



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

ROBERT DE LIMA ARAÚJO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES
DE EDIFÍCIOS ALTOS NO BRASIL: COMPARATIVO DE CASOS**

JOÃO PESSOA - PB

2025

ROBERT DE LIMA ARAÚJO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES
DE EDIFÍCIOS ALTOS NO BRASIL: COMPARATIVO DE CASOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

JOÃO PESSOA – PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663a Araujo, Robert de Lima.

Análise do comportamento de estacas metálicas em fundações de edifícios altos no Brasil: comparativo de casos / Robert de Lima Araujo. - João Pessoa, 2025.
64 f. : il.

Orientação: Fábio Lopes Soares.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Construções verticais. 2. Estacas metálicas. 3. Viabilidade econômica. 4. Condições geotécnicas. I. Soares, Fábio Lopes. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ROBERT DE LIMA ARAÚJO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES DE EDIFÍCIOS ALTOS NO BRASIL: COMPARATIVO DE CASOS

Trabalho de Conclusão de Curso em 30/04/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Fábio Lopes Soares

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

Aprovado

Aline Remígio

Prof. Dra. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

APROVADO

Igor Fernandes Gomes

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

APROVADO

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Aparecida, que sempre foi meu maior exemplo de força, dedicação e amor incondicional, me incentivando em toda minha jornada acadêmica. Este trabalho é a prova que todo esforço investido valeu a pena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte inesgotável de força, sabedoria e inspiração, por ter me dado saúde e possibilitar cada passo da minha jornada universitária. Sem sua presença em minha vida, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, em especial minha mãe, Maria Aparecida, que sempre acreditou em mim e me apoiou de forma incondicional. Sem vocês, este sonho não teria sido concretizado.

Aos colegas de curso e amigos que a universidade me apresentou, especialmente Fábio Souza, Jaidna Almeida e Kamyla Rocha, por terem compartilhado todos esses momentos comigo, tornando essa jornada mais leve e descontraída.

Ao meu amigo de longa data, Alexandre Júnior, por sempre ter acreditado no meu potencial e estar ao meu lado nos momentos de cansaço e dúvidas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Soares, por aceitar esse desafio e orientações valiosas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a realização deste projeto.

A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica, meu sincero agradecimento. Cada ensinamento deixou sua marca e ampliou minha visão sobre a engenharia.

E a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa etapa da minha vida: muito obrigado.

"O importante é não parar de questionar; a curiosidade tem sua própria razão de existir"

(Albert Einstein)

RESUMO

Com o crescimento acelerado das construções verticais no Brasil, especialmente em grandes centros urbanos, a escolha do tipo de fundação passou a ter um papel cada vez mais estratégico na segurança, eficiência e viabilidade das edificações. Diante desse cenário, este trabalho tem como foco a análise da aplicação de estacas metálicas com seção decrescente ao longo da profundidade, uma alternativa que, apesar de não ser nova, vem ganhando espaço por suas vantagens técnicas, como boa cravabilidade, menor vibração durante a instalação e facilidade de adaptação a diferentes condições de solo. O trabalho baseou-se em três casos de obras documentados na literatura técnica por Almeida (2013) e Amorim (2024), visando entender o desempenho estrutural, adaptação ao solo, a viabilidade econômica e os desafios executivos encontrados durante o andamento das obras. Entre os pontos analisados, destacam-se a capacidade de carga das estacas, os métodos de instalação, os ganhos de resistência com o tempo (efeito *set-up*) e a importância da adaptação do projeto conforme as condições geotécnicas encontradas. Os resultados mostraram que, quando bem planejadas e executadas, as estacas metálicas com seção variável podem não apenas atender às exigências técnicas dos projetos, como também gerar economia de materiais, principalmente em relação ao consumo de aço. Mesmo com os resultados positivos, o estudo também esbarrou em algumas limitações - principalmente pela falta de dados mais aprofundados na literatura e pela ausência de testes práticos que pudessem complementar a análise. Ainda assim, o trabalho procura contribuir para a compreensão do comportamento dessas estacas e reforça que seu uso pode ser uma solução viável em diferentes cenários da construção civil. Logo, conclui-se que a adoção de estacas metálicas com seção decrescente pode ser uma alternativa eficiente e promissora, desde que haja planejamento adequado, controle rigoroso da execução e monitoramento das condições do solo.

Palavras-chave: Construções verticais, estacas metálicas, viabilidade econômica, condições geotécnicas.

ABSTRACT

With the rapid growth of vertical constructions in Brazil, especially in major urban centers, the choice of foundation type has become an increasingly strategic factor in ensuring the safety, efficiency, and feasibility of buildings. In this context, this study focuses on the analysis of the use of steel piles with a decreasing cross-section along their depth as an alternative that, although not new, has been gaining ground due to its technical advantages, such as good drivability, reduced vibration during installation, and ease of adaptation to different soil conditions. The study is based on three construction cases documented in the technical literature by Almeida (2013) and Amorim (2024), aiming to understand structural performance, soil adaptation, economic feasibility, and execution challenges encountered during the course of the projects. Among the aspects analyzed, the load-bearing capacity of the piles, installation methods, strength gains over time (set-up effect), and the importance of adapting the design to the geotechnical conditions found are highlighted. The results showed that, when well planned and executed, steel piles with variable cross-sections can not only meet the technical requirements of projects but also lead to material savings, especially in terms of steel consumption. Despite the positive results, the study also faced some limitations - mainly due to the lack of more in-depth data in the literature and the absence of practical tests that could complement the analysis. Nonetheless, this work seeks to contribute to the understanding of the behavior of these piles and reinforces that their use can be a viable solution in different civil construction scenarios. Therefore, it is concluded that the adoption of steel piles with a decreasing cross-section can be an efficient and promising alternative, provided there is proper planning, strict execution control, and monitoring of soil conditions.

Keywords: Vertical constructions, steel piles, economic feasibility, geotechnical conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de estacas	19
Figura 2 - Seções transversais das estacas de aço: (a) perfil de chapas soldadas; (b) perfis I laminados, associados (duplo); (c) perfis tipo cantoneira (duplo); (d) tubos; (e) trilhos associados (duplo); (f) trilhos associados (triplo)	20
Figura 3 - Transferência de carga de uma estaca isolada	25
Figura 4 - Conceito de estaca de seção decrescente com a profundidade	26
Figura 5 - Parcelas de resistência que constituem a capacidade de carga	28
Figura 6 - Ilustração da distribuição da reação do solo quando submetido a esforço horizontal e diagramas de momentos fletores	29
Figura 7 - Estacas metálicas: proteção contra a corrosão.	31
Figura 8 - Seção transversal do perfil geotécnico	42
Figura 9 - Seção transversal, vista 3D e detalhe das emendas das estacas metálicas laminadas com seção variada	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espessura de compensação de corrosão.....	33
Tabela 2 - Quantidade de estacas por bloco	37
Tabela 3 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 01	38
Tabela 4 - Estratigrafia do solo com a profundidade - SP 02.....	39
Tabela 5 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 03.....	40
Tabela 6 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 04.....	40
Tabela 7 - Quantidade de estacas por bloco para um edifício.....	44
Tabela 8 - Características e quantitativos iniciais de projeto	45
Tabela 9 - Quantidade de estacas por bloco para a torre “A”	45
Tabela 10 - Quantidade de estacas por bloco para a torre “B”	46
Tabela 11 - Apresentação das etapas e suas respectivas estacas ensaiadas	48
Tabela 12 - Resultados da 1ª etapa	49
Tabela 13 - Resultados da 2ª etapa	49
Tabela 14 - Resultados da 3ª etapa	49
Tabela 15 - Consumo de aço para as soluções de fundações apresentadas nos projetos da obra 2	51
Tabela 16 - Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B).....	52
Tabela 17 - Resultado ECD (2ª e 3ª campanhas)	54
Tabela 18 - Resultado ECD (Torre A)	55
Tabela 19 - Quadro comparativo das obras analisadas	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B)	53
Gráfico 2 - Resultados PDA	53
Gráfico 3 - Resultados ECD	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

DMX Deslocamento Máximo

ECD Ensaio de Carregamento dinâmico

NBR Norma Brasileira

PCE Prova de Carga Estática

PDA Pile Dynamic Analyzer

RMX Resistência Máxima

SPT Standard Penetration Test - Sondagem à Percussão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	17
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. CONCEITO DE ESTACAS METÁLICAS.....	20
2.2. APLICAÇÕES EM FUNDAÇÃO	21
2.2.1. VANTAGENS DAS ESTACAS METÁLICAS.....	22
2.2.2. DESVANTAGENS DAS ESTACAS METÁLICAS	24
2.3. ESTACAS METÁLICAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL DECRESCENTE COM A PROFUNDIDADE.....	25
2.4. COMPORTAMENTO DAS ESTACAS METÁLICAS	27
2.4.1. CARREGAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS.....	27
2.4.2. CORROSÃO	30
2.5. NORMAS E REGULAMENTAÇÕES	33
2.5.1.NBR 6122/2022 (ABNT).....	33
3. METODOLOGIA	35
3.1. SELEÇÃO DOS CASOS	35
3.2. ANÁLISE DOS DADOS	35
3.3. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	36
3.4. LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA.....	36
4. ANÁLISE DOS CASOS DE OBRAS	37
4.1. OBRA 1 – JOÃO PESSOA, PB (ANO: 2012).....	37
4.2. OBRA 2 – RECIFE, PE (ANO: 2005)	41
4.3. OBRA 3 – RECIFE, PE (ANO: 2020)	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1. OBRA 1 – JOÃO PESSOA, PB (ANO: 2012).....	47
5.2. OBRA 2 – RECIFE, PE (ANO: 2005)	50
5.3. OBRA 3 – RECIFE, PE (ANO: 2020)	52
5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS 3 CASOS DE OBRAS	55
5.4.1. DESEMPENHO DAS ESTACAS (CAPACIDADE DE CARGA).....	56
5.4.2. ADAPTAÇÃO AO SOLO E METODOLOGIA EXECUTIVA.....	56

5.4.3. CUSTO E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO.....	57
5.4.4. EFEITO DO TEMPO PÓS-CRAVAÇÃO (SET-UP).....	57
5.4.5. QUALIDADE E DETALHAMENTO DOS DADOS.....	57
5.4.6. LIMITAÇÕES E POSSIBILIDADES DE MELHORIA	58
6. CONCLUSÕES.....	60
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXOS	65
ANEXO A – Planta de locação das estacas metálicas com seção variável (Obra 2).....	66
ANEXO B – Planta de estaqueamento (Obra 3)	67

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil apresentou um crescimento significativo nas construções de edifícios altos, especialmente em grandes centros urbanos. Essa verticalização intensificada das edificações necessita de soluções cada vez mais inovadoras e eficientes, sobretudo quando se trata das fundações. Nesse sentido, a escolha do tipo de fundação depende de uma série de fatores como o tipo de solo, dimensão do edifício, custo-benefício, etc. A definição assertiva do método de fundação empregado é essencial para evitar problemas patológicos ao decorrer do tempo, tendo em vista que esse elemento é responsável pela sustentação da construção.

A utilização de estacas metálicas no país não é uma novidade, entretanto, sua fama de alto custo costumava limitar o emprego desse método em favor de outras fundações profundas. Inicialmente, a aplicação das estacas de aço se dava por meio da reutilização de trilhos de trem, devido seu baixo custo, mas essa alternativa apresentava limitações quanto à capacidade de carga. Com a popularização desse tipo de estaca, surgiram no mercado os perfis laminados que competiam uma diversidade de seções transversais disponíveis e estacas metálicas cada vez mais resistentes e seguras, melhorando sua competitividade na construção civil.

Pelo fato desse tipo de fundação apresentar diversas vantagens, como boa cravabilidade, baixa vibração nas edificações circunvizinhas durante a cravação, possibilidade de combinações com outras estacas, facilidade de manuseio e transporte, alta profundidade de alcance, entre outras, as estacas metálicas tornam-se componentes importantes quando comparadas às pré-moldadas de concreto, resultando em alguns casos, na viabilização de seu emprego. No entanto, é necessário estudar aspectos como corrosão e o alto custo para tornar essa solução mais competitiva no mercado, especialmente em comparação com outras fundações profundas.

Assim, a escolha das estacas metálicas como objeto de estudo se justifica pela sua crescente aplicação no país, impulsionando a busca por métodos construtivos mais eficientes e que ofereçam custos reduzidos, sem comprometer a segurança da edificação, além da falta de casos de obras documentados para estudo na literatura técnica. Desse modo, a análise do comportamento dessas estacas procura entender

a capacidade de carga estrutural, o impacto dos esforços verticais e horizontais e contribuir para um aprimoramento das técnicas de fundações, com o intuito de garantir a durabilidade das edificações.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa de casos documentados na literatura técnica sobre a aplicação de estacas metálicas de seção decrescente com a profundidade em fundações de edifícios altos, com base nos dados apresentados por Almeida (2013) e Amorim (2024).

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar e organizar informações técnicas de cada caso, como características da obra, tipologia e dimensões das estacas, metodologia de execução, ensaios de carregamento realizados e desempenho observado;
- Realizar uma análise comparativa dos dados coletados e discutir os resultados, focando nos processos executivos, capacidade de carga das estacas, adaptação do projeto ao tipo de solo, levando em consideração as particularidades de cada caso analisado;
- Apontar as limitações da metodologia, destacando as restrições do estudo baseado em pesquisa bibliográfica e a falta de dados experimentais complementares (como ensaios de campo).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

À medida que a sociedade evoluiu, as edificações tornaram-se cada vez mais elevadas e robustas, o que exigiu o aprimoramento das técnicas de aplicação das fundações. Esse desenvolvimento impôs a necessidade de soluções mais eficazes para suportar as novas construções. Assim, a escolha de uma solução de fundação não deve se restringir apenas à análise dos métodos mais modernos, mas sim buscar compreender qual tipo apresenta uma melhor economia, além de garantir a durabilidade da construção e sua qualidade.

