

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

PEDRO HENRIQUE NASCIMENTO DA SILVA

**FUNDAÇÃO PROFUNDA DO TIPO ESTACA RAIZ: ESTUDO DE CASO DO
PROCESSO EXECUTIVO EM UMA OBRA DE FUNDAÇÃO LOCALIZADA NO
MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO**

Goiânia, GO

2025

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Pedro Henrique Nascimento da Silva

Matrícula: 20221011050289

Título do Trabalho: FUNDAÇÃO PROFUNDA DO TIPO ESTACA RAIZ: ESTUDO DE CASO DO PROCESSO EXECUTIVO EM UMA OBRA DE FUNDAÇÃO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

PEDRO HENRIQUE NASCIMENTO DA SILVA

**FUNDAÇÃO PROFUNDA DO TIPO ESTACA RAIZ: ESTUDO DE CASO DO
PROCESSO EXECUTIVO EM UMA OBRA DE FUNDAÇÃO LOCALIZADA NO
MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Civil, do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Giovane Batalione.

Goiânia, GO

2025

S586f Silva, Pedro Henrique Nascimento da.
Fundação profunda do tipo estaca raiz: estudo de caso do processo executivo em uma obra de fundação localizada no município de Rio Verde - GO / Pedro Henrique Nascimento da Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2025. 67 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Giovane Batalione.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Civil, Coordenação de Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Fundações profundas. 2. Estacas (Fundações). 3. Estaca raiz. 4. Construção civil - Rio Verde (GO). I. Batalione, Giovane (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 624.154

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 06/08/2025, às 9:00 h, no Instituto Federal de Goiás, Auditório Djalma Maia, Câmpus Goiânia, Estado de Goiás, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Pedro Henrique Nascimento da Silva. A banca foi composta pelos seguintes membros: Me. Giovane Batalione (orientador), Dr. João Carlos de Oliveira, Me. Marcela Leão Domiciano, sob a presidência da primeira(o). O trabalho de conclusão de curso tem como título "FUNDAÇÃO PROFUNDA DO TIPO ESTACA RAIZ: ESTUDO DE CASO DO PROCESSO EXECUTIVO EM UMA OBRA DE FUNDAÇÃO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO". Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 9,5. Eu, Prof. Antônio Henrique Capuzzo Martins, na função de coordenador do curso, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da banca.

Me. Giovane Batalione (orientador)

Dr. João Carlos de Oliveira

Me. Marcela Leão Domiciano

Documento assinado eletronicamente por:

- Joao Carlos de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/08/2025 10:28:08.
- Giovane Batalione, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/08/2025 18:18:52.
- Marcela Leao Domiciano, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/08/2025 11:47:17.
- Antonio Henrique Capuzzo Martins, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - GYN-CCBEC, em 06/08/2025 11:39:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 675664

Código de Autenticação: 212644cf37



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

Dedico este trabalho a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada, e à minha família, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante durante toda esta longa e árdua jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde e resiliência para enfrentar os desafios ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus pais, Evaristo Antônio da Silva e Vera Lúcia Nascimento Ventura, por todo amor, esforço e dedicação ao longo da minha formação, especialmente pelo apoio incondicional e por sempre valorizarem a importância da educação.

À minha irmã, Dra. Acsa Caroline da Silva, por todo apoio, incentivo para que eu continuasse estudando e pelas palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

À minha esposa, Lara Robertta M. B. da Silva, por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo amor e companheirismo ao longo desta jornada.

Ao meu professor orientador, Giovane Batalione, pela disponibilidade, orientação e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores João Carlos de Oliveira e Marcela Leão Domiciano, por gentilmente aceitarem compor a banca examinadora deste Trabalho de Conclusão de Curso.

À Eng. civil, especialista em fundações e obras geotécnicas, Daniela Silva Cintra de Oliveira, responsável pela empresa de projetos Guiotti Cintra, por disponibilizar dados essenciais que contribuíram significativamente para a elaboração deste trabalho.

A todos os familiares, amigos e professores que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

EPÍGRAFE

*“Faça o teu melhor, na condição que você
tem, enquanto você não tem condições
melhores, para fazer melhor ainda.”*
Mário Sérgio Cortella

RESUMO

FUNDAÇÃO PROFUNDA DO TIPO ESTACA RAIZ: ESTUDO DE CASO DO PROCESSO EXECUTIVO EM UMA OBRA DE FUNDAÇÃO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO

AUTOR, 2025: Pedro Henrique Nascimento da Silva

ORIENTADOR: Me. Giovane Batalione

Este Trabalho de Conclusão de Curso aborda a técnica de fundação profunda do tipo estaca raiz, enfatizando sua aplicação prática em uma obra no município de Rio Verde, Goiás. A técnica é amplamente empregada em solos com baixa capacidade de carga ou em situações com afloramento rochoso, sobretudo em áreas de difícil acesso ou com restrição de vibração, garantindo estabilidade e segurança estrutural. O objetivo principal foi analisar o processo executivo da estaca raiz, identificar suas vantagens e limitações, e compreender sua aplicabilidade no contexto específico da obra estudada. A metodologia adotada consistiu em uma abordagem teórica e prática, que incluiu revisão bibliográfica, coleta, análise e interpretação dos dados técnicos do projeto de fundação, além do acompanhamento sistemático das etapas executivas em campo. Foi projetada a execução de 77 estacas raiz com 50 cm de diâmetro e 11 metros de profundidade, utilizadas nas regiões críticas do empreendimento, locais de construção dos poços de elevadores e de maior solicitação de carga estrutural, enquanto as demais fundações foram compostas por 314 estacas do tipo hélice contínua monitorada com 8 metros de profundidade. Foram registrados todos os procedimentos executivos desde a marcação, perfuração, instalação da armadura, preparo e injeção da argamassa, até a concretagem e retirada do revestimento metálico. A análise demonstrou que, apesar da produtividade inferior, a estaca raiz apresenta desempenho técnico superior em solos com presença de rocha e condições geotécnicas adversas, sendo indispensável para assegurar a viabilidade técnica e segurança estrutural da obra. Assim, conclui-se que a escolha adequada do tipo de fundação, baseada em estudos geotécnicos detalhados, é fundamental para o sucesso das obras de fundação. Dessa forma, o trabalho contribui para o aprimoramento do conhecimento acadêmico e profissional, fornecendo referências importantes para a seleção e execução de fundações profundas em condições geotécnicas desfavoráveis, sendo uma fonte útil para estudantes, engenheiros e demais interessados no tema.

Palavras-chaves: Fundação profunda, estaca raiz, etapas executivas, estudos geotécnicos, obras de fundação.

ABSTRACT

DEEP ROOT PILE FOUNDATION: CASE STUDY OF THE EXECUTIVE PROCESS IN A FOUNDATION PROJECT LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF RIO VERDE - GO

AUTHOR, 2025: Pedro Henrique Nascimento da Silva
ADVISOR: Me. Giovane Batalione

This Final Undergraduate Thesis addresses the deep foundation technique known as root pile, emphasizing its practical application in a construction project located in Rio Verde, Goiás, Brazil. This technique is extensively employed in soils with low bearing capacity or in scenarios involving shallow rock outcrops, particularly in sites with limited access or vibration restrictions, ensuring structural stability and safety. The primary objective was to analyze the execution process of the root pile, identify its advantages and limitations, and assess its applicability within the specific context of the project studied. The methodology adopted combined theoretical and practical approaches, including a comprehensive literature review, collection, analysis, and interpretation of geotechnical and design data, alongside systematic field monitoring of the construction phases. A total of 77 root piles with 50 cm diameter and 11 meters depth were designed and installed in critical zones of the structure, such as elevator shaft foundations and areas with elevated structural loads, while the remainder of the foundation comprised 314 monitored continuous flight auger (CFA) piles of 8 meters depth. The study documented all execution stages, from site surveying and drilling to reinforcement cage installation, grout preparation and injection, concreting, and casing extraction. The analysis demonstrated that despite a lower installation rate, root piles exhibit superior technical performance in soils with rock presence and complex geotechnical conditions, proving essential for the technical feasibility and structural integrity of the project. Consequently, it is concluded that selecting the appropriate foundation system based on detailed geotechnical investigation is critical to the success of foundation engineering works. This study contributes significantly to both academic and professional fields by providing valuable insights and practical references for the design and execution of deep foundations under challenging geotechnical conditions, serving as a pertinent resource for students, engineers, and professionals involved in foundation engineering.

Keywords: Root piles, deep foundations, construction process, geotechnics, foundation works.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de fundações profundas (estaca e tubulão)	20
Figura 2: Tipos de fundações superficiais (bloco, sapata e radier)	21
Figura 3: Disposição clássica das estacas raiz em reforço de fundações antigas	22
Figura 4: Muro de contenção realizado por meio de uma malha de microestacas	22
Figura 5: Indicação geométrica das resistências que constituem a capacidade de carga.	25
Figura 6: Perspectiva arquitetônica do empreendimento	37
Figura 7: Imagem de satélite da localização da obra.....	40
Figura 8: Planta de locação das sondagens realizadas pelas empresas A, B e C.....	41
Figura 9: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SP 03 - Empresa A	42
Figura 10: Execução dos furos de sondagem da empresa A	43
Figura 11: Amostras de solos da sondagem SP-03 da empresa A	43
Figura 12: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SP-002 - Empresa B	44
Figura 13: Execução dos furos de sondagem da empresa B.....	45
Figura 14: Amostras de solos da sondagem SP-002 da empresa B.....	45
Figura 15: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SM 01 - Empresa C	46
Figura 16: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SM 02 - Empresa C	47
Figura 17: Execução dos furos de sondagem da empresa C.....	48
Figura 18: Amostras de solos das sondagens da empresa C.....	48
Figura 19: Amostras das caixas de testemunho das Sondagens da empresa C	49
Figura 20: Planta de fundação com destaque na locação das estacas raiz - Destaque para área central do setor A.....	51
Figura 21: Destaque das estacas raiz na planta de locação das fundações com detalhamento, legendas e notas técnicas	52
Figura 22: Detalhamento da armadura das estacas raiz com tabela de quantitativos e especificações técnicas	53
Figura 23: Materiais utilizados no procedimento executivo da estaca raiz.....	55
Figura 24: Marcação do eixo da estaca e posicionamento da perfuratriz.....	56
Figura 25: Avanço das hastes de perfuração e revestimento do furo	57
Figura 26: Processo de perfuração da camada de rocha.....	57
Figura 27: Introdução da armadura	58
Figura 28: Preparo da argamassa.....	58
Figura 29: Concretagem da estaca.....	59

