,58	3,88	4,16
00:10:00				4,20	4,00	4,58	3,88	4,17
00:15:00				4,23	4,04	4,66	3,95	4,22
00:30:00				4,27	4,08	4,66	3,95	4,24
Estabilização								3,39%
Estabilização								4,51

Fonte: SETE ENGENHARIA, 2024