Para propor a melhor solução, é necessário conhecer bem as características do solo de implantação (a partir de estudos e sondagens) com o objetivo de obter informações sobre resistência e capacidade de carga, a realização de um estudo dos impactos que podem atingir as edificações vizinhas, compreender a quais esforços a construção irá trabalhar e, por fim, aplicar os materiais e metodologias construtivas adequadas seguindo as normas vigentes no país.

De acordo com Daubian (2015), as fundações possuem a função de transferir os esforços provenientes dos pilares para o solo, distribuindo a carga de maneira uniforme, desde que o projeto e a execução sejam realizados de forma adequada.

Segundo Albuquerque e Oliveira (2023), no caso de edifícios altos, a carga gerada sobre o solo devido ao seu peso é considerável, necessitando de um mecanismo eficaz para distribuição desses esforços. Então, as fundações profundas são fundamentais para distribuir essa carga de forma eficiente e segura. Esse tipo de fundação evita problemas como o colapso ou afundamento excessivo do solo, alcançando através de sua cravação, um horizonte de maior capacidade de carga, garantindo assim a estabilidade da estrutura.

A NBR 6122:2022 (ABNT, 2022) define fundação profunda como um elemento de fundação que transmite a carga ao solo por meio da resistência de ponta, da resistência de fuste ou da combinação de ambas, sendo sua base apoiada a uma profundidade superior a oito vezes a menor dimensão em planta e de no mínimo 3,0 metros; caso esse limite não seja atingido, a classificação deve ser devidamente justificada. Nesse tipo de fundação, estão incluídas as estacas e os tubulões.

Assim, as fundações profundas são empregadas quando os solos superficiais em estudo não têm capacidade para suportar grandes cargas ou quando estão

expostos a processos erosivos. Além disso, também são indicadas em situações em que existe a possibilidade de escavações futuras nas proximidades da construção (Albuquerque e Oliveira, 2023).

De acordo com Velloso e Lopes (2010), o método de classificação das fundações por estacas envolve duas categorias que podem ser abordadas: os diferentes materiais utilizados em construção, como madeira, concreto, aço ou materiais mistos, e o procedimento construtivo empregado durante a execução, dividindo-se em estacas com ou sem deslocamento. A Figura 1 ilustra os tipos de estacas baseadas nas duas categorias mencionadas:

Figura 1 - Tipos de estacas

Tipo de execução	Estacas
De deslocamento	Grande (i) Madeira, (ii) pré-moldadas de concreto, (iii) tubos de aço de ponta fechada, (iv) tipo Franki, (v) microestacas injetadas
	Pequeno (i) Perfis de aço, (ii) tubos de aço de ponta aberta (desde que não haja embuchamento na cravação), (iii) estacas hélice especiais ("estacas hélice de deslocamento")
Sem deslocamento	(i) Escavadas com revestimento metálico perdido que avança à frente da escavação, (ii) estacas raiz
De substituição	(i) Escavadas sem revestimento ou com uso de lama, (ii) tipo Strauss, (iii) estacas hélice contínua em geral

Fonte: Velloso e Lopes (2010)

As estacas podem ser classificadas como: de deslocamento, que são introduzidas no terreno sem a remoção do solo, exemplificadas pelas estacas metálicas, pré-moldadas de concreto e de madeira, e sem deslocamento que envolvem a perfuração do solo com remoção de material, podendo ser escavadas manualmente ou mecanicamente (Gonçalves, 2008).

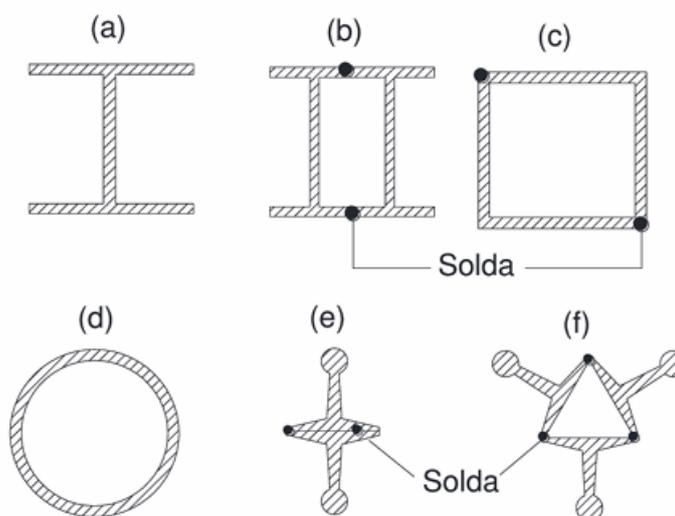
Então, Gonçalves (2008) afirma que as fundações profundas por estacas são indicadas quando se necessita transferir a carga da estrutura através de camadas de solo com baixa capacidade de carga, até alcançar uma camada mais profunda que possua essa capacidade adequada.

2.1. CONCEITO DE ESTACAS METÁLICAS

De acordo com a NBR 6122/2022 (ABNT, 2022), item 3.20, estaca metálica é definida como “estaca cravada, constituída de elemento estrutural produzido industrialmente, podendo ser de perfis laminados ou soldados, simples ou múltiplos, tubos de chapa dobrada ou calandrada, tubos com ou sem costura e trilhos.”

Essas estacas metálicas, também conhecidas como estacas de aço, incluem entre os perfis laminados, os trilhos, que geralmente são reaproveitados de ferrovias. Além disso, esses perfis podem ser isolados ou combinados, formando arranjos duplos ou triplos, conforme citam Velloso e Lopes (2010). Os principais tipos de seções utilizadas estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Seções transversais das estacas de aço: (a) perfil de chapas soldadas; (b) perfis I laminados, associados (duplo); (c) perfis tipo cantoneira (duplo); (d) tubos; (e) trilhos associados (duplo); (f) trilhos associados (triplo)



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Gusmão et al. (2006, apud Amorim et al., 2023) afirmam que até o final da década de 1990, era comum a utilização de trilhos ferroviários reutilizados, como o TR-68, em fundações de estacas metálicas. Com a evolução das demandas do setor da construção civil, especialmente em empreendimentos de grande porte (com mais de dez pavimentos), essa prática foi gradativamente substituída pelo uso de perfis metálicos soldados e laminados, que oferecem maior desempenho e confiabilidade.

Velloso e Lopes (2010) destacam que os aços mais comumente empregados em fundações metálicas atendem aos padrões ASTM, como o A36, com limite de escoamento de 250 Mpa e o A572 Grau 50, com 345 MPa. Em algumas aplicações, é possível incorporar cobre à liga, o que melhora sua resistência à corrosão atmosférica, originando os aços do tipo SAC ou CORTEN.

2.2. APLICAÇÕES EM FUNDAÇÃO

Como afirma Silva (2016), a possibilidade de utilização dos perfis metálicos como elementos estruturais de fundação profunda está ligada à sua capacidade de desempenhar algumas funções, como transmitir as cargas da estrutura por camadas de solo de baixa resistência até alcançar uma camada mais resistente, por meio do atrito lateral, e oferecer ancoragem mínima, garantindo resistência à tração para evitar que a estrutura se eleve devido a esforços elevados.

Segundo Joppert Júnior (2007), as estacas metálicas se destacam por conseguirem atingir profundidades que seriam inviáveis para estacas pré-moldadas de concreto, o que permite explorar quase totalmente sua capacidade de carga. Essa vantagem está relacionada à elevada resistência do aço à percussão durante a cravação, minimizando o risco de danos ou quebras no processo.

Ainda conforme Joppert Júnior (2007), a aplicação de estacas metálicas como solução em fundações profundas, do ponto de vista geotécnico, ocorre em determinadas situações:

- Em áreas com solos residuais, decorrentes de alteração de rochas, ocorre variação na profundidade das estacas, o que pode resultar em perdas devido a sobras e quebras, caso sejam escolhidas estacas pré-moldadas de concreto;
- Quando é necessário ultrapassar camadas de argilas duras, areias compactas ou pedregulhos;
- Em locais com camadas densas de solos orgânicos moles e/ou areias fofas, é possível reduzir a seção da estaca conforme aumenta sua profundidade.

No Brasil, a utilização de estacas metálicas como método construtivo de fundação iniciou-se por meio dos trilhos de trem, provenientes da substituição de linhas ferroviárias. Inicialmente, essa solução era escolhida devido ao seu custo mais

baixo, porém havia limitações quanto à sua capacidade de carga e não existia garantias quanto à conformidade das características dimensionais e a linearidade. O emprego de perfis soldados ocorreu decorrente à difusão desse tipo de fundação, o que possibilitou a fabricação de estacas com maior capacidade de carga estrutural (Silva, 2016).

De acordo com Curry Filho (2016), o uso de estacas metálicas no Brasil tem se mostrado uma alternativa de fundação economicamente viável nos últimos anos, devido à sua elevada capacidade de carga e à eficácia no processo de execução.

Alonso (1998, apud Nogueira et al., 2006) destaca que as estacas metálicas podem ser cravadas em terrenos resistentes sem causar danos às estacas vizinhas, mesmo em locais com grande densidade de estacas. Além disso, em terrenos próximos as divisas, elas funcionam tanto como elemento de contenção durante o período de cravação quanto como fundação para os pilares, dispensando o uso de vigas de equilíbrio.

Além disso, embora as estacas metálicas ainda apresentem um custo relativamente alto, elas podem ser combinadas com outros tipos de estacas, podendo fazer com que se tornem, uma solução econômica e eficiente (Gonçalves, 2008).

Conforme Lima (2018), a utilização de estacas metálicas oferece benefícios como excelente resistência à flexão, fácil manuseio, grande profundidade de alcance, boa cravabilidade e a possibilidade de reaproveitamento de materiais excedentes.

Ainda, as estacas metálicas podem ser cravadas através de métodos de percussão, prensagem ou vibração. A escolha de um tipo específico de martelo, seja queda livre, hidráulico, pneumático ou vibratório, dependerá de uma série de fatores preconizados na norma, como tipo de solo, características de projeto, efeitos sobre a vizinhança (ruídos ou vibrações), entre outros. Independentemente do tipo de equipamento escolhido para cravação, o controle desse processo é realizado de maneira tradicional, por meio de técnicas como nega e o repique em todas as estacas (NBR 6122/2022).

2.2.1. VANTAGENS DAS ESTACAS METÁLICAS

De acordo com Velloso e Lopes (2010), é possível citar algumas vantagens das estacas metálicas em relação as demais, como possibilidade de adaptação para

cada caso utilizado devido à grande gama de seções transversais disponíveis, a facilidade de manipulação e transporte, maior facilidade de cravação em razão da elevada resistência do aço e possibilidade de adaptação do comprimento no canteiro de obras, caso necessário realizar cortes ou emendas.

Entre muitos, alguns fatores citados por Magalhães (2010) podem ser levados em consideração para o emprego das estacas metálicas:

1. Pouca perturbação do terreno (exceto seções tubulares com ponta obturada);
2. Baixa vibração entre as estacas pré-fabricadas;
3. Grande capacidade de cravação em quase todos os tipos de solo;
4. Grande capacidade de carga;
5. Podem atingir cota previamente fixada;
6. Fácil condição de tempo de entrega;
7. Facilidades em executar emendas e cortes;
8. Elevada resistência à compressão, tração e flexão;
9. Possibilita comprimentos variados;
10. Possibilita que várias estacas possam ser soldadas;
11. Facilidade de transporte e manuseio;
12. Controle de qualidade.

Segundo Silva (2016), a utilização de estacas metálicas apresenta diversas vantagens, entre as quais mais se destacam:

- Pelo fato de ser cravada, não envolve escavações, proporcionando uma execução mais limpa;
- Sua cravação implica em um menor impacto na vizinhança, devido à baixa vibração;
- Apresenta boa trabalhabilidade com carregamentos horizontais e combinados;
- Possibilidade de execução de estacas com perfis escalonados, devido a disponibilidade de uma grande variedade de perfis, contribuindo para redução do custo da fundação;
- Possui um grande limite de plasticidade, resultando em menos quebras durante o processo de cravação;

- Existe possibilidade de reutilizar um perfil, no caso de aplicação em obras temporárias.

Além disso, conforme Cury Filho (2016), outra vantagem das estacas metálicas é a possibilidade de utilizar blocos de fundação menores, o que reduz o volume de concreto e o peso do aço nas armações, sendo um fator determinante na viabilidade econômica da solução de fundação.

2.2.2. DESVANTAGENS DAS ESTACAS METÁLICAS

Silva (2016) afirma que as desvantagens desse sistema de fundação devem ser analisadas com o intuito de evitar impactos na execução e utilização da obra. Seu custo é superior em comparação as estacas pré-moldadas e do tipo Franki, além de apresentar vulnerabilidade a águas agressivas e solos corrosivos. Além disso, a necessidade de maquinário específico pode limitar o acesso às fábricas, de modo a restringir seu uso em casos que seu custo-benefício seja justificado.

Ademais, Velloso e Lopes (2010) afirmam que, entre as desvantagens das estacas de aço, destaca-se seu alto custo no Brasil, embora nos últimos anos, sua competitividade em relação às estacas de concreto tenha crescido. Além disso, a corrosão, antes considerada um problema relevante, teve sua importância reduzida com base em estudos que comprovam a durabilidade dessas estacas quando completamente enterradas.