Figura 30: Retirada do revestimento metálico e finalização da concretagem	59
Figura 31: Sistema de reação e dispositivo de aplicação de carga	62
Figura 32: Indicador de carga da célula de carga.	62
Figura 33: Deflectômetros fixados em vigas de referência metálica.....	63
Figura 34: Curva Carga x Deslocamento do topo da estaca PCE1.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente K e razão de atrito α	27
Tabela 2: Fatores de correção F1 e F2.	27
Tabela 3: Fatores de correção F1 e F2 ajustados.....	28
Tabela 4: Coeficiente α em função do tipo de estaca e do tipo de solo.....	29
Tabela 5: Coeficiente β em função do tipo de estaca e do tipo de solo.....	30
Tabela 6: - Coeficientes característicos do solo C.	30
Tabela 7: Valores de K em função das características do solo.....	31
Tabela 8: Valores de I em função do diâmetro nominal da estaca.	32
Tabela 9: Fator β_0	34
Tabela 10: Fatores β_1 e β_2	34
Tabela 11: Resumo das sondagens executadas pela empresa A.....	43
Tabela 12: Resumo das sondagens executadas pela empresa B.....	45
Tabela 13: Resumo das sondagens executadas pela empresa C.....	49
Tabela 14: Deslocamentos medidos no topo da estaca PCE1.	64
Tabela 15: Resumo do desempenho da estaca ensaiada.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Origem e desenvolvimento histórico das fundações	19
2.2 Padronização e tipologias das fundações	20
2.3 Origem, evolução histórica, aplicações e conceitos da estaca raiz.....	21
2.4 Métodos de dimensionamento	24
2.4.1 Conceito de capacidade de carga geotécnica.....	24
2.4.2 Conceito de capacidade de carga admissível.....	25
2.4.3 Método Aoki & Velloso (1975)	26
2.4.4 Método Décourt & Quaresma (1978).....	29
2.4.5 Método de Lizzi (1982)	31
2.4.6 Método Cabral (1986)	33
2.5 Vantagens e desvantagens das estacas raiz.....	35
3. METODOLOGIA	36
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS.....	37
4.1 Informações técnicas sobre a elaboração do projeto de fundação estaca raiz	37
4.2 Justificativa para a escolha da estaca raiz.....	38
4.3 Comparativo entre a fundação do tipo estaca raiz e outros tipos de fundação	39
4.4 Localização da obra	40
4.5 Relatórios de sondagens do solo.....	41
4.5.1 Dados técnicos de sondagens da empresa A	42
4.5.2 Dados técnicos de sondagens da empresa B.....	44
4.5.3 Dados técnicos de sondagens da empresa C.....	46
4.6 Plantas de fundação com detalhes técnicos e especificações das estacas.....	50
4.7 Materiais utilizados	54
4.8 Processo executivo da estaca raiz.....	56
4.9 Observações técnicas da obra	60

4.10	Resultado da prova de carga estática da estaca raiz	61
5.	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A engenharia civil tem evoluído com o passar dos anos e o crescimento progressivo da população mundial está impulsionando cada vez mais as construções civis, que estão sendo executadas em larga escala. Neste sentido, evidencia-se a necessidade de realizar estudos técnicos e normativos dos diversos elementos que compõem uma edificação, para que o projeto e a execução sejam feitos de forma correta, prevenindo patologias e sobretudo garantindo segurança e conforto aos usuários.

De acordo com essa abordagem, os elementos estruturais que compõem uma edificação são divididos em duas categorias de estruturas: superestrutura que é a parte visível presente na superfície acima do nível do solo (vigas, lajes e pilares) e infraestrutura que é parte enterrada abaixo do nível do solo (fundações). Falconi *et al.* (2019) conceitua que “as fundações ou infraestruturas têm por finalidade transmitir as cargas das superestruturas ao solo”.

Nesse contexto, as fundações são elementos de suma importância para o equilíbrio do sistema estrutural, uma vez que proporcionam estabilidade e segurança para a edificação. A NBR 6122 (ABNT, 2022) classifica as fundações basicamente em duas classes, sendo fundação profunda (estacas e tubulões) e fundação rasa, direta ou superficial (blocos, radier e sapatas), conforme a transferência de carga e a profundidade.

A escolha do tipo de fundação leva em consideração as características do solo presente no terreno em que será executada, bem como a modalidade da edificação, o tipo da estrutura projetada, os carregamentos a serem resistidos, os fatores ambientais e a viabilidade econômica para a sua construção. De modo arbitrário, a escolha inadequada do tipo de fundação a ser executada, possibilita a existência de problemas como recalques, fissuras, rupturas e até mesmo pode provocar o colapso da edificação. (Falconi *et al.*, 2019).

Dentre os diversos tipos de fundação profunda, a estaca raiz se destaca por suas vantagens, podendo ser executada com restrição de vibração e descompressão do terreno, em diferentes angulações, em diversos tipos de solos com presença de matacões, rochas e concreto, e, em locais de difícil acesso com espaço limitado devido ao equipamento ser de pequeno a médio porte. Além disso, a estaca raiz pode suportar cargas elevadas, o que garante eficiência na estabilidade e segurança da edificação, (Pereira, 2018).

1.2 Justificativa

A fundação profunda do tipo estaca raiz, é uma técnica disseminada e frequentemente utilizada em projetos geotécnicos, especialmente em casos onde o solo na superfície não possui características adequadas para suportar de maneira segura as cargas da estrutura. Ademais, a estaca raiz pode ser executada em situações que se necessita de reforçar os parâmetros de resistência dos solos, atuando na redução dos recalques diferenciais e distorcionais.

Na construção civil moderna, ainda existem lacunas no entendimento sobre a interação entre solo e estrutura em diferentes contextos geológicos, bem como a influência de fatores determinantes no processo executivo, tais como a composição do solo, a técnica de perfuração empregada e a qualidade da argamassa utilizada no desempenho desse tipo de fundação. Esses elementos podem impactar de maneira relevante a capacidade de carga das estacas e o desempenho da fundação.

Neste cenário, a técnica executiva desse tipo de fundação é realizada com a injeção de uma argamassa pressurizada no solo, com a intenção de reforçar o solo, aumentando sua rigidez, resistência mecânica e reduzindo sua deformação, pois a composição de cimento com areia na proporção adequada estabiliza o solo, previne adensamento e recalque.

O presente trabalho de conclusão de curso tem como proposta realizar o acompanhamento do processo executivo da técnica estaca raiz, visando produzir um estudo técnico abordando todas as etapas executivas de uma estaca raiz agregando também as vantagens e limitações da técnica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é produzir uma síntese técnica sobre a fundação profunda do tipo estaca raiz, a partir de revisão bibliográfica, análise de projeto e acompanhamento do processo executivo em uma obra localizada no município de Rio Verde em Goiás, visando contribuir com a formação de profissionais e estudantes da área.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar na literatura científica disponível sobre a técnica de fundação profunda denominada estaca raiz, abordando sua origem, evolução histórica, aplicações conceitos, métodos de dimensionamento, bem como suas principais vantagens e desvantagens;
- Coletar e analisar dados técnicos do projeto de fundação da estaca raiz a ser acompanhada em obra;
- Realizar o acompanhamento e registro fotográfico do processo executivo de uma fundação profunda do tipo estaca raiz, descrevendo detalhadamente todas as etapas construtivas.
- Analisar e interpretar os dados obtidos no estudo de caso com o intuito de avaliar a aplicabilidade da estaca raiz na obra acompanhada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Origem e desenvolvimento histórico das fundações

Desde o início da humanidade, o ser humano sempre buscou se abrigar das intempéries provenientes da natureza, tais como sol, chuva e ventos. Com o passar dos anos, tecnologias construtivas foram desenvolvidas e posteriormente com a prática de construir abrigos cada vez maiores, o uso de técnicas de fundações surgiu com a necessidade de garantir segurança e estabilidade das edificações. Neste contexto, grandes edificações antigas, como, por exemplo, as pirâmides do Egito e o Coliseu de Roma, são notáveis até os dias de hoje, gerando o interesse em identificar as técnicas das fundações aplicadas e os tipos de materiais utilizados, a fim de obter embasamento teórico para aprimorar as técnicas de fundações atuais (Furlanetto, 2020; Nogueira *et al.*, 2023).

No Egito, durante o Império Antigo, por volta de 2686 a 2181 a.C., os egípcios construíram as pirâmides com técnicas construtivas de assentamento de blocos em camadas, abriam buracos de estacas e escavavam o solo, nivelando a base para executar a fundação, identificavam as características do solo e preparava uma base reforçada para suportar o peso das pirâmides, cada bloco de rocha poderia pesar 2,5 toneladas. Os materiais utilizados eram basicamente compostos de calcário, granito, basalto, argamassa e argila cozida, as ferramentas utilizadas para corte das rochas eram feitas de cobre e pedra lascada e o transporte dos blocos ocorria através de rampas provisórias e trenós feitos de madeira (Furlanetto, 2020).

Na Roma Antiga, durante o governo do imperador Vespasiano, por volta de 70 a 80 d.C, os romanos começaram a construção do Coliseu, também conhecido como Anfiteatro Flaviano, suas fundações representaram um marco notável da engenharia antiga, com soluções construtivas que ainda hoje despertam interesse na área geotécnica. A estrutura foi construída em uma região onde existia um lago artificial que foi aterrado, para a fundação foram utilizadas grandes bases de concreto romano combinado com cal hidratada, cinzas vulcânicas e pedras assentadas sobre o aterro, constituindo uma plataforma sólida que proporcionou alta durabilidade e resistência para o Coliseu (Nogueira *et al.*, 2023).

A construção civil passou por uma transformação durante a Revolução Industrial entre os séculos XVIII e XIX, com as descobertas do ferro e do cimento, além de novas técnicas construtivas e de equipamentos que proporcionaram construções em larga escala de maneira rápida e padronizada, novas construções de edificações mais altas e complexas foram realizadas. Com base nesse avanço tecnológico, novos tipos de fundações foram desenvolvidos, adaptando-se às condições geológicas e urbanas (Chediak, 2013).

2.2 Padronização e tipologias das fundações

Ao decorrer dos anos, com a crescente evolução das técnicas construtivas sendo executadas cada vez mais em larga escala e em diversos lugares do mundo, a busca por padronização de procedimentos executivos que garantissem segurança e qualidade propiciou a implementação de normas técnicas no setor da construção civil. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normatização responsável pela regulamentação de materiais, processos construtivos e desempenho das obras. Nesta esfera, no âmbito da engenharia de fundações, a norma de referência para a elaboração de projeto e execução de fundações é a ABNT NBR 6122:2022, cuja qual define critérios específicos com base na resistência dos materiais e a capacidade de carga do solo, além de definir os fatores de segurança e estados limites de serviço e último.

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2022) as fundações são classificadas em duas categorias em função da profundidade e transferência de cargas ao solo, são elas: fundação profunda e fundação rasa. Fundação profunda é o elemento de fundação cuja base é apoiada em profundidades superiores a oito vezes a sua menor dimensão em planta, com no mínimo 3,0 metros de profundidade, transfere a carga da estrutura para o solo por meio da base (resistência de ponta), pela superfície lateral (resistência de fuste) ou por ambos.

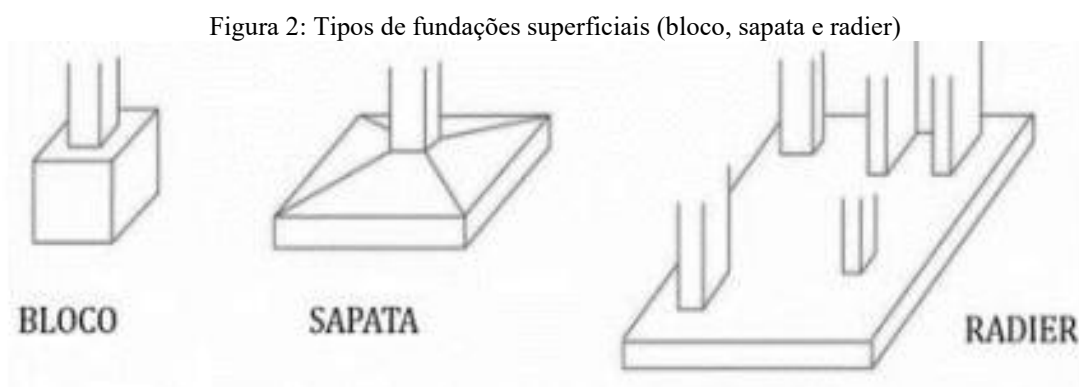
Na categoria de fundação profunda incluem-se estacas e tubulões. Dentro dessa categoria as estacas podem ser compostas por diferentes tipos de materiais e construídas por diversos tipos de processos executivos, tais como: estacas cravadas (madeira, metálica, concreto pré-moldado), estacas escavadas, estacas do tipo Strauss, Franki e mista (dois ou mais materiais), estaca raiz, microestaca (estaca injetada), hélice contínua, estaca de reação (mega ou prensada). Além disso, os tubulões definidos pela norma podem ser a céu aberto ou a ar comprimido (ABNT, 2022). A Figura 1 ilustra os formatos dos tipos de fundações profundas: estaca e tubulão.

Figura 1: Tipos de fundações profundas (estaca e tubulão)



Fonte: Adaptado de Reis e Andrade, 2023.

Fundação rasa, também denominada de direta ou superficial, é o elemento de fundação cuja base é assentada em profundidades menores que duas vezes a sua menor dimensão em planta, a transferência de cargas ocorre principalmente na base, com as tensões distribuídas em equilíbrio com a carga aplicada. Na categoria de fundação rasa incluem-se blocos, sapatas e radier. As sapatas podem ser do tipo isolada, corrida, associada e alavancada (ABNT, 2022). A Figura 2 ilustra o formato dos tipos de fundações superficiais: bloco, sapata e radier.



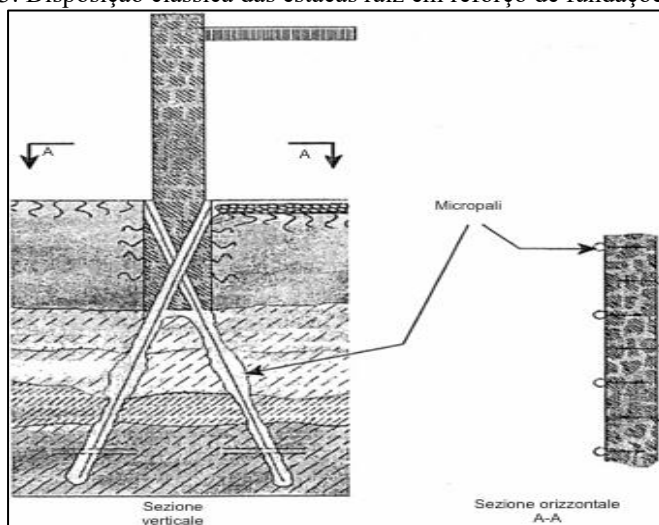
Fonte: Adaptado de Reis e Andrade, 2023.

2.3 Origem, evolução histórica, aplicações e conceitos da estaca raiz

A estaca raiz teve sua origem na cidade de Nápoles na Itália, em meados anos 50, desenvolvida pelo engenheiro italiano Fernando Lizzi (1914-2003), que registrou e patenteou como “Palo Radice” (estaca raiz) e “Reticolo di Pali Radice” (malha de estacas raiz), ficando conhecido como “il padre dei micropali” (o pai das microestacas). A técnica surgiu no período pós-guerra, naquela época Lizzi era diretor técnico da empresa Fondedile e a primeira aplicação da estaca raiz foi realizada em meio a necessidade de restauração de monumentos e estruturas de edifícios danificadas na "Scuola Angiulli" (escola Angiulli) devido aos bombardeios ocorridos durante a Segunda Guerra Mundial, posteriormente a técnica foi amplamente utilizada para muros de contenção e consolidação de solos “in situ” em faces de deslizamentos (Acciaio, 2020).

A Figura 3 ilustra o primeiro tipo de aplicação da estaca raiz, como reforço estrutural, sendo considerada como aplicação clássica na época denominada de “micropali” (microestaca).

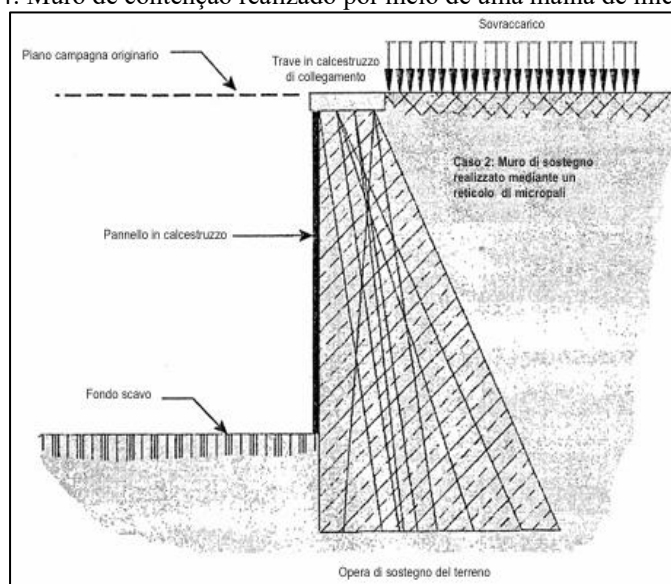
Figura 3: Disposição clássica das estacas raiz em reforço de fundações antigas



Fonte: Tanzini, 2011.

A Figura 4 ilustra o segundo tipo de aplicação da estaca raiz utilizada em formato de malha em muro de contenção.

Figura 4: Muro de contenção realizado por meio de uma malha de microestacas



Fonte: Tanzini, 2011.

A utilização da estaca raiz cresceu significativamente na Itália desde a sua invenção, mesmo com o custo elevado do aço na Europa no período pós-guerra e à escassez de mão de obra qualificada. Além disso, um sistema eficiente era necessário para suportar as cargas das estruturas, de modo que o terreno fosse minimamente perturbado por vibrações e o equipamento tivesse tamanho reduzido para acessar espaços limitados com difícil acesso, essas condições impulsionaram o desenvolvimento das microestacas com armadura montada no local, projetada e instalada por empresas especializadas (Tanzini, 2011).

A técnica de Lizzi foi disseminada na Alemanha e na Grécia, em 1952, na América do Norte a partir de 1973. Ressalta-se que entre as décadas de 1970 e 1980 os EUA começaram os estudos aprofundados da técnica, publicando diversos regulamentos, desenvolvendo documentações empíricas com base no comportamento das microestacas, proporcionando dados e recomendações essenciais para os normativos atuais (Acciaio, 2020).

Inicialmente, a estaca raiz era denominada microestaca, por se tratar de um tipo de fundação de pequeno diâmetro, entre 100 a 300 mm, executada com injeção de argamassa no solo sob baixa pressão, em torno de 6 bar. Sua aplicação em diferentes inclinações conferia ao conjunto uma aparência semelhante às raízes de uma árvore, razão pela qual passou a ser popularmente conhecida como estaca raiz. (Tanzini, 2011).

As primeiras estacas raiz foram construídas com uma estrutura metálica composta de vergalhões de aço dispostos em gaiola, ao invés de tubos metálicos convencionais, constituindo uma evolução tecnológica, atribuindo aplicações em larga escala na construção de novas fundações, substituindo as tradicionais estacas de grande diâmetro (Acciaio, 2020).

A técnica de Lizzi ficou conhecida internacionalmente a partir do X Congresso de Geotecnia, realizado em Bari na Itália em 1970, nessa época começaram a expirar as patentes, este fato possibilitou a disseminação mundial da técnica através de diversas empresas, promovendo sua evolução tecnológica, expandindo suas aplicações com diâmetros cada vez maiores (Moura, 2012).

No Brasil, essa tecnologia foi introduzida ainda na década de 1970 e rapidamente incorporada ao repertório técnico das empresas de engenharia, sendo utilizada tanto em obras novas quanto em intervenções estruturais em áreas de difícil acesso ou com restrições operacionais. A partir desse período, o método passou a ser reconhecido não apenas como reforço, mas como técnica de fundação definitiva, integrada aos projetos de engenharia civil em todo o país (Monteiro, 2016).

2.4 Métodos de dimensionamento

Neste trabalho, foram abordados alguns dos principais métodos de dimensionamento de estacas raiz, os quais foram escolhidos por sua ampla utilização na engenharia geotécnica e sua compatibilidade com o escopo deste estudo, sendo os métodos de Aoki & Velloso (1975), Décourt & Quaresma (1978), Lizzi (1982) e Cabral (1996), sendo selecionados com base em sua relevância e aplicabilidade.

2.4.1 Conceito de capacidade de carga geotécnica

De modo geral, para a aplicação dos métodos de dimensionamento das estacas raiz, é fundamental compreender o conceito de capacidade de carga de um elemento de fundação. É importante distinguir a capacidade de carga da resistência estrutural. Enquanto a resistência estrutural é determinada com base nas propriedades geométricas e nos materiais da fundação, a capacidade de carga refere-se ao valor da carga que provoca a ruptura ou instabilidade do solo ou da fundação como um todo (Alonso, 2012).