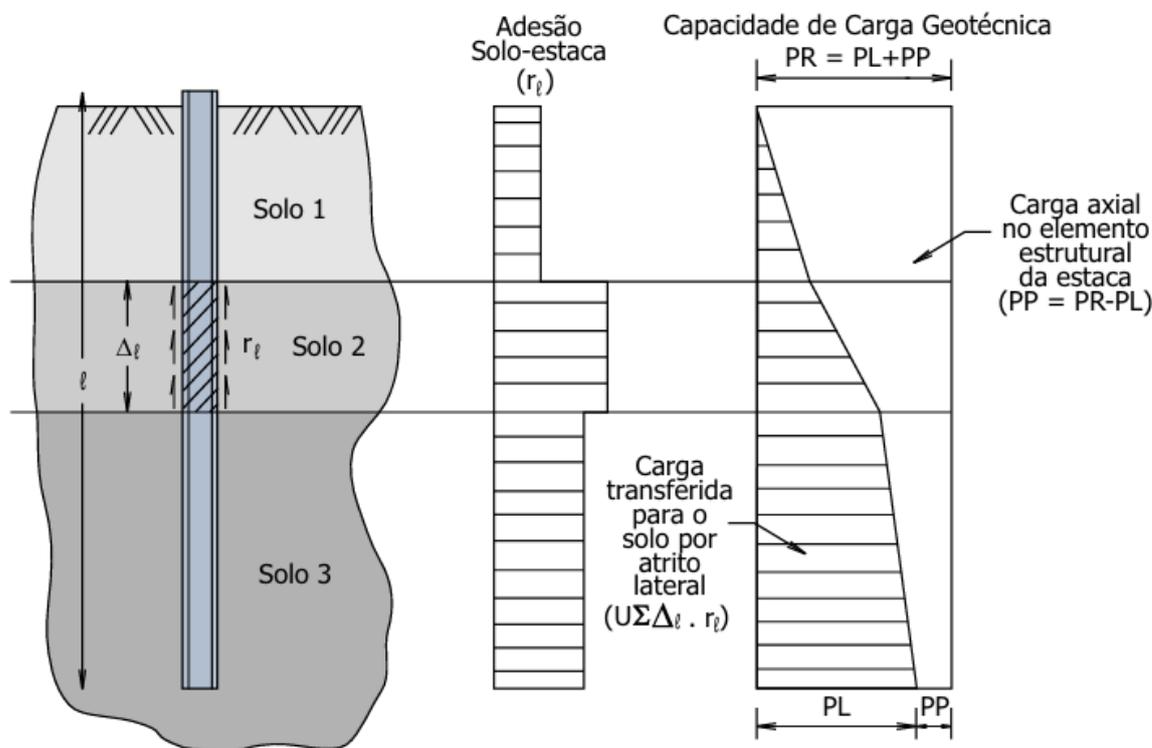
Por fim, Magalhães (2010) destaca que como exemplo de desvantagens relacionadas a aplicação de elementos metálicos, pode-se citar:

1. Alguns perfis podem sofrer curvatura durante a cravação;
2. Geração de ruído ao serem cravados por percussão;
3. Baixa resistência de ponta;
4. Riscos associados à corrosão.

2.3. ESTACAS METÁLICAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL DECRESCENTE COM A PROFUNDIDADE

Segundo Pannoni (2008), até o ano de 2006, os projetos de estacas metálicas eram elaborados utilizando perfis de seção constante. No entanto, observa-se que a carga axial que essas estacas devem suportar diminui com a profundidade, variando do valor máximo no topo (PR) ao valor mínimo na ponta (PP). Como essa carga resulta da ruptura do solo, a carga admissível a ser considerada equivale à metade desse valor, ou seja, metade da carga de ruptura no topo. Dessa forma, conclui-se que a seção transversal da estaca não precisa ser constante ao longo de todo o seu comprimento, podendo diminuir com a profundidade, desde que a seção seja dimensionada para suportar os esforços axiais correspondentes, conforme indicado nas representações mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Transferência de carga de uma estaca isolada

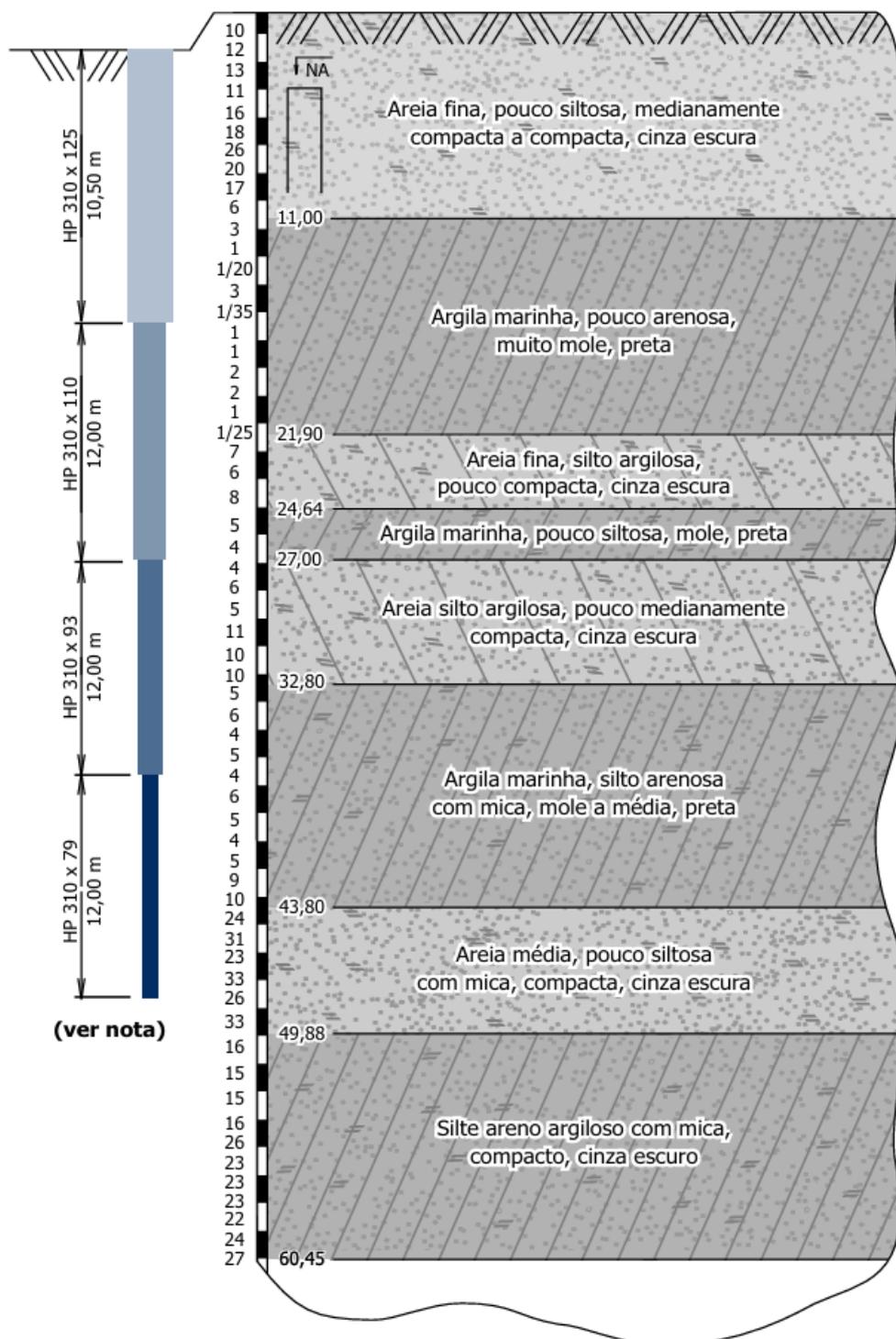


Fonte: Pannoni (2008)

Esse tipo de estaca apresenta vantagem de economia no peso das estacas, bem como facilidade nas emendas por proporcionar o emprego de estacas do mesmo

grupo, isto é, que apresentam a mesma altura nominal (PANNONI, 2008). A Figura 4 demonstra um exemplo de aplicabilidade desse tipo de estaca.

Figura 4 - Conceito de estaca de seção decrescente com a profundidade



Fonte: Pannoni (2008)

2.4. COMPORTAMENTO DAS ESTACAS METÁLICAS

O estudo do comportamento das estacas metálicas é essencial quando se busca prezar pela segurança da estrutura e garantir a eficácia das fundações. Esse comportamento dependerá da interação entre três fatores principais: o material das estacas, as características do solo onde serão instaladas e as cargas impostas pela superestrutura. A partir da análise da interação desses parâmetros, é possível determinar o desempenho da fundação aplicada e sua capacidade de assegurar a estabilidade do edifício a longo prazo.

Conforme Vargas (1978), para a realizar a análise do comportamento das estacas, é importante levar em consideração a capacidade de carga de cada estaca isolada, os recalques causados por elas individualmente, bem como o estudo desses mesmos eventos quando as estacas estiverem agrupadas.

2.4.1. CARREGAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS

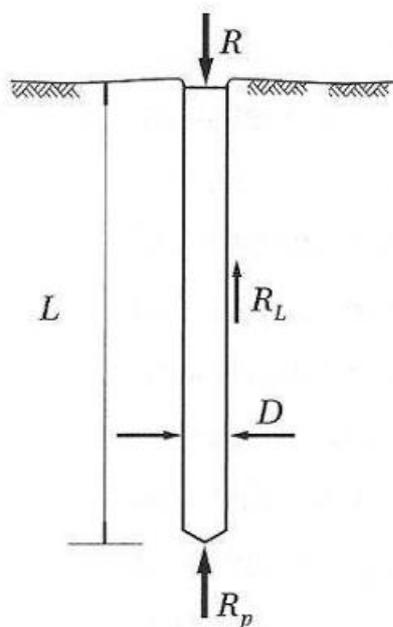
2.4.1.1. ESTACAS CARREGADAS VERTICALMENTE

Uma estaca carregada verticalmente irá resistir a esse tipo de esforço através de duas componentes: a resistência ao cisalhamento, ocasionada pelo atrito ao longo do fuste da estaca e as tensões normais presentes na ponta da estaca (Magalhães, 2010).

Segundo Cintra e Aoki (2010), a transferência para o solo de uma carga vertical aplicada na cabeça de uma estaca, ocorre através da mobilização da fração transferida pelo fuste e a fração mobilizada pela ponta da estaca.

Curry Filho (2016, apud Cintra e Aoki, 2010) afirma que no sistema de interação entre o solo e à estaca, a transferência de cargas acontece a partir de um equilíbrio entre a força que a estaca recebe e a resistência que o solo oferece ao seu redor. Quando a carga é aplicada no topo da estaca, o solo, ao longo do seu contato com a superfície da estaca, vai absorvendo parte dessa força. Por isso, a intensidade da força normal na estaca vai diminuindo progressivamente conforme a profundidade aumenta. A Figura 5 representa as parcelas de resistências responsáveis por constituir a capacidade de carga.

Figura 5 - Parcelas de resistência que constituem a capacidade de carga



Fonte: Cintra e Aoki (2010)

De um modo geral, a determinação da capacidade de carga de uma fundação profunda pode ser estimada a partir de métodos teóricos, empíricos e semiempíricos. Os métodos teóricos estudam a capacidade de carga por meio de modelos desenvolvidos na Mecânica dos Solos, como as fórmulas teóricas de Terzaghi e Meyerhof. Já os métodos empíricos geralmente partem de dados obtidos através de estudos de campo. Por fim, os métodos semiempíricos são determinados conforme estudos de dados geotécnicos, materiais utilizados e tipo de execução (Magalhães, 2010).

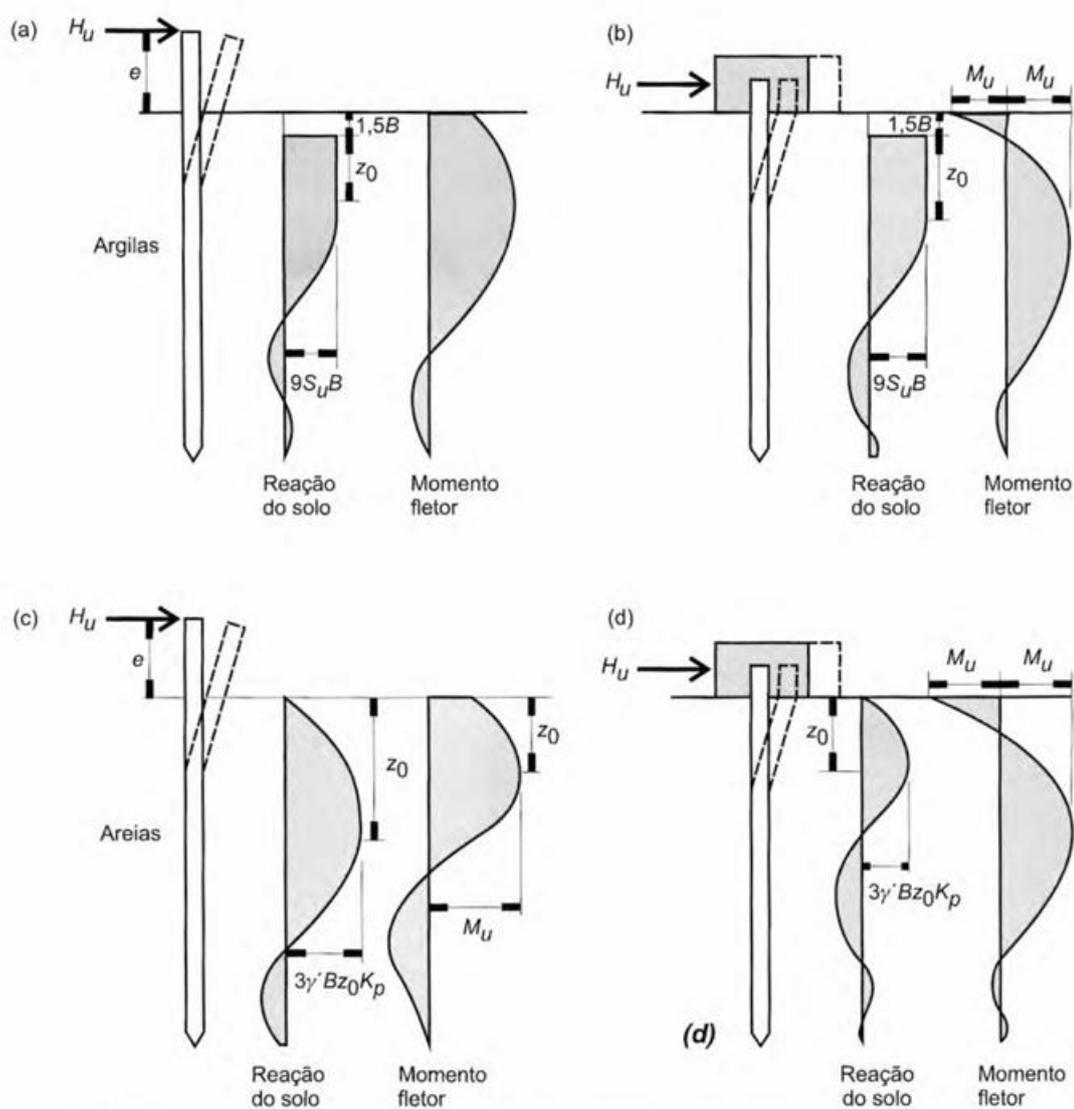
2.4.1.2. ESTACAS CARREGADAS HORIZONTALMENTE

Segundo Silva (2016), na literatura técnica, a análise do comportamento de estacas isoladas, submetidas a esforços horizontais, tem seguido quatro abordagens principais, cada uma com suas vantagens e desvantagens:

- Modelos elásticos;
- Modelos baseados em equilíbrio limite
- Modelos baseados no coeficiente de reação horizontal do solo;
- Modelos baseados no método dos elementos finitos (MEF).