Considerando em termos quantitativos, pode-se afirmar que a capacidade de carga R é composta pelo somatório das cargas máximas de suporte pelo atrito lateral R_L e pela ponta R_P , em unidade de força, como por exemplo, quilonewton (kN). Desse modo, calcula-se a capacidade de carga de uma fundação profunda da estaca raiz, conforme a Equação 1 (Cintra; Aoki, 2010).

$$R = R_L + R_P \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

R = capacidade de carga de ruptura

R_L = capacidade de carga por atrito lateral

R_P = capacidade de carga de ponta

Calcula-se a capacidade de carga por atrito lateral (R_L) através da multiplicação do perímetro do fuste (U), pelo somatório da multiplicação das forças resistentes unitárias por atrito lateral (r_L) com a camada de solo de espessura (Δ_L), de acordo com a Equação 2 (Cintra; Aoki, 2010).

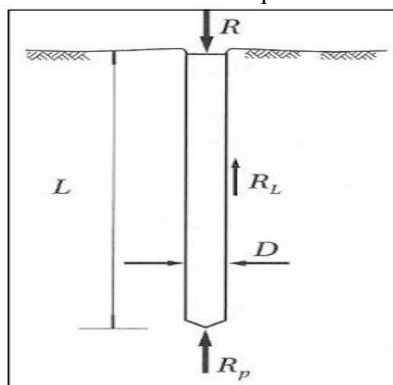
$$R_L = U \cdot \Sigma(r_L \cdot \Delta_L) \quad \text{Eq.(2)}$$

Para cálculo da capacidade da carga de ponta (R_P), multiplica-se a resistência unitária de ponta (r_p) pela área da seção da ponta (A_P), representado pela Equação 3 (Cintra; Aoki, 2010).

$$R_P = r_p \cdot A_P \quad \text{Eq.(3)}$$

A Figura 5 ilustra as parcelas constituintes da capacidade de carga em uma fundação do tipo estaca com determinado diâmetro (D) e certa profundidade (L).

Figura 5: Indicação geométrica das resistências que constituem a capacidade de carga.



Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Os dados necessários para cálculo da capacidade de carga, são obtidos através de métodos semiempíricos, estáticos, dinâmicos ou em provas de carga. Os métodos de Aoki & Velloso (1975) e Décourt & Quaresma (1978), são métodos semiempíricos, nos quais utilizam coeficientes empíricos, a fim de ajustar as equações para os diferentes tipos de solo nas quais as estacas são executadas (Araujo; Wolle, 2006).

2.4.2 Conceito de capacidade de carga admissível

O conceito de capacidade de carga admissível na engenharia geotécnica é definido como a carga máxima que uma fundação pode suportar sem sofrer falhas ou deformações excessivas, a fim de preservar a estética e o conforto do usuário. É obtido a partir da aplicação de um coeficiente de segurança na carga de ruptura, demonstrado na Equação 4 (Hachich *et al.*, 1998).

$$Carga\ Admissível = \frac{Carga\ de\ Ruptura}{Fator\ de\ Segurança} \quad \text{Eq.(4)}$$

2.4.3 Método Aoki & Velloso (1975)

No Brasil, um dos métodos mais utilizados para estimar a capacidade de carga de estacas é o de Aoki & Velloso (1975), desenvolvidos pelos engenheiros e professores Nelson Aoki e Dirceu de Alencar Velloso, baseado em dados empíricos obtidos em ensaios de prova de carga, considerando a resistência de atrito lateral e a resistência de ponta, em variados tipos de solo. A princípio, o método teve origem, a partir de um estudo dos resultados de ensaio de penetração de cone (CPT) comparado com resultados de prova de carga em estacas. Logo depois, começou-se a aplicar esse método a partir dos resultados de ensaio SPT (Standard Penetration Test) (Cintra; Aoki, 2010).

Em síntese, o cálculo da capacidade de carga de uma estaca raiz, é obtido conforme o equilíbrio das forças apresentado anteriormente na Equação 1, complementado com as resultantes das Equações 2 e 3, sendo representado pela Equação 5. (Cintra; Aoki, 2010).

$$R = U.\Sigma(r_L . \Delta_L) + r_p . A_P \quad \text{Eq.(5)}$$

Aoki & Velloso (1975) insere os coeficientes (k) e (α) em função do tipo de solo, juntamente com os fatores (F1) e (F2) de correção do desempenho entre a estaca (protótipo) e o cone do CPT (modelo) e os valores de (N_P) e (N_L), sendo respectivamente o índice de resistência à penetração (valor do SPT) na cota de apoio da ponta da estaca e o índice de resistência à penetração médio na camada de solo de espessura (Δ_L). Desta forma, as forças resistentes unitárias de ponta (r_p) e por atrito lateral (r_L) são obtidas nas Equações 6 e 7:

$$r_p = \frac{k . NP}{F1} \quad \text{Eq.(6)}$$

$$r_L = \frac{k . NL}{F2} \quad \text{Eq.(7)}$$

Desta forma, obtêm-se:

$$R = A_P \frac{k . NP}{F1} + U.\Sigma\left(\frac{k . NL}{F2}\right) \Delta_L \quad \text{Eq.(8)}$$

Os dados para resolução da Equação 8, são obtidos através das Tabelas 1 e 2:

Tabela 1: Coeficiente K e razão de atrito α .

Solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1	1,4
Areia siltosa	0,80	2
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilossiltosa	0,50	2,8
Areia argilosa	0,60	3
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte	0,40	3
Silte argiloarenoso	0,25	3
Silte argiloso	0,23	3,4
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,30	2,8
Argila siltoarenosa	0,33	3
Argila siltosa	0,22	4

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Tabela 2: Fatores de correção F1 e F2.

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	5,0
Metálica	1,75	3,5
Pré-moldada	1,75	3,5

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Cintra e Aoki (2010) constataram que para as estacas pré-moldadas de pequeno diâmetro, o método é muito conservador, deste modo, realizaram ajustes nos fatores de correção ($F1$) e ($F2$), em relação ao diâmetro da estaca (D), representado na Equação 9.

$$F1 = 1 + \frac{D}{0,8} \quad \text{Eq.(9)}$$

Os fatores de correção ($F1$) e ($F2$) também foram ajustados em função do tipo de estaca, conforme a Tabela 3 (Cintra; Aoki, 2010).

Tabela 3: Fatores de correção F1 e F2 ajustados.

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	$1 + D/0,80$	2F1
Escavada	3,0	2F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	2F1

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

O método de Aoki-Velloso (1975) adota o fator de segurança 2,0. Para este método, a carga admissível pode ser representada pela Equação 10.

$$Carga\ Admissível = \frac{Carga\ de\ Ruptura}{2,0} \quad Eq.(10)$$

2.4.4 Método Décourt & Quaresma (1978)

O método de Décourt-Quaresma (1978), desenvolvido pelos engenheiros Luciano Décourt e Arthur Quaresma, também caracterizado como método semiempírico, teve origem através da análise dos ensaios de penetração dinâmica SPT (Standard Penetration Test), correlacionados com os fatores circunstanciais como o tipo de solo, profundidade e nível d'água.

Neste método, o cálculo da capacidade de carga de uma estaca, é obtido conforme a Equação 11.

$$R = U \cdot r_L \cdot L + r_p \cdot A_P \quad \text{Eq.(11)}$$

Onde:

U = perímetro do fuste estaca

r_L = força resistente unitária por atrito lateral

r_p = força resistente unitária de ponta

L = segmento da estaca que está sendo calculado

A_P = área da seção da ponta

Décourt e Quaresma (1978) inserem coeficientes de majoração α e de minoração β , afim de obter a reação da ponta e do atrito lateral unitário, além disso, também é acrescentado o coeficiente característico do solo C . Os valores dos coeficientes α , β e C , podem são obtidos através das Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4: Coeficiente α em função do tipo de estaca e do tipo de solo.

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Cravada	Escavada (em geral)	Escavada (com bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas (alta pressão)
Argilas	1,0	0,85	0,85	0,30	0,85	1,0
Solos residuais	1,0	0,60	0,60	0,30	0,60	1,0
Areias	1,0	0,50	0,50	0,30	0,50	1,0

Fonte: Décourt *et al* (1996).

Tabela 5: Coeficiente β em função do tipo de estaca e do tipo de solo.

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Cravada	Escavada (em geral)	Escavada (com bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas (alta pressão)
Argilas	1,0	0,85	0,90	1,0	1,5	3,0
Solos residuais	1,0	0,65	0,75	1,0	1,5	3,0
Areias	1,0	0,50	0,60	1,0	1,5	3,0

Fonte: Décourt *et al* (1996).

Tabela 6: - Coeficientes característicos do solo C.

Tipo de solo	C (KPa)
Argila	120
Silte argiloso (solos residuais)	200
Silte arenoso (solos residuais)	250
Areia	400

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Os calculos para obtenção dos valores das as forças resistentes unitárias de ponta (r_p) e por atrito lateral (r_L) são obtidas nas Equações 12 e 13:

$$r_p = \alpha \cdot C \cdot \underline{N}_P \quad \text{Eq.(12)}$$

$$r_L = 10 \cdot \beta \left(\frac{\underline{N}_L}{3} + 1 \right) \quad \text{Eq.(13)}$$

Desta forma, obtêm-se:

$$R = \alpha \cdot C \cdot \underline{N}_P + U \cdot 10 \cdot \beta \left(\frac{\underline{N}_L}{3} + 1 \right) \cdot L \quad \text{Eq.(14)}$$

Neste método, o valor de ($\underline{N}_P$) é obtido com a média de valores do índice de resistência à penetração correspondente ao nível da ponta, o imediatamente posterior e o imediatamente anterior. O valor de ($\underline{N}_L$) encontrado com a média de valores do índice de resistência à penetração SPT ao longo do fuste (Cintra; Aoki, 2010).

O método de método de Décourt-Quaresma (1978) adota o fator de segurança diferente para a carga de ruptura na ponta e a carga de ruptura por atrito lateral, sendo 4,0 e 1,3 os respectivos fatores de segurança adotados. A carga admissível nesse método é demonstrada na Equação 15.

$$Carga\ Admissível = \frac{Carga\ de\ ruptura\ na\ ponta}{4,0} + \frac{Carga\ de\ ruptura\ por\ atrito\ lateral}{1,3} \quad \text{Eq.(15)}$$

2.4.5 Método de Lizzi (1982)

O método de Lizzi (1982), desenvolvido pelo criador da estaca raiz, o engenheiro italiano Fernando Lizzi, este método propõe a estimativa da capacidade de carga última da estaca raiz baseado na resistência por atrito lateral (fuste), sem considerar a resistência de ponta, devido ao pequeno diâmetro da estaca.