Cintra e Aoki (2010) afirmam que nas estacas submetidas a cargas horizontais, apenas seu trecho superior requer armadura, enquanto é necessário obter, por outro lado, os deslocamentos horizontais da estaca, que geralmente apresentam valor máximo na cabeça e vão diminuindo com a profundidade. Além disso, é fundamental calcular os diagramas de momento fletor e esforço cortante para o adequado dimensionamento da estaca como uma peça estrutural. A Figura 6 demonstra a reação do solo com a estaca estudada e os diagramas de momentos fletores.

Figura 6 - Ilustração da distribuição da reação do solo quando submetido a esforço horizontal e diagramas de momentos fletores



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Um aspecto fundamental no estudo das estacas carregadas transversalmente é a reação do solo, que corresponde à forma como o terreno resiste à ação da estaca, configurando um problema complexo. Sabe-se que essa reação depende da natureza do solo, do nível de carregamento, do tipo de solicitação (estática, dinâmica, cíclica, entre outras) e das características da estaca, como sua forma e dimensão (Velloso e Lopes, 2010).

2.4.2. CORROSÃO

Para Serra (2006, apud Dalprá, 2019), corrosão significa “a deterioração das propriedades de um metal pela reação química ou eletroquímica com o meio que o envolve.”

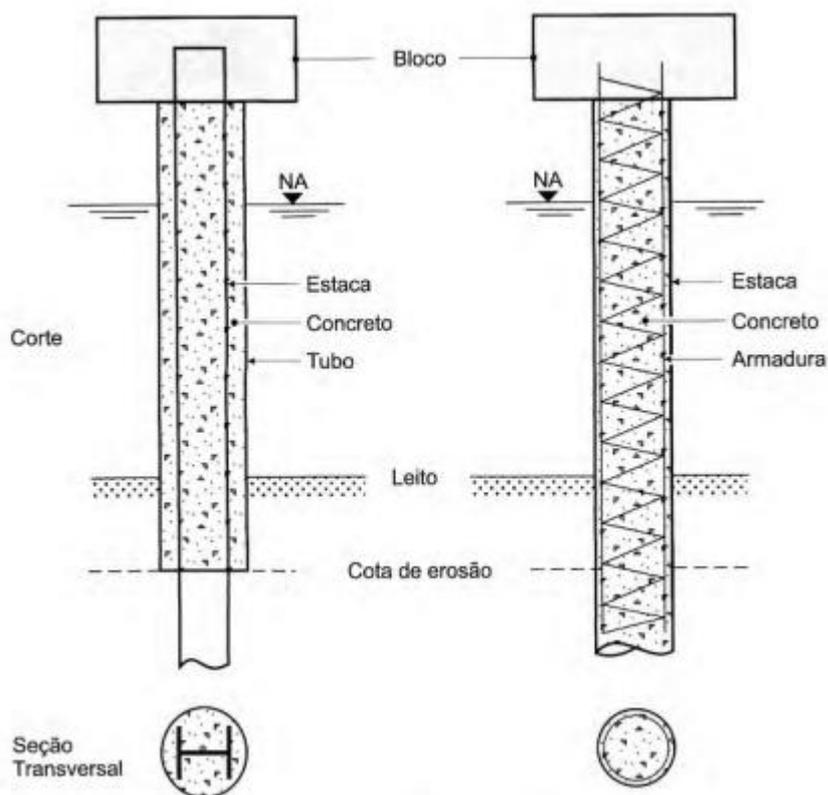
Gerdau (2018) aponta que as estacas de aço são amplamente utilizadas há mais de 120 anos e têm se mostrado mais duráveis do que os estudos teóricos previamente estabelecidos, principalmente em solos agressivos ou contaminados. Além disso, não existem registros na literatura internacional de falhas estruturais causadas pela corrosão dessas estacas quando imersas no solo.

A utilização de estacas metálicas para fundações é fundamental por sua capacidade de resistir aos carregamentos mecânicos das estruturas, podendo-se afirmar que, quando a seção transversal das estacas sofre corrosão e perde área, existe o risco de ruptura do elemento, o que pode levar ao comprometimento de toda a estrutura. Esse fenômeno destaca a importância de se monitorar e proteger as estacas, tendo em vista que sua degradação pode ter consequências graves para a segurança global da estrutura (Bispo e Tsuha, 2018).

Conforme Bispo e Tsuha (2018), em uma análise de durabilidade, é necessário considerar o risco de corrosão, o que requer conhecimento dos parâmetros que influenciam esse processo, tanto internos, como o solo, quanto externos, como contaminantes no solo, fuga de corrente, processo de instalação das estacas, entre outros.

Segundo Velloso e Lopes (2010), a corrosão das estacas metálicas, quando em contato com o solo natural não modificado, é normalmente insignificante. Assim, não há necessidade de adotar medidas protetivas, como pintura ou outros tratamentos especiais. A Figura 7 exemplifica o modelo de proteção contra a corrosão em estacas metálicas.

Figura 7 - Estacas metálicas: proteção contra a corrosão.



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

De acordo com Pannoni (2006), na maioria das aplicações, a utilização de estacas metálicas não exige tratamento anticorrosivo, pois, em solos secos, de modo geral, a velocidade com que a corrosão degrada os materiais enterrados é considerada irrelevante, devido à deficiência que os solos naturais apresentam em oxigênio, limitando a oxigenação para que ocorra a corrosão da estaca. Nesse contexto, uma estaca recém-cravada utiliza todo o oxigênio disponível em seu entorno. Para que a estaca continue o processo corrosivo, é preciso que haja mais oxigênio, o que não acontece de forma simples. Assim, alguns parâmetros merecem atenção especial para que haja o controle da velocidade da corrosão à medida que o solo se torna mais úmido, como o pH, teor de oxigênio, resistividade elétrica, composição química e atividade biológica do solo.

Entre os fatores citados anteriormente, Joppert Júnior (2007) destaca que o efeito da corrosão em estruturas enterradas de aço depende basicamente dos critérios a seguir:

- Granulometria do solo: solos que apresentam mais ar entre as partículas possuem a velocidade de corrosão inferior aos solos com pouco ar. Assim, as areias, por exemplo, que são formados por partículas maiores, facilitam o acesso de água e oxigênio, implicando na diminuição da velocidade de corrosão;
- Profundidade: um subsolo com composição homogênea em relação à granulometria pode apresentar variações na concentração de oxigênio com a profundidade, o que pode resultar em pilhas de aeração diferencial, intensificando a corrosão. Esse fenômeno também pode ocorrer quando as estacas atravessam camadas de solo com granulometria, compactidade e consistência distintas;
- Acidez do solo: Esse parâmetro constitui um impacto considerável sobre a capacidade de corrosão do solo. No geral, solos que possuem pH abaixo de 4 provocam corrosão intensa na maioria dos metais enterrados, mesmo sem oxigênio;
- Características químicas dos solos: solos com maior potencial de corrosividade contêm elementos químicos alcalinos, como sódio, potássio, cálcio e magnésio, além de compostos ácidos, como carbonatos, bicarbonatos, cloretos, nitratos e sulfatos;
- Resistividade elétrica do solo: a resistividade do solo, assim como a acidez, influencia o quesito corrosão nas estruturas enterradas - quanto maior a resistividade, menor a corrosão. A resistência está relacionada à quantidade de sais dissolvidos (maior quantidade de sais dissolvidos, implica em maior corrosão), temperatura, umidade, compactação e presença de materiais inertes.

Para Nunes e Dutra (2006, apud Dalprá, 2019) “um solo com baixa resistividade é mais agressivo, possui umidade permanente e sais minerais dissolvidos, enquanto um solo de resistividade elevada é menos agressivo e possui menos umidade e sais minerais dissolvidos.”

Gerdau (2018) menciona que a corrosão de estacas cravadas em solos com pH entre 4 e 10, faixa que abrange a maioria dos solos naturais, depende

essencialmente da presença conjunta de água e oxigênio. Sem a existência de um desses elementos, o processo corrosivo simplesmente não se desenvolve.

2.5. NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

2.5.1. NBR 6122/2022 (ABNT)

A NBR 6122:2022 (ABNT, 2022) menciona que o processo de dimensionamento das estacas metálicas deve obedecer às orientações presentes na NBR 8800, de modo que seja considerada a seção reduzida da estaca, ou seja, o desconto da espessura de sacrifício ao redor da estaca em contato com o solo. A NBR 6122:2022 também estipula que as estacas de aço total e permanentemente enterradas, independentemente da situação do lençol d'água, dispensam tratamento especial, desde que seja descontada a espessura indicada na Tabela 1:

Tabela 1 - Espessura de compensação de corrosão

Classe	Espessura mínima de sacrifício mm
Solos em estado natural e aterros controlados	1,0
Argila orgânica; solos porosos não saturados	1,5
Turfa	3,0
Aterros não controlados	2,0
Solos contaminados ^a	3,2
^a Casos de solos agressivos devem ser estudados especificamente.	

Fonte: NBR 6122:2022 (ABNT, 2022).

Ainda, caso a parte superior das estacas ficar desenterrada, obrigatoriamente deve ser protegida com encamisamento de concreto ou outro artifício de proteção de aço, ou até mesmo definir em projeto uma espessura de sacrifício maior (ABNT NBR 6122, 2022).

De acordo com a NBR 6122:2022 (ABNT, 2022), para peças reutilizadas (perfis e trilhos usados) é necessário realizar a verificação da seção real mínima da peça, tendo em vista que qualquer ponto da estaca, pode-se aceitar uma perda de no máximo 20% do valor nominal da peça (redução da área da seção transversal). Assim, para verificações quando atuarem apenas esforços axiais, devem ser utilizados os

seguintes valores para os coeficientes $\gamma_s = 2,35$ e $\gamma_f = 1,4$. Já para esforços de flexo-compressão e flexo-tração, devem obedecer aos valores de $\gamma_s = 2,00$ e $\gamma_f = 1,4$.

Além disso, a NBR 6122:2022 (ABNT, 2022) destaca que a realização das emendas das estacas de aço deve ser feita através de talas soldadas ou parafusadas, de modo a resistir às solicitações que possam surgir durante as etapas de manuseio, cravação e o trabalho do componente estrutural. Tais emendas também devem obedecer às espessuras de sacrifício descritas na Tabela 1.

3. METODOLOGIA

O trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica, adotando uma abordagem qualitativa e descritiva, acerca do estudo de casos documentados na literatura técnica. Dessa forma, a metodologia consiste na análise comparativa dos dados referentes a três obras que utilizaram estacas metálicas com seção decrescente com a profundidade, conforme expostas nas produções acadêmicas realizadas por Almeida (2013) e Amorim (2024).

3.1. SELEÇÃO DOS CASOS

Devido à escassez de pesquisas acadêmicas documentando casos de aplicação de estacas metálicas em fundações de edifícios altos, os três casos analisados foram selecionados a partir dos trabalhos elaborados por Almeida (2013) e Amorim (2024), com base nos seguintes critérios:

- Utilização de estacas metálicas com seção decrescente;
- Disponibilidade de dados técnicos relevantes, como dimensões, cargas aplicadas, perfil geotécnico, métodos executivos, desempenho observado;
- Diversidade de condições geotécnicas e estruturais, na medida do possível, a fim de permitir uma comparação abrangente.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS CASOS

Para cada caso selecionado, buscou-se coletar e organizar o máximo de informações importantes, como:

- Características da obra (localidade, finalidade, dimensões);
- Tipologia e dimensões das estacas metálicas;
- Metodologia de execução;
- Ensaios de carregamento realizados (caso haja);
- Desempenho observado durante e após a cravação (caso exista).

Nesse sentido, os dados foram organizados em tabelas comparativas e discutidos com base nos processos executados.

3.3. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Para realizar a análise comparativa, alguns critérios foram observados:

- Capacidade de carga da estaca;
- Adaptação de projeto devido ao tipo de solo e contexto da obra;
- Facilidade de execução;
- Custo estimado (quando disponível).

3.4. LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA

A análise realizada neste estudo baseia-se exclusivamente em dados obtidos através de pesquisa bibliográfica, que correspondem às informações apresentadas nos materiais originais. Como consequência, o aprofundamento e a precisão das análises estão sujeitas ao grau de detalhamento oferecido por essas fontes. Dessa forma, não foram realizados ensaios de campo ou instrumentações complementares, o que dificulta a comprovação prática dos dados e limita a generalização dos resultados a outros contextos geotécnicos e estruturais. Por isso, os resultados devem ser interpretados levando em conta as informações disponíveis e as particularidades de cada caso analisado.

4. ANÁLISE DOS CASOS DE OBRAS

4.1. OBRA 1 – JOÃO PESSOA, PB (ANO: 2012)

Segundo Almeida (2013), o primeiro caso de obra trata-se de um edifício residencial composto por 48 pavimentos, localizado no bairro do Bessa, em João Pessoa. O início da construção dessa edificação ocorreu em 2012 e a disposição dos pavimentos divide-se da seguinte maneira: subsolo, térreo, mezanino 1 e 2, 43 pavimentos tipo e cobertura.

As fundações do prédio foram projetadas em estacas metálicas com seção decrescente com a profundidade, onde o comprimento médio previsto em projeto era de 29 metros e a carga de trabalho para as estacas de 200 tf (2.000 KN). A infraestrutura foi dividida em 20 blocos de fundação, constituídos por 225 estacas metálicas. A nomeação dos blocos e quantidade de estacas por bloco, além da quantidade total estão expostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de estacas por bloco

Bloco de fundação	Quantidade de estacas
B1	11
B2	11
B3	12
B4	11
B5	8
B6	8
B7	11
B8	12
B9	15
B10	11
B11	7
B12	15
B13	9
B14	9
B15	7
B16	6
B17	11
B18	15
B19	18
B20	18

TOTAL	225
--------------	-----

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Além disso, os perfis utilizados para as estacas metálicas foram: perfil laminado HP 310 x 79 para primeira cravação e perfil laminado HP 310 x 110 para segunda cravação em diante. A autora relata que, em razão do atraso na entrega dos perfis, algumas estacas não foram cravadas com os perfis especificados anteriormente, sendo também utilizados os perfis laminados HP 310 x 93 e W 310 x 97 em raras situações.

Ao todo, foram realizados quatro furos de sondagem SPT, denominados SP 01, SP 02, SP 03 e SP 04, utilizados para a construção dos respectivos perfis geotécnicos, cujo ensaios obedeceram ao método de execução conforme a norma NBR 6484/2001, vigente à época. Os furos de sondagem SP 01, SP 02, SP 03 e SP 04 alcançaram, respectivamente, as profundidades de 40,50 m, 29,15 m, 32,00 m e 32,00 m, além dos níveis d'água encontrados nas profundidades de 1,70 m, 2,10 m, 2,25 m e 2,00 m. As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam a estratigrafia do solo com a profundidade.

Tabela 3 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 01

Classificação do solo	Profundidade (m)	NSPT médio
Aterro arenoso, com metralha; cor variegado	0 - 0,40	6
Areia fina; cor cinza claro (medianamente compacta)	0,40 - 3,00	13
Areia fina, siltosa; cor marrom (fofa)	3,00 - 4,00	9,5
Areia grossa, siltosa; cor marrom (medianamente compacta)	4,00 - 4,70	16
Areia fina, siltosa; cor cinza escuro (medianamente compacta a compacta)	4,70 - 8,60	19,7
Silte argiloso; cor cinza (mole)	8,60 - 10,90	2,9
Silte argiloso, com marisco; cor cinza (médio)	10,90 - 11,70	8
Areia fina, siltosa; cor cinza (compacta)	11,70 - 13,00	57

Areia grossa, siltosa, com pedregulho; cor cinza (muito compacta)	13,00 - 14,80	60
Argila orgânica; cor cinza escuro (muito mole a mole)	14,80 - 27,80	1,3
Argila siltosa; cor variegada (rija)	27,80 - 29,00	13
Areia fina, silto-argilosa; cor variegada (pouco compacta a compacta)	29,00 - 36,00	11,8
Areia média, silto-argilosa, com pedregulho; cor variegada (pouco compacta a medianamente compacta)	36,00 - 37,70	8
Areia grossa, siltosa, com pedregulho; cor marrom (medianamente compacta a compacta)	37,70 - 40,50	30,7

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Tabela 4 - Estratigrafia do solo com a profundidade - SP 02

Classificação do solo	Profundidade (m)	NSPT médio
Aterro arenoso; cor variegado	0 - 0,50	6
Areia fina; cor cinza claro (medianamente compacta)	0,50 - 2,00	16
Areia fina, siltosa; cor marrom (fofa a medianamente compacta)	2,00 - 3,80	4
Areia grossa, siltosa; cor marrom (medianamente compacta a compacta)	3,80 - 5,50	22,5
Areia fina, siltosa; cor cinza (medianamente compacta a compacta)	5,50 - 8,00	24
Silte argiloso; cor cinza (mole a médio)	8,00 - 11,00	4,2
Areia fina, siltosa, com marisco; cor cinza (medianamente compacta)	11,00 - 11,60	11
Areia média, siltosa; cor cinza (compacta a muito compacta)	11,60 - 14,00	40
Argila orgânica; cor cinza escuro (muito mole a mole)	14,00 - 24,00	1,1
Areia fina, siltosa; cor verde (medianamente compacta)	24,00 - 24,70	12
Areia fina, siltosa; cor variegada (fofa a compacta)	24,70 - 29,15	13,2

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Tabela 5 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 03

Classificação do solo	Profundidade (m)	NSPT médio
Areia fina; cor cinza claro (pouco compacta a medianamente compacta)	0 - 2,00	7,5
Areia fina, siltosa; cor marrom escuro (fofa a pouco compacta)	2,00 - 3,20	8
Areia média, siltosa; cor marrom (medianamente compacta)	3,20 - 5,00	12
Areia fina, siltosa; cor cinza (medianamente compacta a compacta)	5,00 - 8,00	22,3
Silte argiloso; cor cinza (mole a médio)	8,00 - 11,00	5
Silte argiloso, com marisco; cor cinza (médio)	11,00 - 11,70	10
Areia grossa, siltosa; cor cinza (compacta a muito compacta)	11,70 - 14,80	45
Areia fina, siltosa; cor cinza (medianamente compacta)	14,80 - 16,60	11
Argila orgânica; cor cinza escuro (muito mole a mole)	16,60 - 32,00	1,3

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Tabela 6 - Estratigrafia do solo com a profundidade – SP 04

Classificação do solo	Profundidade (m)	NSPT médio
Aterro arenoso, com metralha; cor variegado	0 - 0,40	8
Areia fina; cor cinza claro (medianamente compacta)	0,40 - 2,00	12
Areia fina, siltosa; cor marrom (pouco compacta)	2,00 - 3,70	7,5
Areia grossa, siltosa; cor marrom (medianamente compacta)	3,70 - 5,00	21
Areia fina, siltosa; cor cinza (medianamente compacta a compacta)	5,00 - 9,00	20
Silte argiloso; cor cinza (mole)	9,00 - 10,80	1,4
Excesso de marisco	10,80 - 11,50	60
	11,50 - 14,00	40

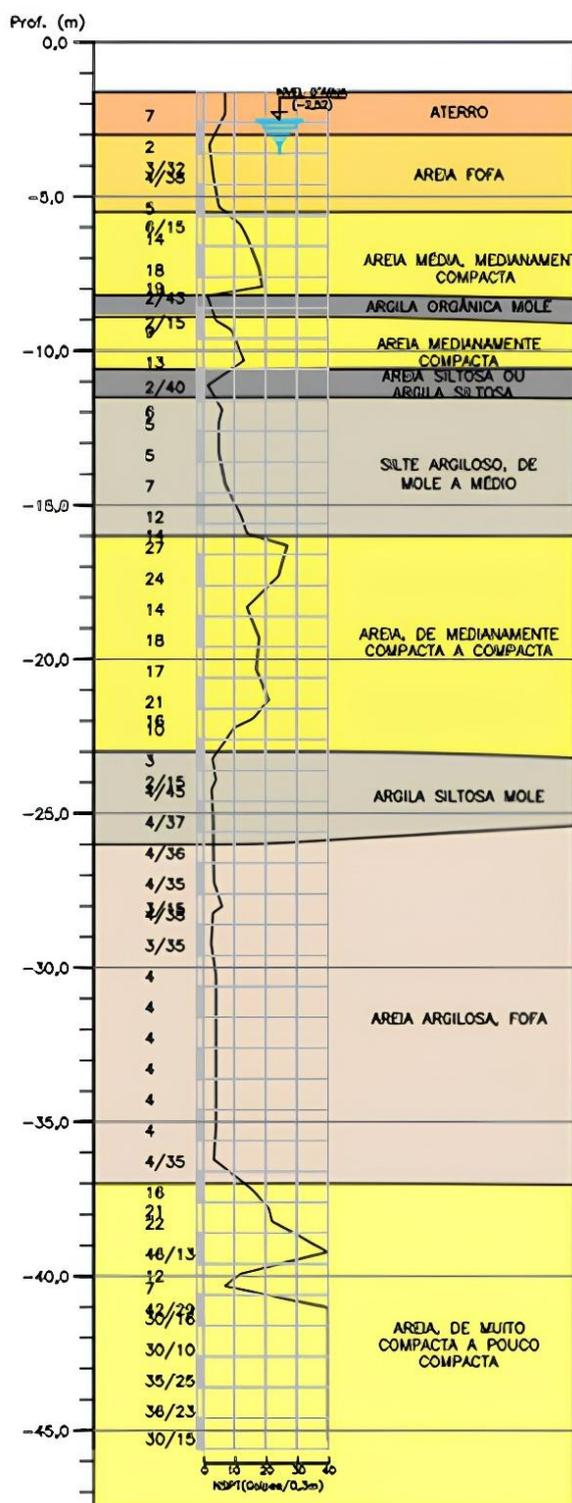
Areia média, siltosa; cor cinza (compacta a muito compacta)		
Argila orgânica; cor cinza escuro (muito mole a mole)	14,00 - 26,00	1,6
Argila siltosa; cor variegada (mole a média)	26,00 - 32,00	8,2

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

4.2. OBRA 2 – RECIFE, PE (ANO: 2005)

De acordo com Amorim (2024), o segundo caso de obra trata-se de um empreendimento constituído por duas torres idênticas, cada uma com 42 lajes em concreto armado, lâmina de construção de 500 m² e altura de 127 m. Cada prédio suporta uma carga vertical permanente de 240.000 KN e cargas horizontais de até 900 KN em alguns pilares. A Figura 8 apresenta os detalhes geotécnicos do solo.

Figura 8 - Seção transversal do perfil geotécnico



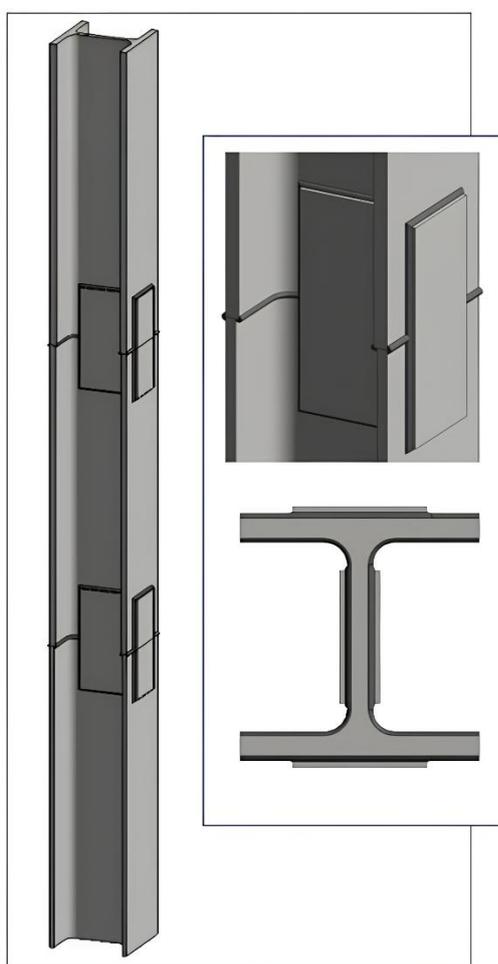
Fonte: Amorim (2024)

A determinação da capacidade de carga das estacas foi analisada pelos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), porém não foram disponibilizados pela autora. Inicialmente, foi proposto um projeto que contemplava o

uso de estacas metálicas com perfis HP – 310 x 125, aplicadas a uma profundidade de 40 m, com carga de projeto de 2.250 KN.

Em busca de otimização de projeto, foi proposto uma segunda solução com perfis mais leves (HP – 310 x 110 e HP – 310 x 93), ocasionando numa redução do peso de aço utilizado. Além disso, um terceiro projeto sugerido foi inovador por utilizar perfis metálicos de seção variável com a profundidade, conceito inédito em Recife na época. A Figura 9 ilustra o perfil da estaca metálica com seção variada.

Figura 9 - Seção transversal, vista 3D e detalhe das emendas das estacas metálicas laminadas com seção variada



Fonte: Amorim (2024)

O uso de seções variáveis é viável tecnicamente, pois a resistência lateral do solo permite reduzir o esforço ao longo da estaca, desde que os perfis pertençam à mesma série (Gusmão et al., 2006).

A Tabela 7 foi construída a partir da planta de locação das estacas metálicas disponibilizada pela autora e apresenta a nomeação dos blocos de fundação baseados na numeração das estacas e quantidade de estacas por bloco, além da quantidade total, para uma das edificações.

Tabela 7 - Quantidade de estacas por bloco para um edifício

Bloco de fundação	Quantidade de estacas
B1	8
B2	9
B3	6
B4	7
B5	6
B6	6
B7	14
B8	12
B9	7
B10	7
B11	6
B12	7
B13	8
B14	4
B15	6
B16	5
B17	5
B18	3
B19	7
B20	6
TOTAL	139

Fonte: Autor adaptado da planta de locação das estacas fornecida por Amorim (2024)

4.3. OBRA 3 – RECIFE, PE (ANO: 2020)

Conforme Amorim (2024), o terceiro caso de obra consiste em um complexo composto por duas torres, cada uma com 36 lajes. A torre A é sustentada por 19 pilares, enquanto a torre B apresenta 12 pilares internos e outros 48 posicionados ao redor da estrutura. As cargas verticais permanentes nas lajes variam entre 3.901 e 19.772 KN, e além dessas, a estrutura também está sujeita a esforços verticais e momentos provocados pela ação do vento.

A avaliação da capacidade de carga das estacas foi realizada com base nos métodos propostos por Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1982), cujo relacionam a resistência lateral e de ponta das estacas aos resultados obtidos nas sondagens. A partir desses métodos, foram determinadas as cargas máximas admissíveis para a fundação. Além disso, foi adotado um acréscimo sobre as cargas admissíveis de 15%, visando considerar os efeitos do vento, conforme previsto na norma vigente da época, NBR 6122 (ABNT, 2019).

As características e a quantidade inicial das estacas utilizadas no projeto estão dispostas na Tabela 8. No total, o projeto de fundações das torres previu a utilização de 216 estacas metálicas.