Neste método, o cálculo da capacidade de carga de uma estaca raiz, é obtido conforme a Equação 16.

$$Q_f = \pi \cdot d \cdot L \cdot K \cdot I \quad \text{Eq.(16)}$$

Onde:

d = diâmetro nominal da estaca (diâmetro de perfuração)

L = comprimento da estaca

K = coeficiente de interação média entre a estaca e o solo

I = coeficiente adimensional de forma (depende do diâmetro nominal da estaca)

A Equação 16 representa a resistência por atrito lateral Q_f da estaca, considerando o atrito mobilizado ao longo do fuste. O produto $K \cdot I$ fornece uma estimativa da tensão média de atrito no contato da estaca no solo, enquanto o termo $\pi \cdot d \cdot L$ representa a área lateral da estaca, sobre a qual esse atrito é mobilizado.

O coeficiente K , utilizado para estimar a resistência por atrito lateral entre o solo e o fuste da estaca, varia em função das características geotécnicas do solo. A Tabela 7 apresenta os valores indicativos desse parâmetro.

Tabela 7: Valores de K em função das características do solo.

Características do solo	K (kPa)
Mole	50
Solto	100
Medianamente compacto	150
Muito compacto (pedregulho e areia)	200

Fonte: Adaptado de Monteiro, 2016 *apud* Lizzi, 1982.

A Tabela 8 apresenta os valores do coeficiente I em função do diâmetro nominal da estaca, conforme os dados fornecidos por Lizzi em 1982.

Tabela 8: Valores de I em função do diâmetro nominal da estaca.

Diâmetro nominal da estaca (mm)	I
100	1,00
150	0,90
200	0,85
250	0,80

Fonte: Monteiro, 2016 *apud* Lizzi, 1982

Observa-se que à medida que o diâmetro da estaca aumenta, o valor do coeficiente I diminui, indicando uma relação inversa entre o diâmetro nominal e o coeficiente utilizado nos cálculos estruturais.

2.4.6 Método Cabral (1986)

O método de Cabral (1986), desenvolvido pelo engenheiro David Antunes Cabral, baseia-se na interpretação de dados empíricos obtidos em provas de carga, limitando a capacidade de carga da estaca raiz com um diâmetro final B de até 45 centímetros e injetada com uma pressão $p \leq 400$ kPa (4 kgf/cm²).

O método estima a capacidade de carga última Q_{ult} das estacas, através da Equação 17, dada por:

$$Q_{ult} = (\beta_0 \beta_2 N_b) \cdot A_b + U \sum (\beta_0 \beta_1 N) \cdot \Delta L \quad \text{Eq.(17)}$$

Para cálculo do fator β_0 que leva em consideração o diâmetro da estaca B e a pressão de injeção p , utiliza-se a Equação 18:

$$\beta_0 = 1 + 0,11 \cdot p - 0,01 \cdot B \quad \text{Eq.(18)}$$

Onde:

Q_{ult} = capacidade de carga última

β_0 = fator que depende do diâmetro da estaca B e da pressão de injeção p

β_1 e β_2 = fatores que dependem do tipo de solo

N_b = N_{SPT} no nível da ponta

A_b = área da base da estaca

ΔL = espessura de solo caracterizado por um dado N_{SPT}

A Tabela 9 apresenta os valores de β_0 em função do diâmetro da estaca B e da pressão de injeção p .

Tabela 9: Fator β_0

B (cm)	p (kPa)			
	0	1	2	3
10	90	101	112	123
12	88	99	110	121
15	85	96	107	118
16	84	95	106	117
20	80	91	102	113
25	75	86	097	108
31	69	80	091	102
42	58	69	080	091

Fonte: Monteiro, 2016 *apud* Cabral, 1986.

A Tabela 10 fornece os valores dos fatores β_1 e β_2 de acordo com o tipo de solo encontrado ao longo do fuste e na ponta da estaca.

Tabela 10: Fatores β_1 e β_2

Solo	β_1 (%)	β_2
Areia	7	3
Areia siltosa	8	2,8
Areia argilosa	8	2,3
Silte	5	1,8
Silte arenoso	6	2
Silte argiloso	3,5	1
Argila	5	1
Argila arenosa	5	1,5
Argila siltosa	4	1
Nota: $\beta_1 N$ e $\beta_2 N_b$ em kgf/cm ² , $\beta_0 \beta_1 N \leq 2$ kgf/cm ² ; $\beta_0 \beta_2 N_b \leq 50$ kgf/cm ²		

Fonte: Monteiro, 2016 *apud* Cabral, 1986.

Essas Tabelas 9 e 10 permitem uma estimativa mais precisa e ajustada da capacidade de carga proposta por Cabral às condições reais de campo, conforme os parâmetros geotécnicos disponíveis.

2.5 Vantagens e desvantagens das estacas raiz

De acordo com Pereira (2018), a estaca raiz apresenta uma série de vantagens técnicas relevantes que a tornam uma solução eficiente em diversas situações geotécnicas:

- Alta capacidade de carga atingindo até 140 tonelada-força (tf);
- Recalques reduzidos, devido à injeção de argamassa sob pressão e à armadura contínua ao longo do fuste;
- Execução em espaços restritos e de difícil acesso, viabilizada pelo uso de perfuratrizes compactas;
- Ausência de vibração e descompressão do terreno, o que permite sua utilização em áreas próximas a construções sensíveis e em contextos urbanos densos com perturbações mínimas do ambiente circunstante;
- Possibilidade de execução em qualquer tipo de terreno e em diferentes inclinações, o que amplia sua aplicabilidade em contenções de encostas e fundações inclinadas.
- Baixa poluição sonora, devido à execução com equipamentos de pequeno ou médio porte;
- Capacidade de perfurar solos rígidos, incluindo matacões, rochas e até blocos de concreto;
- Capacidade de combater os esforços de flexão.

Contudo, Pereira (2018) também destaca algumas limitações importantes, que dependendo do contexto da obra, podem inviabilizar o uso da estaca raiz, devendo, portanto, serem analisadas:

- Custo elevado por metro executado, devido ao uso intensivo de materiais e à tecnologia envolvida;
- Alto consumo de cimento, água e ferragens para as armaduras, o que também representa impacto ambiental significativo
- Obra alagada ou encharcada, dada a necessidade de circulação de água ou lama durante a escavação;
- Produtividade limitada, já que o processo envolve diversas etapas complexas e cada estaca demanda execução demorada.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso, adotou-se uma abordagem em duas frentes: teórica e prática. Inicialmente, realizou-se um estudo abrangente sobre o tema geral das fundações, abordando sua origem, evolução histórica, importância na engenharia civil, conceitos fundamentais, tipos de fundações e os critérios técnicos empregados para a escolha da solução mais adequada, com o objetivo de garantir o desempenho e a durabilidade das estruturas.

Em seguida, o trabalho foi direcionado especificamente para o estudo da fundação profunda do tipo estaca raiz. Foram coletadas informações técnicas relevantes e realizado o acompanhamento prático da execução desse tipo de fundação em uma obra real. A partir dessa vivência, elaborou-se uma síntese técnica.

A metodologia da parte prática foi estruturada em duas etapas:

- Coleta de dados referentes ao projeto de fundação: foram analisados os documentos técnicos como relatórios de sondagem, plantas de fundação, desenhos e detalhes técnicos.
- Acompanhamento do processo executivo: observou-se e registrou-se, de forma sistemática, todas as etapas de execução da fundação do tipo estaca raiz em uma obra localizada no município de Rio Verde em Goiás, considerando o método construtivo, os materiais e os equipamentos utilizados e as práticas de controle de qualidade adotadas.
- Análise e tratamento dos dados do estudo de caso: os dados obtidos foram organizados e interpretados com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da técnica de estaca raiz no contexto da obra analisada, considerados aspectos técnicos, práticos e operacionais.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

4.1 Informações técnicas sobre a elaboração do projeto de fundação estaca raiz

Dentre os documentos disponibilizados e incorporados neste estudo, destacam-se os dados técnicos de sondagens do solo realizados por três empresa denominadas neste trabalho como A, B e C, e as plantas de fundação com os detalhes técnicos e especificações das estacas.

Essas informações serviram como base para a compreensão do contexto técnico do projeto de fundação. O projeto em questão trata-se de uma fundação mista, composta por dois tipos de estacas: estaca raiz e hélice contínua monitorada, aplicadas conforme as características geotécnicas locais e os requisitos estruturais da edificação.

O empreendimento consiste em um edifício de múltiplos pavimentos com um shopping center no térreo, sendo, portanto, de uso residencial e comercial, configurando um sistema estrutural com demandas técnicas específicas e uma alta solicitação de cargas para as fundações. A Figura 6 representa a perspectiva arquitetônica do empreendimento a ser construído.

Figura 6: Perspectiva arquitetônica do empreendimento



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Para a definição do sistema de fundações, foi realizada uma sequência de investigações geotécnicas por três diferentes empresas de sondagens. A presença de rocha indicou a necessidade de adoção de estacas tipo raiz nas regiões com ocorrência de rocha mais superficial, devido à sua capacidade de perfuração em materiais de alta resistência e adaptação a condições geotécnicas complexas. Já as estacas tipo hélice contínua monitorada foram utilizadas nas áreas onde o solo permitia a cravação, garantindo maior produtividade e redução de custos nessas regiões específicas do terreno.

4.2 Justificativa para a escolha da estaca raiz

As estacas tipo raiz foram adotadas como solução de fundação na região central do edifício, onde se localiza o bloco dos poços dos elevadores, área que apresenta o maior rebaixamento do terreno. Nessa zona, a fundação atravessa os subsolos, atinge os poços dos elevadores e se estende ainda mais profundamente, acompanhando as variações topográficas e estruturais do terreno.

A escolha pela estaca raiz foi motivada pelas condições geotécnicas específicas dessa área, especialmente pela presença de rocha aflorada em profundidades reduzidas, identificada nas sondagens. Essa característica inviabiliza a utilização de métodos convencionais de fundação profunda, como estacas tipo hélice contínua monitorada, que nessas condições atingiriam comprimentos insuficientes, sem garantir apoio adequado na rocha.

Embora as estacas raiz também sejam comumente aplicadas em casos de reforço estrutural ou em locais com acesso restrito, neste projeto o fator decisivo para sua adoção foi a geologia do terreno, marcada pela ocorrência de rochas resistentes em cotas elevadas. As estacas raiz, por sua capacidade de perfuração em solos duros e de embutimento direto na rocha, apresentaram-se como a solução mais adequada para assegurar a estabilidade e o desempenho da fundação nesta região crítica da edificação.