Tabela 8 - Características e quantitativos iniciais de projeto

Tipo	Quantidade	Seção transversal	Carga admissível (KN)	Comprimento unitário (m)	Comprimento total (m)
Tipo A	156	18 m (HP-310x125) + 12 m (HP-310x93) + 12 m (HP-310x79)	2.200	42,00	6552,00
Tipo B	47	18 m (HP-310x110) + 12 m (HP-310x93) + 12 m (HP-310x79)	1.900	42,00	1974,00
Tipo C	13	16 m (HP-310x93) + 24 m (HP-310x79)	1.550	40,00	520,00

Fonte: Adaptado de Amorim (2024)

As Tabelas 9 e 10 demonstram a quantidade de estacas por bloco de fundação para cada uma das torres, desenvolvidas com base na planta de locação das estacas metálicas disponibilizadas por Amorim (2024), além da quantidade total de estacas.

Tabela 9 - Quantidade de estacas por bloco para a torre "A"

Bloco de fundação	Quantidade de estacas
P1A	9
P2A	9
P3A	5
P4A	5
P5A	3

P6A	6
P7A	4
P8A	3
P9A	6
P10A	3
P11A	6
P12A	16
P13A	16
P14A	6
P15A	5
P16A	9
P17A	7
P18A	9
P19A	5
TOTAL	132

Fonte: Autor adaptado da planta de locação das estacas fornecida por Amorim (2024)

Tabela 10 - Quantidade de estacas por bloco para a torra "B"

Bloco de fundação	Quantidade de estacas
P1B	10
P2B	6
P3B	3
P4B	6
P5B	10
P6B	6
P7B	8
P8B	8
P9B	5
P10B	6
P11B	8
P12B	8
TOTAL	84

Fonte: Autor adaptado da planta de locação das estacas fornecida por Amorim (2024)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos por meio dos dados fornecidos pelas autoras selecionadas para compor a revisão bibliográfica, abrangendo provas de cargas e ensaios de carregamento dinâmico. Para facilitar a análise e interpretação dos resultados, foram elaboradas ao final da seção, tabelas comparativas que sintetizam os valores encontrados na literatura. Por meio dessas tabelas, é possível visualizar de forma clara os parâmetros analisados e realizar comparações, permitindo discutir a eficácia dos resultados obtidos, bem como as limitações identificadas para a metodologia adotada neste trabalho.

Inicialmente, foram apresentados os resultados descritos pelas autoras por obra, juntamente com suas respectivas discussões. Em seguida, será elaborada uma análise mais abrangente a respeito dos três casos de obras escolhidos.

5.1. OBRA 1 – JOÃO PESSOA, PB (ANO: 2012)

De acordo com Almeida (2013), para realizar o controle das estacas durante a execução, foram anotadas diversas informações para cada uma das 225 estacas, como comprimento cravado, número de pontos de solda, valor de nega, além das datas de início e fim de cravação.

A partir desses dados, as estacas apresentaram, em média, 30,67 metros de comprimento. Dentre todas as estacas analisadas, 73 estacas atingiram ou superaram os 30 metros, representando cerca de 32,44% do total, indicando que o tipo de estaca utilizado foi apropriado para as condições da obra, tendo em vista a profundidade alcançada. Além disso, o valor máximo registrado de nega foi de 10 mm, ficando dentro do limite estabelecido em projeto, que era de 15 mm, lembrando que segundo as observações constantes em projeto, a nega corresponde a penetração da estaca para dez golpes o martelo caindo de uma altura de 1 metro. Por fim, a autora relata que não foi realizado controle de capacidade de carga por repique, devido aos riscos envolvidos para o operador.

A autora cita que foram realizadas provas de carregamento dinâmico por uma empresa terceirizada e que estas, procederam-se em três momentos distintos, nomeados por ela de 1ª etapa, 2ª etapa e 3ª etapa, sendo realizados ensaios em quatro estacas por etapa.

Desse modo, a Tabela 11 demonstra os períodos de realização de cada uma das etapas, bem como as estacas utilizadas para o ensaio.

Tabela 11 - Apresentação das etapas e suas respectivas estacas ensaiadas

Etapa	Período	Estaca	Bloco
1ª etapa	10/10/2012 e 11/10/2012	E1	B03
		E7	B13
		E3	B16
		E6	B16
2ª etapa	11/01/2013 e 14/01/2013	E1	B11
		E5	B05
		E8	B20
		E11	B02
3ª etapa	19/02/2013	E1	B14
		E8	B02
		E9	B12
		E11	B08

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Além disso, conforme a pesquisadora, para cada uma das etapas, foram utilizados bate-estacas de queda-livre, variando-se o seu peso entre os martelos de 2.500 kgf, 2.800 kgf e 3600 kgf, e as respectivas alturas de queda. Na 1ª etapa, o peso do martelo bate-estaca era de 2,5 toneladas e sua altura variava de 0 a 6 m. Já a 2ª etapa, variava-se a altura de queda de 0 a 4 m e utilizou-se martelos com pesos diferentes: 2,5 toneladas, 2,8 toneladas e 3,6 toneladas. Por fim, na 3ª etapa, as estacas foram ensaiadas com dois bate-estacas de pesos distintos: 2,5 toneladas e 2,8 toneladas, enquanto suas alturas de queda variavam de 0 a 4,50 m.

Nesse sentido, variando a altura de queda e as diferentes energias transmitidas às estacas, determinaram-se por meio de cálculos diretos do ensaio de carregamento dinâmico, as resistências estáticas equivalentes máximas para cada uma das estacas ensaiadas por etapa. Assim, obtiveram-se os resultados de resistências máximas (RMX) ao final de cada etapa. As Tabelas 12, 13 e 14, demonstram os resultados do ensaio de carregamento dinâmico expostos por Almeida (2013) na conclusão das etapas.

Tabela 12 - Resultados da 1ª etapa

Numeração da estaca	Tipologia da estaca	Seção de medição (mm²)	Data de cravação	Comprimento no solo (m)	Comprimento total (m)	RMX (ton)
E1 (B03)	HP - 310 x 110	14100	26/09/2012	29,00	30,00	337
E7 (B13)	HP - 310 x 110	14100	05/09/2012	28,60	29,60	330
E3 (B16)	HP - 310 x 110	14100	29/08/2012	50,30	51,60	392
E6 (B16)	HP - 310 x 110	14100	03/09/2012	38,70	40,20	329

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Tabela 13 - Resultados da 2ª etapa

Numeração da estaca	Tipologia da estaca	Seção de medição (mm²)	Data de cravação	Comprimento no solo (m)	Comprimento total (m)	RMX (ton)
E1 (B11)	HP - 310 x 110	14100	09/01/2013	29,60	30,60	378
E5 (B05)	HP - 310 x 110	14100	06/12/2012	39,00	39,80	372
E8 (B20)	HP - 310 x 110	14100	09/01/2013	28,50	30,00	440
E11 (B02)	HP - 310 x 110	14100	09/01/2013	30,00	30,90	363

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Tabela 14 - Resultados da 3ª etapa

Numeração da estaca	Tipologia da estaca	Seção de medição (mm²)	Data de cravação	Comprimento no solo (m)	Comprimento total (m)	RMX (ton)
E1 (B14)	HP - 310 x 110	14100	05/02/2013	29,60	30,90	267
E8 (B02)	HP - 310 x 110	14100	07/01/2013	41,00	42,30	366
E9 (B12)	HP - 310 x 110	14100	05/02/2013	29,17	31,07	361
E11 (B08)	HP - 310 x 110	14100	18/01/2013	29,00	30,00	356

Fonte: Adaptado de Almeida (2013)

Desse modo, por meio dos resultados fornecidos pela autora, analisando-se os menores valores obtidos para resistência máxima (RMX) nas estacas ensaiadas em cada uma das etapas, temos que essas resistências mobilizadas apresentam fatores de segurança de:

$$\frac{329}{200} = 1,65$$

$$\frac{363}{200} = 1,82$$

$$\frac{267}{200} = 1,34$$

Conforme as especificações presentes em projeto, a carga de trabalho é de 200 tf (2.000 KN) e a carga mobilizada no ensaio de carregamento dinâmico deve apresentar valor de 320 tf (3.200 KN), considerando um fator de segurança de 1,60. Então, é perceptível que o único valor que apresentou fator de segurança menor que 1,60 foi de 267 toneladas e segundo Almeida (2013), não se configura como ruptura, mas sim resistência mobilizada, tendo em vista que esse valor obedece a carga de trabalho constante no projeto.

5.2. OBRA 2 – RECIFE, PE (ANO: 2005)

Amorim (2024) cita que nessa obra, foram executadas estacas piloto com o intuito de validar a capacidade de carga das estacas. Assim, realizaram-se ensaios de carregamento dinâmico para o projeto de fundações apresentado, o qual revelaram valores satisfatórios, demonstrando que a utilização de estacas metálicas com seção variável com a profundidade era uma solução viável, já que era um conceito inédito para a cidade de Recife na época. Desse modo, o projeto foi aprovado e liberado para início da obra.

Além disso, a autora também relata que posteriormente, uma das estacas ensaiadas com carregamento dinâmico, foi selecionada para realização de duas provas de cargas, uma lenta seguida de outra rápida. Desse modo, é mencionado que os valores obtidos com esses procedimentos foram próximos a 5.000 KN e o recalque

elástico medido apresentou-se na mesma ordem de grandeza daquele estimado por ela com base na distribuição de resistência lateral proposta por Aoki e Velloso (1975), sendo considerados por ela como resultados positivos.

Vale salientar que, nenhum desses resultados do ensaio de carregamento dinâmico ou provas de cargas foi exposto por ela em seu trabalho acadêmico, somente comentados, porém, devido à escassez de casos de obras na literatura, este foi selecionado por se tratar de um projeto de fundação em estacas metálicas com seção variável, enquadrando-se na metodologia desse trabalho.

Além disso, a pesquisadora comenta que comparando-se as três soluções apresentadas para fundação desse empreendimento, a última gerou uma redução no consumo de aço relativo aos outros dois. A Tabela 15 indica os consumos de aços previstos para os projetos 1 e 2, além do utilizado no projeto 3 (final).

Tabela 15 - Consumo de aço para as soluções de fundações apresentadas nos projetos da obra 2

Projetos	Solução de fundação	Consumo de aço (kg)
Projeto 1	Estacas metálicas com seção constante (HP - 310 x 125)	685.000
Projeto 2	Estacas metálicas distribuídas com perfis mais leves de seção constante (HP - 310 x 110 e HP - 310 x 93)	615.980
Projeto 3	Estacas metálicas com seção variável com a profundidade	533.898

Fonte: Autor elaborada a partir dos dados fornecidos por Amorim (2024)

Então, os cálculos das reduções do consumo de aço para o último projeto em relação aos dois primeiros, são exemplificados a seguir:

$$\frac{533.898}{685.000} = 0,78$$

$$Redução = 1 - 0,78 = 0,22 = 22\%$$

$$\frac{533.898}{615.980} = 0,87$$

$$\text{Redução} = 1 - 0,87 = 0,13 = 13\%$$

Dessa forma, o terceiro projeto apresentado e aprovado para execução, apresentou uma redução de 22% no consumo de aço em relação ao primeiro, ocasionando uma economia aproximada segundo a autora de R\$723.000,00 (valores do ano 2006) e uma redução de 13% no consumo de aço referente ao segundo, em que a autora não documentou a otimização dos gastos para esse caso.

5.3. OBRA 3 – RECIFE, PE (ANO: 2020)

Segundo Amorim (2024), durante a execução do projeto de fundações, foi prevista a realização de diversos ensaios para avaliar o desempenho das estacas, incluindo dez ensaios de carregamento dinâmico e duas provas de carga estática, uma em cada torre. O início da cravação ocorreu pela torre B, utilizando o martelo vibratório (ICE 28RF), sendo esta a primeira aplicação dessa metodologia para perfis laminados na cidade de Recife.

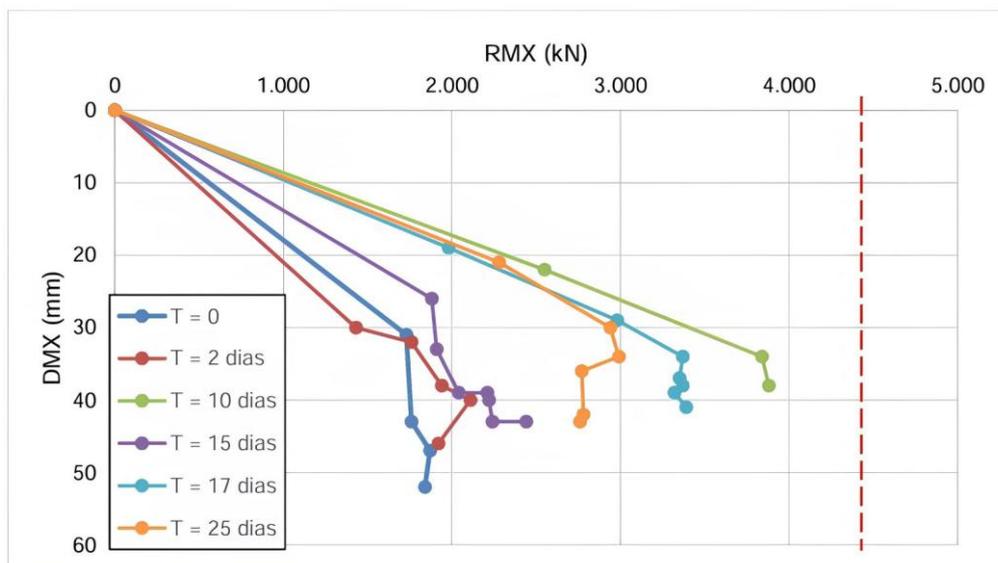
A autora relata que, inicialmente, uma estaca piloto (P1B-E08) foi submetida a prova de carga estática, seguida por seis ensaios de carregamento dinâmico, cujos resultados apontaram que a capacidade de carga e a rigidez das estacas aumentavam à medida que o tempo passava, conforme demonstrado na Tabela 16 e no Gráfico 1. Entretanto, não foi atingida a carga de ruptura prevista em projeto, sendo aproximadamente 4.400 KN.