4.3 Comparativo entre a fundação do tipo estaca raiz e outros tipos de fundação

Durante a fase de projeto, outras alternativas de fundação foram avaliadas, mas apresentaram limitações significativas frente às condições locais:

- Tubulão: descartado devido à presença de lençol freático elevado, localizado a cerca de 2 metros de profundidade. A execução de tubulões em ambiente alagado, somada à presença de rocha, tornaria impraticável o rebaixamento do nível d'água e elevaria significativamente o risco operacional e o custo da obra.
- Estaca Hélice Contínua Monitorada: ineficiente em trechos de solo com NSPT elevado (solo muito duro). Nesse tipo de material, a hélice encontra grande resistência e não consegue penetrar adequadamente, comprometendo o comprimento necessário da estaca.
- Estação: alternativa igualmente limitada, pois não possui capacidade de corte ou penetração em camadas com pedregulhos ou matacões. Quando encontra essas formações, o equipamento atinge um limitante e não avança, tornando sua aplicação inviável.
- Estacas pré-moldadas ou metálicas (sistema de bate-estaca): inadequadas para os solos duros da região, pois não penetram adequadamente e estão sujeitas à ruptura ou dano por impacto durante a cravação.

4.4 Localização da obra

A obra fica localizada no município de Rio Verde em Goiás. O terreno possui formato triangular, com algumas edificações ao redor, com vegetação predominante e presença de lençol freático próximo a superfície. Na Figura 7 é apresentada uma imagem de satélite, obtida através do Google Maps, que mostra a área delimitada do terreno onde está sendo realizada a obra.

Figura 7: Imagem de satélite da localização da obra.



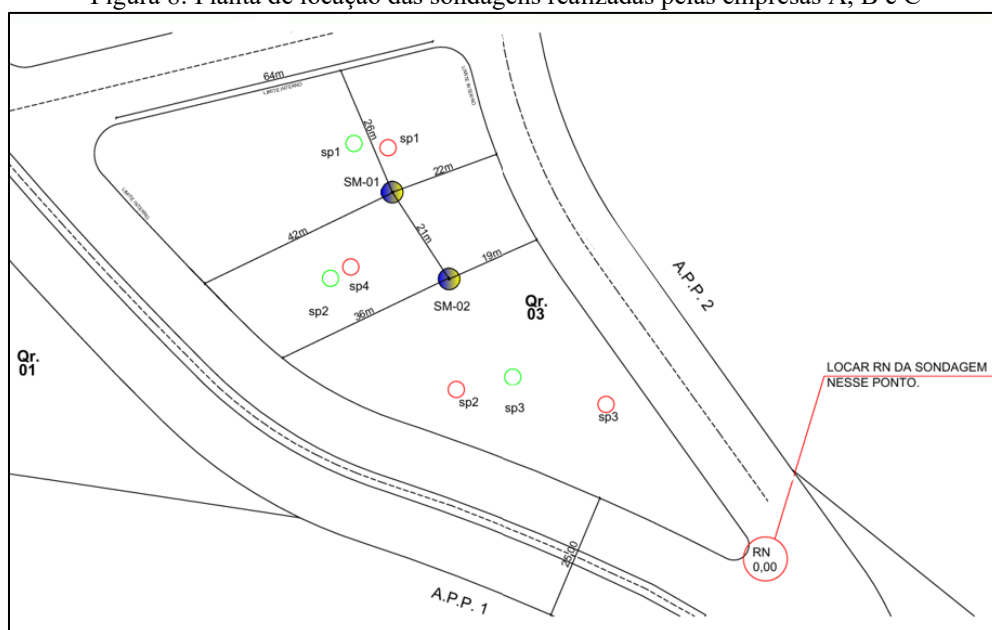
Fonte: Google Maps, Acesso em 04/jul/2025.

4.5 Relatórios de sondagens do solo

A Figura 8 apresenta o mapa de localização dos furos de sondagem no terreno. As sondagens foram realizadas por três empresas distintas, denominadas neste estudo como empresa A, empresa B e empresa C.

Os pontos de sondagem são representados na planta de locação por círculos com diferentes cores e identificações. As sondagens aparecem distribuídas por todo o terreno, indicando os locais específicos onde os ensaios geotécnicos foram realizados. Há também a indicação de um ponto de referência marcado como RN 0,00. É importante destacar que todas as sondagens foram realizadas com base nesse ponto de referência altimétrica estabelecido no terreno. Este ponto, foi utilizado como base para a determinação das cotas altimétricas das sondagens e demais medições em campo, garantindo o controle e a padronização dos níveis de profundidade ao longo de todo o levantamento geotécnico.

Figura 8: Planta de locação das sondagens realizadas pelas empresas A, B e C



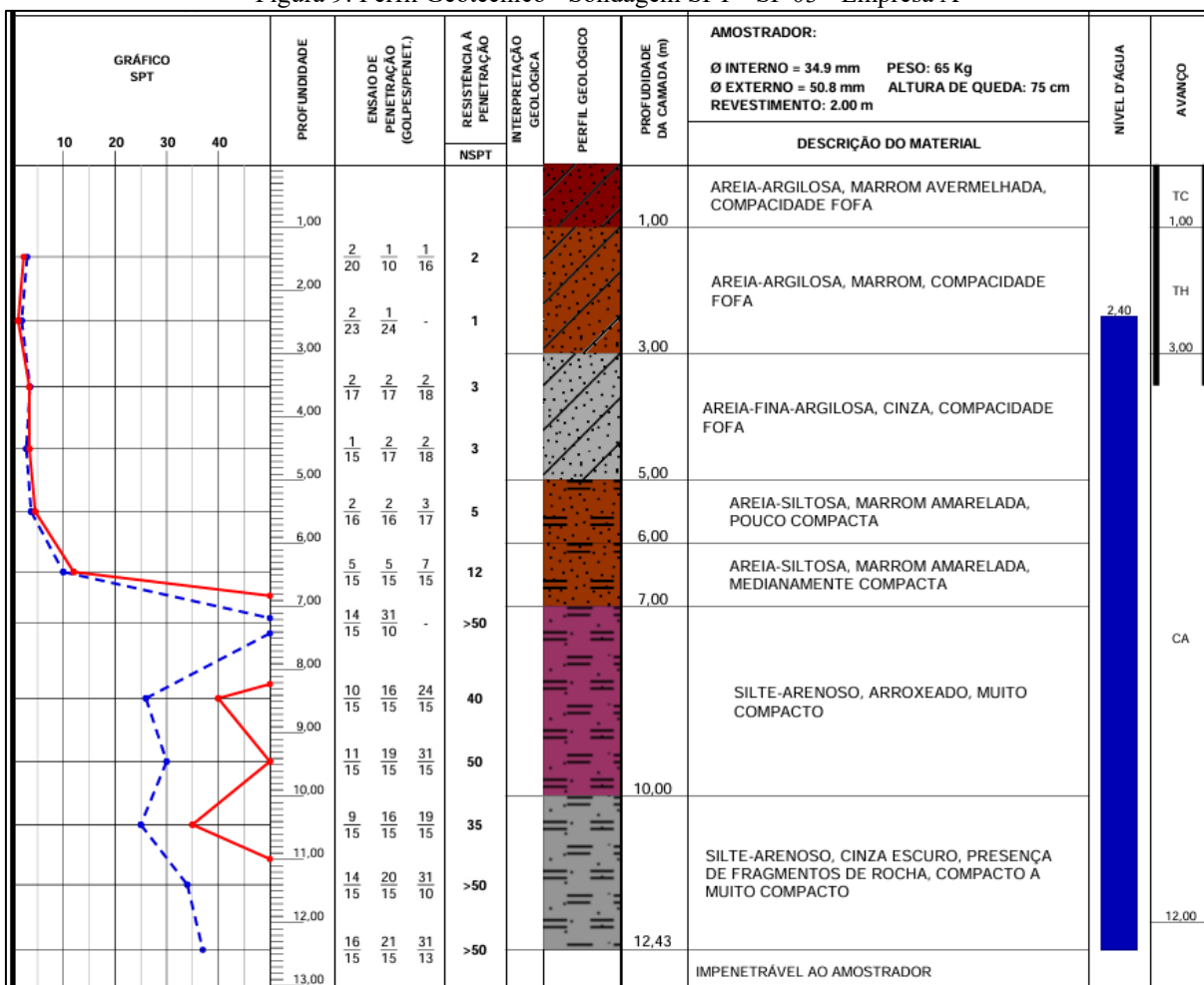
Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

4.5.1 Dados técnicos de sondagens da empresa A

A empresa A executou inicialmente três sondagens (SP-01, SP-02 e SP-03), com intuito apenas de aquisição do terreno e conhecimento básico do perfil geotécnico em pontos espalhados, em seguida, com os dados obtidos previamente na primeira bateria de sondagens, verificou-se que na região próxima a localização planejada para os poços de elevadores, foram encontrados fragmentos de rocha no perfil geotécnico obtido com a sondagem SP-03 e nas três sondagens foram encontrados níveis de água com aproximadamente 2 metros de profundidade.

A Figura 9 mostra o perfil geotécnico obtido com a sondagem SP-03. com informações sobre as camadas de solo encontradas (areia-argilosa, areia-fina-argilosa, areia-siltosa, silte-arenoso e fragmentos de rocha) com suas respectivas profundidades, o nível de água a 2,40 metros de profundidade e os resultados dos ensaios de penetração padrão (SPT), incluindo o número de golpes (NSPT) e a profundidade máxima penetrável de 12,43 metros.

Figura 9: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SP 03 - Empresa A



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Figura 10 apresenta o processo de execução dos furos de sondagem com a cravação de um amostrador padrão de 50,80 mm de diâmetro externo e 41,28 mm de diâmetro interno, tipo Raymond bipartido.

Figura 10: Execução dos furos de sondagem da empresa A



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Figura 11 mostra as amostras de solo obtidas em campo com a sondagem SP-03 recuperadas no bico amostrador e acondicionadas em saco plástico apropriado, devidamente identificado.

Figura 11: Amostras de solos da sondagem SP-03 da empresa A



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Tabela 11 representa um quadro-resumo consolidando as principais informações técnicas das sondagens executadas por essa empresa.

Tabela 11: Resumo das sondagens executadas pela empresa A

SONDAGEM EXECUTADAS					
Sondagem	Local	Prof. Final (m)	Nº de Ensaio SPT	NA - Nível d'água	
				Leitura (m)	Data
SP-01	EDIFICAÇÃO	12,13	12	1,70*	12/04/2022
SP-02		11,05	11	2,20	13/04/2022
SP-03		12,43	12	2,40	14/04/2022
TOTAL		35,61	35	-	-

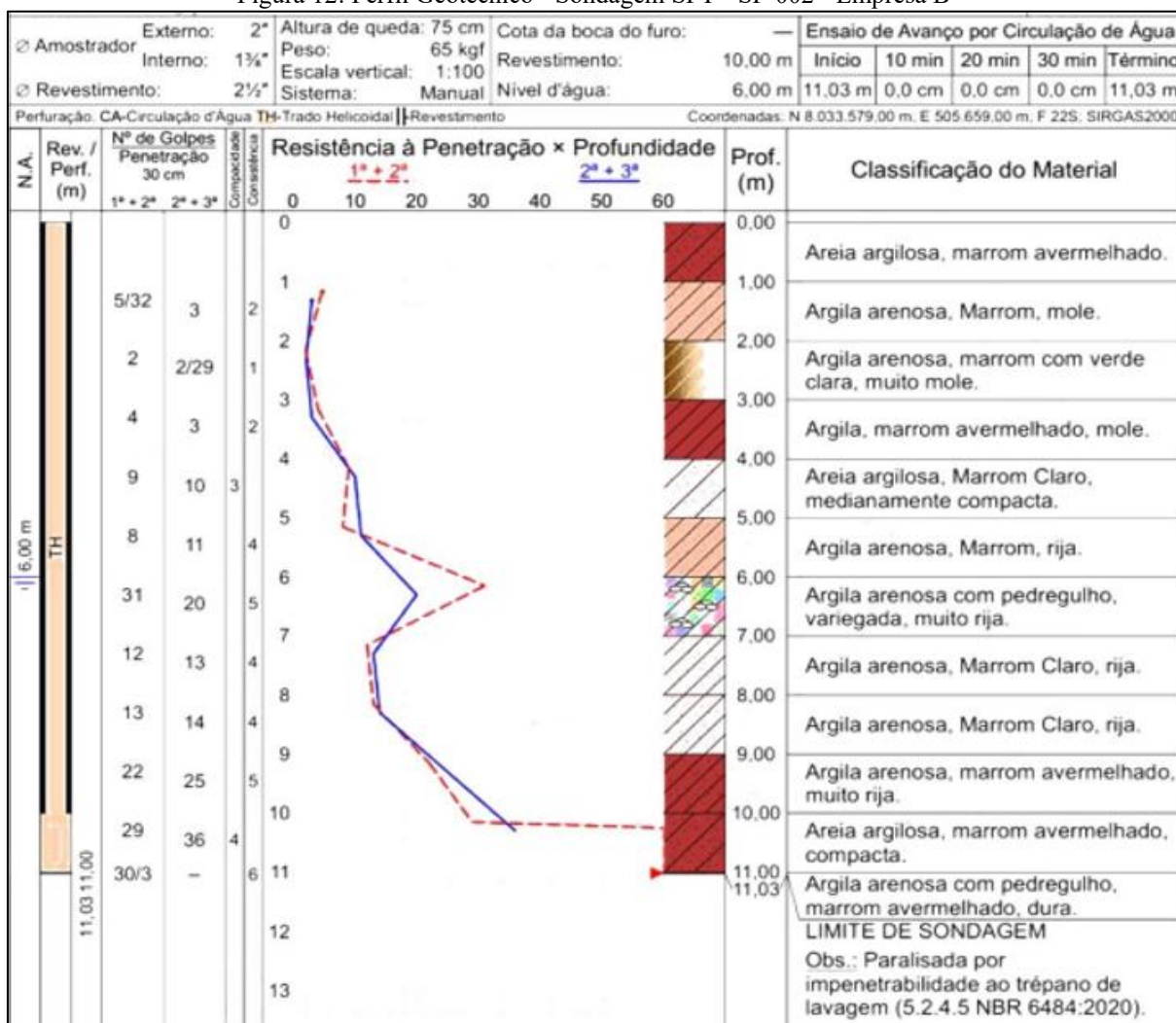
Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

4.5.2 Dados técnicos de sondagens da empresa B

No caso da Empresa B, foram executadas quatro sondagens (SP-001, SP-002, SP-003 e SP-004) complementares para verificação mais ampla das características do solo presente no terreno e para contrapor as sondagens realizadas pela empresa A. Essa nova bateria de sondagens possibilitou a investigação mais aprofundada do solo presente no terreno.

O perfil geotécnico SP-002 apresentado na Figura 12 fornece informações detalhadas sobre a estratigrafia do solo, apresentando as sequências de camadas (areia argilosa, argila arenosa, argila e argila arenosa com pedregulho) com suas respectivas profundidade e suas características, o nível de água a 6,00 metros de profundidade e os resultados dos ensaios de penetração padrão (SPT), incluindo o número de golpes (NSPT) e a profundidade máxima penetrável de 11,03 metros.

Figura 12: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SP-002 - Empresa B



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia, 2025.

O material visual mostrado na Figura 13 inclui registros fotográficos dos furos durante a execução realizada com golpes de um martelo de 65kg e queda livre de 75cm de altura.

Figura 13: Execução dos furos de sondagem da empresa B



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Figura 14 mostra as amostras de solos coletadas durante a sondagem SP-002, destacando a presença de pedregulho na amostra 11.

Figura 14: Amostras de solos da sondagem SP-002 da empresa B



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Tabela 12 apresenta a enumeração dos ensaios realizados, profundidade do nível d'água e a metragem executada em cada ensaio.

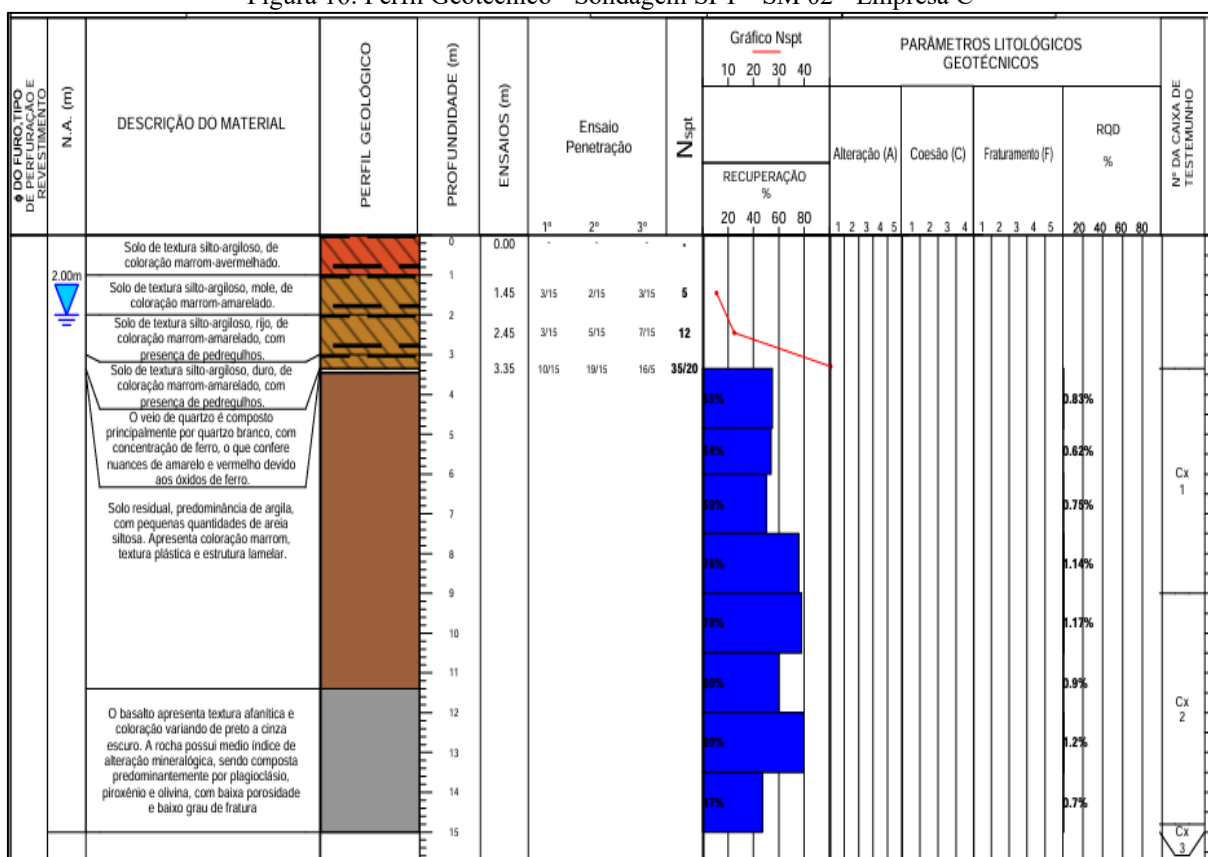
Tabela 12: Resumo das sondagens executadas pela empresa B

Nº SPT	METRAGEM EXECUTADA (m)	N.A (m)
1	9,34	5,00
2	11,03	6,00
3	17,23	8,00
4	14,02	5,00

Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

O perfil geotécnico da sondagem SM-02 apresentado na Figura 16, evidenciou a presença de rocha sã em camadas mais próximas da superfície, com informações detalhadas sobre as condições do solo, abrangendo a descrição das camadas (silte-argiloso, quartzo, solo residual e basalto), o nível d'água foi encontrado na cota de 2,00 metros de profundidade, os valores obtidos de NSPT, incluindo o número de golpes (NSPT) e a profundidade máxima penetrável de 3,35 metros, justificando, portanto, a aplicabilidade da fundação profunda do tipo estaca raiz mais adequada para este perfil geotécnico em função das características estruturais do empreendimento planejado.

Figura 16: Perfil Geotécnico - Sondagem SPT - SM 02 - Empresa C



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Foi executada a sondagem mista, método de investigação que combina a sondagem a percussão (SPT) para o trecho em solo e a sondagem rotativa para o trecho em rocha. A transição do método SPT para o rotativo ocorreu quando se atingiu o impenetrável ao SPT, sem a necessidade de lavagem para o avanço da perfuração. Durante o avanço rotativo, ao encontrar mais de 50 cm de material mole ou incoerente, foi realizado ensaio de penetração SPT, repetindo-se o procedimento a cada 1 m até atingir novamente as condições de impenetrável. A Figura 17 registra o momento da execução desse procedimento em campo.