Tabela 16 - Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B)

Estaca	Tipo	Comprimento unitário (m)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (KN)
P8B-E01	A	42,00	0	1.810
P6B-E05	A	42,00	2	2.110
P1B-E01	B	42,00	10	3.380
P10B-E03	A	42,00	15	2.240
P12B-E02	B	42,00	17	3.370
P4B-E03	B	42,00	25	2.990

Fonte: Adaptado de Amorim (2024)

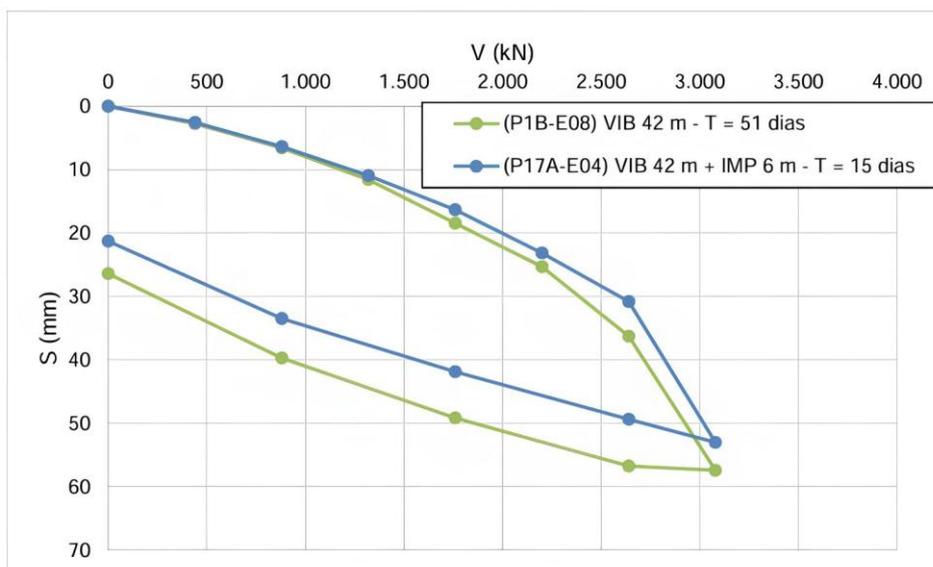
Gráfico 1 - Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B)



Fonte: Amorim (2024)

Novas provas de carga estática foram executadas em ambas as torres, porém, mesmo com ajustes como o aumento do comprimento das estacas e a substituição do martelo, utilizando-se o de impacto, não foi observado um desempenho satisfatório, alcançando no máximo 3.080 KN com recalques excessivos, como pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Resultados PDA



Fonte: Amorim (2024)

Diante disso, foram feitas novas campanhas de ensaios de carregamento dinâmico, buscando uma melhoria nos resultados, aplicando estacas mais longas e a utilização do martelo de impacto após a recravação. Apesar de haver um ganho significativo de 24% na capacidade após nove dias, tais resultados ainda encontravam-se abaixo do esperado. Investigações geotécnicas adicionais revelaram que as pontas das estacas estavam apoiadas sobre uma camada de seixos fraturados, cujo apresentava menor resistência que o indicado pelos valores de N_{spt} .

Tabela 17 - Resultado ECD (2ª e 3ª campanhas)

Estaca	Tipo	Comprimento unitário (m)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (KN)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (KN)
P8B-E08	A	44,00	1	2.547	9	3.042
P12B-E07	A	44,00	1	2.422	9	3.285
P4B-E04	B	47,00	1	2.299	9	2.813
P1B-E10	A	46,00	1	2.390	9	3.121
P6B-E01	B	47,00	1	2.062	9	2.561
P9B-E05	B	46,00	1	1.800	9	2.008

Fonte: Adaptado de Amorim (2024)

Para solucionar esse problema, a pesquisadora cita que, foi adotado um reforço das fundações através da introdução de estacas do tipo D, compostas por dois perfis metálicos soldados: 18 m (W – 250x80) + 24 m (W – 250x62). Foram acrescentadas 58 estacas na torre A e 34 na torre B.

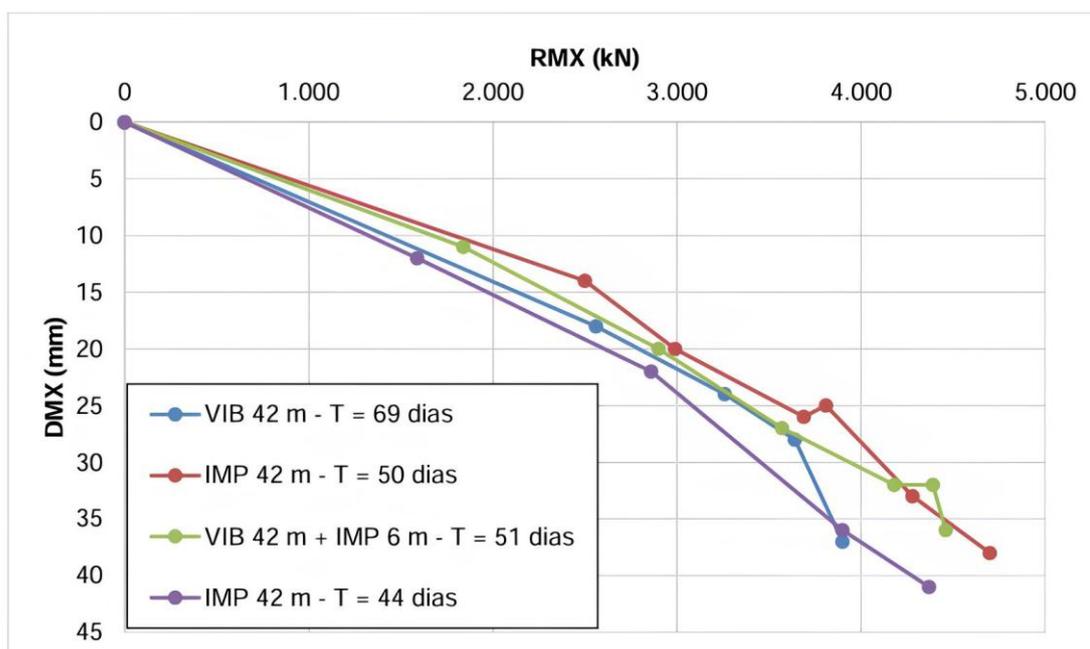
Após aguardar aproximadamente 50 dias para realizar os quatro ensaios PDA na torre A, estes demonstraram que as estacas conseguiram atingir resistências próximas ao valor da resistência mobilizada esperado em projeto (cerca de 4.358 KN). Além disso, foi constatado que as estacas cravadas exclusivamente com martelo de impacto apresentaram melhor desempenho, mesmo que tenham sido utilizados menor comprimento, em comparação com as cravadas apenas com martelo vibratório. As características das estacas ensaiadas com solução de reforço estão expostas na Tabela 18 e no Gráfico 3, apresentando os resultados dos quatro últimos ECD.

Tabela 18 - Resultado ECD (Torre A)

Estaca	Tipo	Comprimento unitário (m)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (kN)	Tipo de martelo
P1A-E05	B	42,00	69	3.904	Vibratório
P8A-E02	B	42,00	50	4.713	Hidráulico
P17A-E04	B	42,00	51	4.446	Vibratório
P19A-E01	A	42,00	44	4.370	Hidráulico

Fonte: Adaptado de Amorim (2024)

Gráfico 3 - Resultados ECD



Fonte: Amorim (2024)

5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS 3 CASOS DE OBRAS

A partir da análise dos três casos de obras selecionados e documentados por Almeida (2013) e Amorim (2024), foi possível realizar uma análise comparativa que serve de contribuição para compreender a aplicabilidade de estacas metálicas com seção decrescente com a profundidade em diferentes contextos geotécnicos e finalidades estruturais. Cada estudo trouxe contribuições relevantes tanto relacionado ao desempenho das fundações quanto à viabilidade técnica e econômica da solução adotada, sendo extremamente importantes para elaboração desse trabalho.

5.4.1. DESEMPENHO DAS ESTACAS (CAPACIDADE DE CARGA)

Na obra 1 (João Pessoa, PB), a realização dos ensaios de carregamento dinâmico em três etapas evidenciou que a maior parte das estacas utilizadas como objeto de estudo, alcançou resistências adequadas com a carga de trabalho prevista em projeto (200 tf), com o fator mínimo de segurança aceitável de 1,60. Embora a grande maioria comportou-se como esperado, uma das estacas apresentou RMX inferior ao critério citado (267 tf), com fator de segurança de 1,34, porém, ainda assim, encontrava-se dentro da carga de trabalho prevista, não caracterizando ruptura, mas sim resistência mobilizada. Isso indica que, os ensaios apresentaram resultados satisfatórios.

Já na obra 2 (Recife, PE – 2005), embora os dados quantitativos dos ensaios realizados não tenham sido divulgados pela autora em sua totalidade, os resultados descritos apontaram boa correlação entre os valores obtidos nas provas de carga e as estimativas pelos métodos teóricos, validando a adoção da solução com seção variável. Destaca-se ainda a expressiva redução no consumo de aço, chegando a 22% em relação ao projeto inicial, o que relevou, além do bom desempenho técnico, um ganho econômico relevante.

Por fim, na obra 3 (Recife, PE – 2020), os ensaios apontaram inicialmente valores abaixo do previsto, principalmente nos testes realizados logo após a cravação utilizando o martelo vibratório. No entanto, aplicando-se o martelo de impacto e estendendo o tempo entre a cravação e o ensaio, observou-se uma melhora significativa da resistência mobilizada, apresentando um ganho de até 24%. Posteriormente, com o reforço das fundações e a introdução de novas estacas (denominadas do tipo D), os resultados se aproximaram da capacidade de carga de projeto (aproximadamente 4.358 KN), evidenciando a importância da adaptação do método executivo conforme o comportamento observado em campo.

5.4.2. ADAPTAÇÃO AO SOLO E METODOLOGIA EXECUTIVA

As diferentes metodologias aplicadas durante a execução nos três casos mostram como o tipo de solo e as condições locais influenciam de forma direta no desempenho das estacas. Enquanto na obra 1, demonstrou-se boa adequação das técnicas de cravação às exigências do terreno, mesmo com as variações nos

equipamentos, sendo considerados resultados positivos, na obra 3 foi necessário revisar a abordagem adotada, após identificar que as estacas estavam apoiadas sobre uma camada de seixos fraturados, o que foi responsável por comprometer inicialmente a performance das fundações. Tal situação destaca a importância da caracterização geotécnica detalhada e da flexibilidade dos projetos para ajustes durante a execução.

5.4.3. CUSTO E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO

No caso de obra 2, foi possível perceber a relevância da otimização do projeto de fundações, não apenas relacionado ao ponto de vista técnico, mas também econômico. A solução final, com estacas metálicas de seção variável com a profundidade, resultou em significativa economia de aço e custos, reforçando a importância de estudar e viabilizar a metodologia proposta em projeto.

5.4.4. EFEITO DO TEMPO PÓS-CRAVAÇÃO (SET-UP)

Um aspecto importante identificado de forma clara no caso de obra 3, foi a questão do efeito do tempo pós-cravação (set-up), onde observou-se um aumento de até 24% na resistência das estacas após nove dias. Esse comportamento destaca a relevância de considerar o tempo de repouso entre as análises de desempenho, tendo em vista que alguns solos apresentam ganho de resistência com o tempo.

5.4.5. QUALIDADE E DETALHAMENTO DOS DADOS

As obras 1 e 3 ofereceram informações técnicas consistentes e bastante completas, possibilitando assim análises mais aprofundadas. No caso de obra 2, embora ser considerado relevante por apresentar a aplicação inovadora de uma solução para época, forneceu dados de forma mais superficial, apenas comentados qualitativamente pela autora, sendo sua inclusão justificada pela escassez de casos em estacas metálicas na literatura.

5.4.6. LIMITAÇÕES E POSSIBILIDADES DE MELHORIA

Ainda que os dados analisados tenham sido de extrema importância para execução do trabalho e sejam consistentes dentro de seus respectivos contextos, a dependência de informações documentadas nas produções acadêmicas limita o aprofundamento da análise. A ausência de dados mais completos (em especial o caso de obra 2) e a impossibilidade de validação prática através de ensaios de campo para construção desse trabalho, impedem generalizações. No entanto, o levantamento realizado fornece uma base sólida para futuras investigações referentes as fundações profundas em estacas metálicas e reforça a viabilidade do seu uso com seção decrescente dependendo das características apresentadas pela obra. A Tabela 19 apresenta uma síntese dos resultados a partir de um comparativo das obras analisadas.

Tabela 19 - Quadro comparativo das obras analisadas

Critério de análise	Obra 1 - João Pessoa (2012)	Obra 2 - Recife (2005)	Obra 3 - Recife (2020)	Síntese/Conclusão
Tipo de estaca	Seção variável com a profundidade	Seção variável com a profundidade	Seção variável com a profundidade	-
Influência do tipo de martelo	Uso de martelo de queda livre com diferentes pesos (2,5 a 3,6 tf) e altura.	Não especificado	Inicialmente vibratório -> impacto (recravação)	O tipo de martelo influencia diretamente na eficiência da cravação e mobilização de carga.
Capacidade de carga mobilizada (RMX)	Variou de 267 a 440 tf (RMX); maioria com FS > 1,60, exceto uma estaca.	Valores mencionados (~5.000 kN), mas não apresentados.	Inicialmente insuficiente (1.800 a 3.380 kN); após reforço, atingiu até 4.713 kN.	Obra 1 teve desempenho técnico regular; Obra 3 precisou de ajustes; Obra 2 sem dados precisos.
Ensaio realizados	Carregamento dinâmico em 3 etapas.	Carregamento dinâmico + provas de carga (rápida e lenta)	Carregamento dinâmico + provas de carga estática (inicial e após reforço)	Importância da realização de ensaios para determinação da capacidade de carga
Efeito do tempo pós-cravação (Set-up)	Não mencionado.	Não mencionado.	Aumento de até 24% na RMX após 9 dias.	Evidência clara do efeito de set-up na Obra 3, fundamental para análises mais precisas.
	Não mencionado.			

Eficiência do projeto (consumo de Aço)		Redução de 22% e 13% no consumo de aço com seção variável.	Não comparado, mas há menção ao uso de estacas reforçadas (tipo D).	Projeto 2 destacou economia de materiais como ponto forte da solução.
Adaptação às condições de campo	Boa adaptação; diferentes pesos e alturas utilizados conforme necessidade.	Projeto pioneiro, validado com provas de carga.	Inicialmente mal adaptado; necessidade de reforço devido a camada de seixos fraturados.	Soluções demonstram flexibilidade, mas reforçam a importância da caracterização geotécnica detalhada.
Economia / Otimização	Não abordada	Redução de 22% no consumo de aço (em relação ao projeto inicial)	Sem destaque econômico, aumento de custos devido à necessidade de reforço	Importância de analisar bem os projetos para otimizações
Qualidade e detalhamento dos dados	Alto detalhamento (tabelas, datas, pesos dos martelos, RMX).	Dados técnicos ausentes; apenas menções qualitativas.	Tabelas e gráficos, com análise detalhada.	Obra 1 e 3 permitiram análise mais robusta. Obra 2 foi incluída por seu caráter inédito, apesar das limitações.

Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, os resultados analíticos reforçam a viabilidade das estacas metálicas com seção decrescente com a profundidade, ao mesmo tempo que evidenciam a importância de uma abordagem bastante criteriosa quanto aos métodos executivos, à adaptação ao solo local em estudo e ao monitoramento do desempenho ao longo do tempo. Embora tenha existido dificuldades para seleção de pesquisas acadêmicas, a elaboração do trabalho alcançou os resultados definidos nos objetivos.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou a análise comparativa entre três casos de obras que utilizaram estacas metálicas com seção decrescente ao longo da profundidade, tendo como base os estudos realizados por Almeida (2013) e Amorim (2024). Através da revisão bibliográfica, foi possível identificar as vantagens e as limitações apresentadas por esse tipo de fundação profunda, bem como sua aplicabilidade em diferentes cenários geotécnicos e estruturais.

A metodologia de análise dos casos demonstrou que, as estacas metálicas mostraram-se adequadas as condições exigidas, destacando principalmente sua capacidade de carga, além da adaptação do projeto às características do solo local. Na obra 1, em João Pessoa, documentada por Almeida (2013), por exemplo, os ensaios de carregamento dinâmico realizados durante o processo construtivo da fundação, indicaram que as estacas alcançaram o valor de capacidade esperado, com apenas um caso isolado que apresentou um desempenho ligeiramente inferior ao esperado nas especificações do projeto, entretanto ainda estava dentro dos parâmetros considerados seguros. Já na obra 2, em Recife, relatada por Amorim (2024), foi possível verificar a viabilidade técnica e econômica da utilização de estacas com seção variável, a partir da abordagem qualitativa dos dados, o que resultou numa redução significativa de aço e custos. Por fim, o caso 3, também em Recife, ressaltou a importância do estudo aprofundado para realizações de ajustes no projeto e na metodologia executiva, após ter sido identificado um problema geotécnico que estava comprometendo o desempenho inicial das fundações. Desse modo, foi adotado um reforço como solução, com a introdução de novas estacas, revelando-se eficiente para correção do problema.

Além disso, esse estudo enfatizou a influência de aspectos importantes como o efeito do tempo pós-cravação (set-up), responsável por contribuir positivamente para o aumento da resistência das estacas no terceiro caso. Então, o acompanhamento contínuo do desempenho apresentado pelas fundações, bem como versatilidade nos métodos executivos, mostraram-se fundamentais para garantir a correta adequação das condições de projeto, aquelas apresentadas no terreno.

Apesar das contribuições de cada obra para o estudo, a principal limitação encontrada foi a dependência de um aprofundamento das informações disponíveis na literatura, o que impediu a realização de uma validação prática mais detalhada. No

caso de obra 2, a falta de dados mais abrangentes, restringiu a análise dos resultados. Contudo, o trabalho alcançou os seus objetivos, oferecendo uma base para a realização de futuras investigações referentes a utilização de estacas metálicas com seção decrescente.

Por fim, os resultados encontrados evidenciam a viabilidade e eficiência do uso de estacas metálicas com seção decrescente, desde que haja uma abordagem rigorosa e um estudo detalhado no planejamento do projeto, no controle da execução das fundações e no monitoramento constante das condições do terreno. Esse trabalho tem como objetivo ajudar a entender melhor o comportamento desse tipo de fundação em diferentes situações, e também pretende abrir caminho para novos estudos na área de fundações profundas no futuro.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as limitações metodológicas deste estudo, especialmente no que se refere à ausência de dados obtidos diretamente em campo e à dependência de informações documentadas em produções acadêmicas anteriores, recomenda-se que pesquisas futuras busquem ampliar e aprofundar o conhecimento sobre o tema por meio das seguintes abordagens:

- **Realização de investigações experimentais e instrumentações em campo**, como provas de carga estática e dinâmica, visando validar os resultados observados nos casos documentados e permitir uma análise mais precisa do comportamento das estacas metálicas com seção decrescente;
- **Ampliação da base de estudos de caso**, incorporando novas obras em diferentes contextos geotécnicos e estruturais, a fim de proporcionar maior representatividade e abrangência as análises comparativas;
- **Análises de viabilidade econômica detalhadas**, comparando o uso de estacas metálicas com outras tipologias de fundações profundas, considerando critérios como custo de materiais, tempo de execução e impacto no cronograma da obra;
- **Estudos aprofundados sobre o efeito do tempo pós-cravação (set-up)**, especialmente em solos onde esse fenômeno pode representar ganho

significativo de resistência, por meio de ensaios realizados em diferentes intervalos de tempo;

- **Avaliação do desempenho a longo prazo das fundações**, incluindo aspectos como recalques diferenciais, comportamento sob cargas horizontais, etc;
- **Análise de sustentabilidade das fundações metálicas**, levando em consideração o reaproveitamento de perfis e o impacto ambiental das diferentes soluções de fundação.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2022.

ALBUQUERQUE, Flavia Rodrigues et al. **Estudo Comparativo de Fundações em Edifício Alto: Estacas Hélice Contínua versus Estacas Escavadas com Fluido Estabilizante em Goiânia**, 2023.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; NOGUEIRA, R. C. R.; CARVALHO, David de; PASCHOALIN FILHO, João Alexandre; KORMANN, Alessander C Morales. **Comportamento de uma estaca metálica tipo perfil I laminado no Campo Experimental da Unicamp**. 08/2006, XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Vol. 2, pp. 1149-1154, Curitiba, PR, Brasil, 2006.

ALMEIDA, Daniela Barrêto Nóbrega de. **Análise do comportamento de estacas metálicas em um depósito de solo mole na cidade de João Pessoa/PB**. 2013.

ALONSO, U. R. **Estacas Premoldadas**. In: HACHICH, W. et. al (Eds.) **Fundações: teoria e prática**. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 1998. p.373-399

AMORIM, Marina Didier Pedrosa de. **Análise e desempenho de estacas metálicas executadas em solos sedimentares**. 2024.

AMORIM, Marina Didier et al. **Evolução das técnicas e dos tipos de estacas metálicas da Cidade do Recife-Casos de obras**.

BISPO, Malcom Barbosa; TSUHA, Cristina de Hollanda Cavalcanti. **Comparação entre métodos analíticos e as recomendações das normas sobre corrosão de estacas metálicas**. Anais, 2018.

CURY FILHO, D. **Previsão da carga de ruptura de estacas metálicas submetidas a esforços de compressão em solo de diabásio da região de Campinas / SP**. 2016. 223p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DAUBIAN, Bruno Alves. **A escolha correta da estaca para a fundação da obra Acqua Verano**.

DALPRÁ, Charles Augusto. **Estudo de caso de corrosão em estacas helicoidais de aço patinável em torres de transmissão de energia**. 2019.

DUTRA, Aldo. D.; NUNES, Laerce de P.: **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. Rio de Janeiro: JR Editora técnica, 1987.

GERDAU. **Estacas metálicas Gerdau**, 2018. [S.l.], (9. ed.)

GONÇALVES, Sérgio Fernandes. **Estudo do comportamento à compressão de estacas metálicas curtas em solo sedimentar**. 2008.

Gusmão A. D.; Gusmão Filho, J. A.; Maia, G. B.; Aleixo, L. **Otimização de fundações com estacas de perfis laminados**. In: COBRAMSEG 2006, Curitiba. Anais... Curitiba. 2006. v.2., p. 1161-1165.

JOPPERT JÚNIOR, I. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução**. Editora PINI, São Paulo, 2007. 221p.

LIMA, Fernando Antonio Leite Vieira. **Análise do comportamento de estacas metálicas apoiadas em horizonte de alta resistência**. 2018.

MAGALHÃES, Celio Marcio. **Estudo comparativo por análise computacional de fundações constituídas por diferentes elementos metálicos em aço**. 2010.

PANNONI, F.; *et al.* **Coletânea do uso do aço: estacas metálicas Gerdau**. 3^a Ed. São Paulo: Gerdau, 2008.

PANNONI, Fabio Domingos. **Durabilidade de estacas metálicas cravadas no solo**. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE VI, v. 3, p. 91-103.

SERRA, Eduardo T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Rio de Janeiro, 2006.

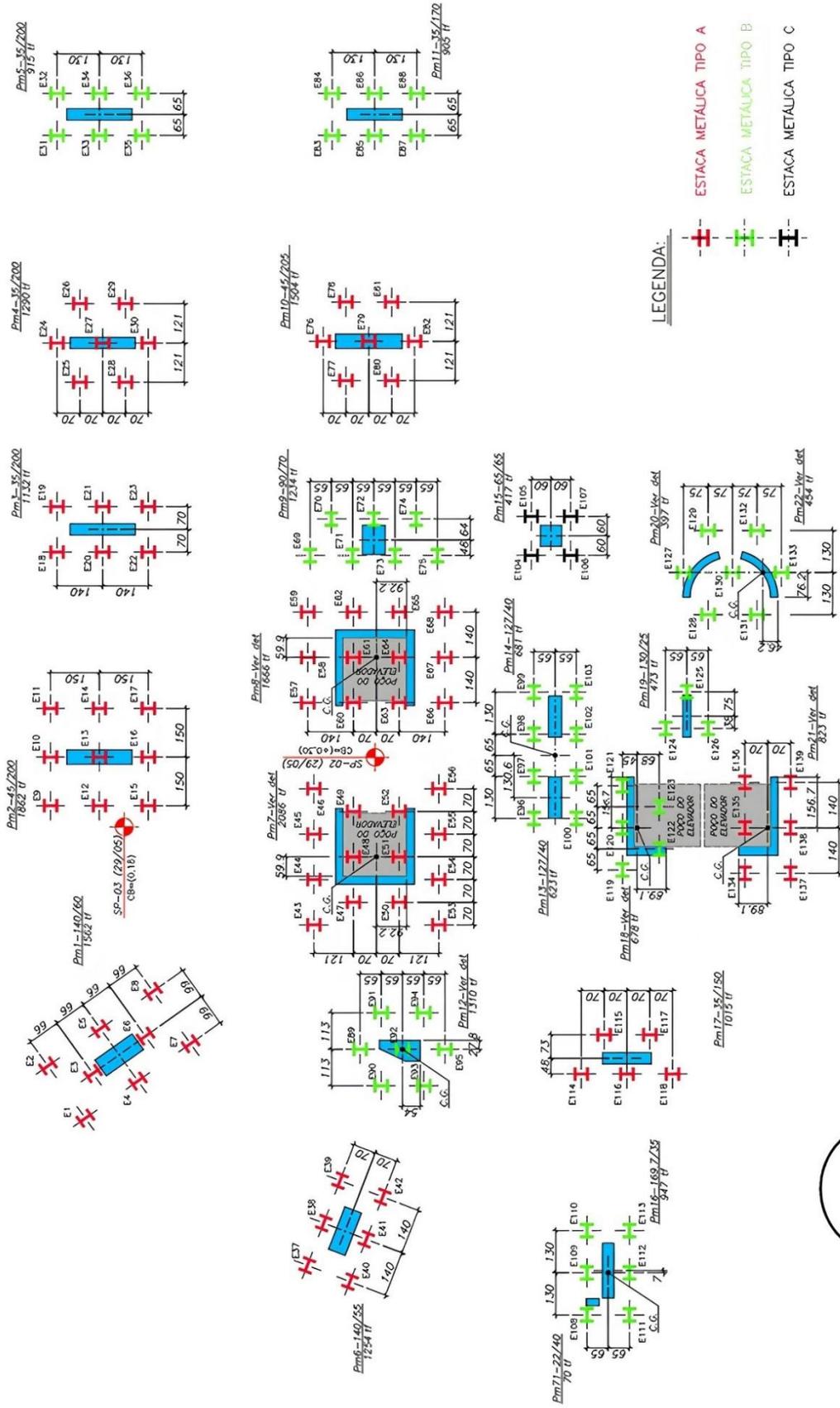
SILVA, Marccella Belvedere Moreira. **Comportamento de estacas metálicas submetidas a esforços horizontais nas condições de umidade natural e inundada do solo**. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

VARGAS, Milton et al. **Uma experiência brasileira em fundações por estacas. 1ª parte: Teoria das estacas verticais carregadas axialmente**. Geotecnia, n. 23, p. 03-33, 1978.

VELLOSO, Dirceu de Alencar. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas/Dirceu de Alencar Velloso, Francisco de Rezende Lopes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

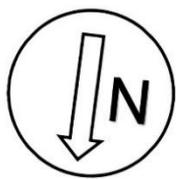
ANEXOS

ANEXO A – Planta de locação das estacas metálicas com seção variável (Obra 2)



LEGENDA:

- ESTACA METÁLICA TIPO A
- ESTACA METÁLICA TIPO B
- ESTACA METÁLICA TIPO C



ANEXO B – Planta de estaqueamento (Obra 3)