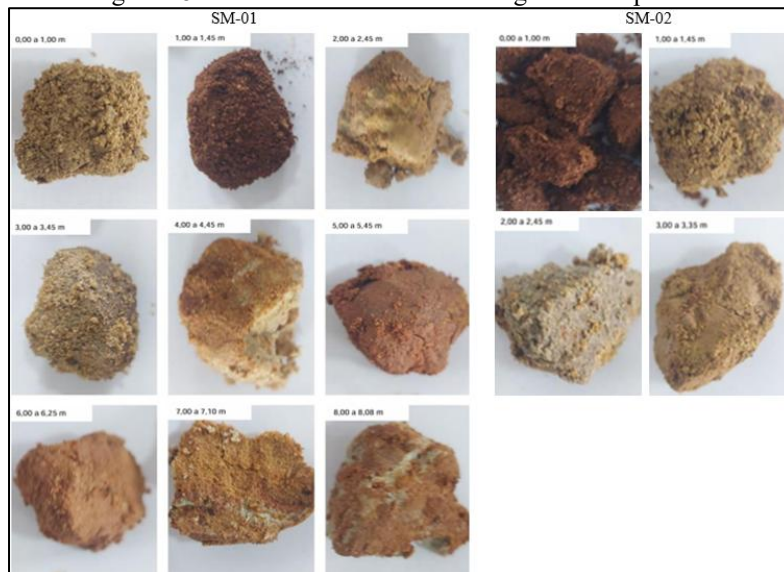
Figura 17: Execução dos furos de sondagem da empresa C



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

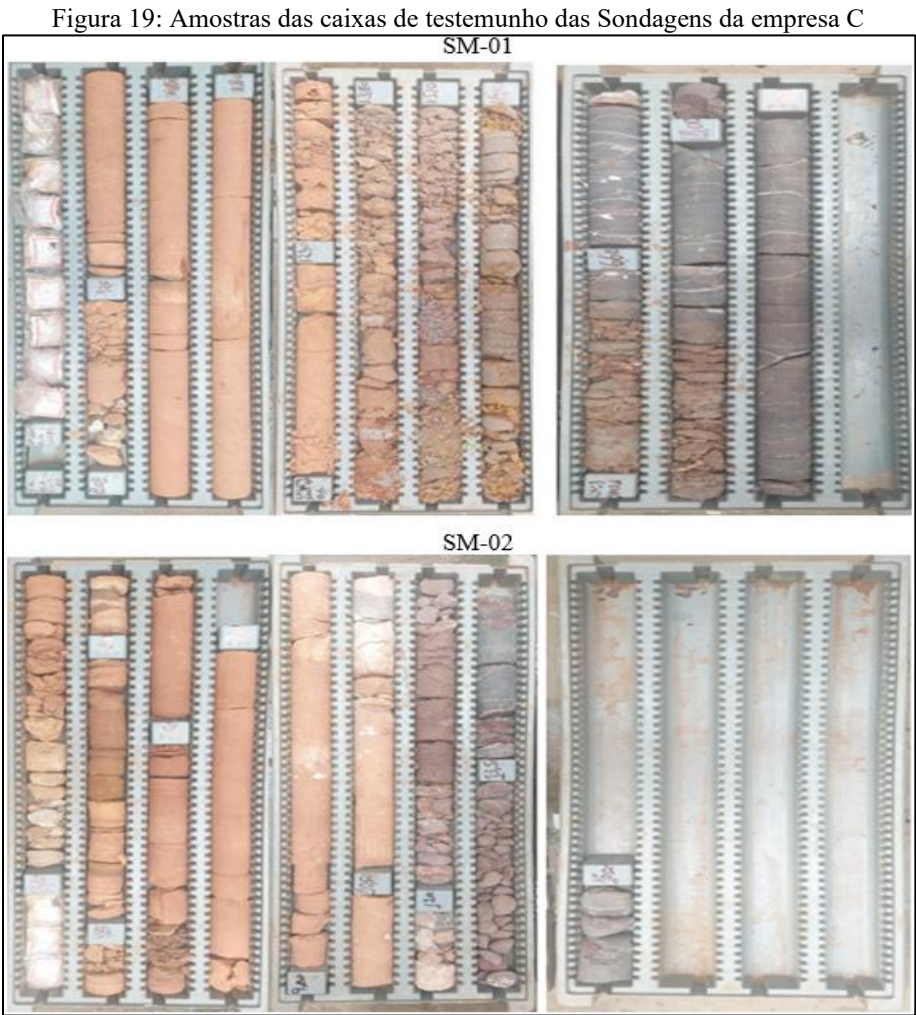
A Figura 18 mostra as amostras de solos coletadas durante as sondagens SM-01 e SM-02, destacando as características de solo silte-argiloso com presença de pedregulhos nas últimas camadas.

Figura 18: Amostras de solos das sondagens da empresa C



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Figura 19 mostra as amostras obtidas durante a perfuração das sondagens SM-01 e SM-02 devidamente acondicionadas em caixas de testemunho, contendo identificação das camadas de solos.



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Tabela 13 apresenta um quadro resumo consolidado com as coordenadas, a data de execução, o nível d'água (N.A.) medido após 24h de sua ocorrência para sua estabilização, e a profundidade de perfuração em cada furo realizado no terreno.

Tabela 13: Resumo das sondagens executadas pela empresa C

Número da Sondagem	Coordenadas		Data de execução	Cotas (m)	N.A (m)	Profundidade do furo - solo (m)	Profundidade do furo - rocha (m)
	(E)	(N)					
SM-01	505657.00	8033608.00	12/11/2024 a 22/11/2024	97,64	2,00	8,08	10,92
SM-02	505669.00	8033590.00	23/11/2024 a 28/11/2024	98,45	2,00	3,35	11,62
Metragem total						11,43	22,54

Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

4.6 Plantas de fundação com detalhes técnicos e especificações das estacas

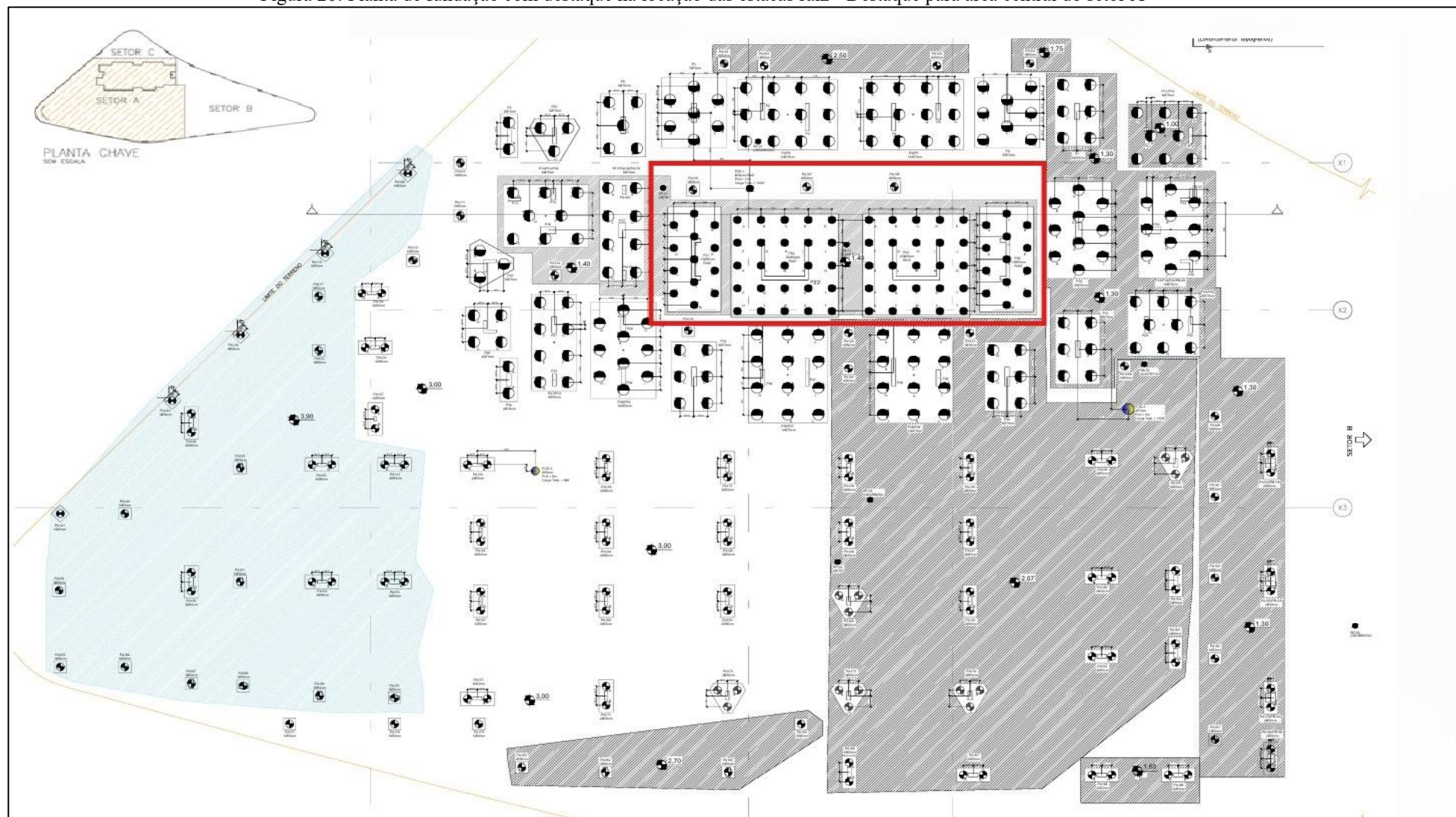
Nas Figuras 20, 21 e 22, são apresentados os principais dados do projeto analisado, incluindo a planta de locação das estacas e o detalhamento técnico do sistema de fundação adotado.

A Figura 20 apresenta a planta geral de locação das fundações do empreendimento, evidenciando as áreas com diferentes tipos de fundações. O destaque em vermelho indica o setor onde foram projetadas estacas raiz, utilizadas na região central do edifício, nas fundações dos poços de elevadores e elementos estruturais de maior solicitação vertical e onde foi localizado a presença de rochas no solo de acordo com o laudo de sondagem realizado pela empresa C.

Na Figura 21, observa-se o arranjo das estacas raiz nos blocos P21, P22, P23 e P24, totalizando 77 estacas com diâmetro de 50 cm e profundidade média de 11 metros. A carga admissível varia conforme o bloco: P21 com 13 estacas (1332 tf), P22 com 25 estacas (2611 tf), P23 com 25 estacas (2504 tf), P24 com 13 estacas (1341 tf) e PCE-1 com 1 estaca destinada à prova de carga estática (140 tf). A legenda da figura apresenta a simbologia dos tipos de fundação adotados (estacas hélice contínua monitorada e estacas raiz), incluindo cargas de trabalho e volumes de concreto. As notas técnicas destacam a conformidade com o Anexo K da NBR 6122:2022, o traço da argamassa com consumo mínimo de cimento ($> 600 \text{ kg/m}^3$) e fator a/c entre 0,5 e 0,6, além da exigência de controle rigoroso de prumo e locação, remoção do concreto acima da cota de corte e detalhamento adequado da ligação com os blocos de coroamento.

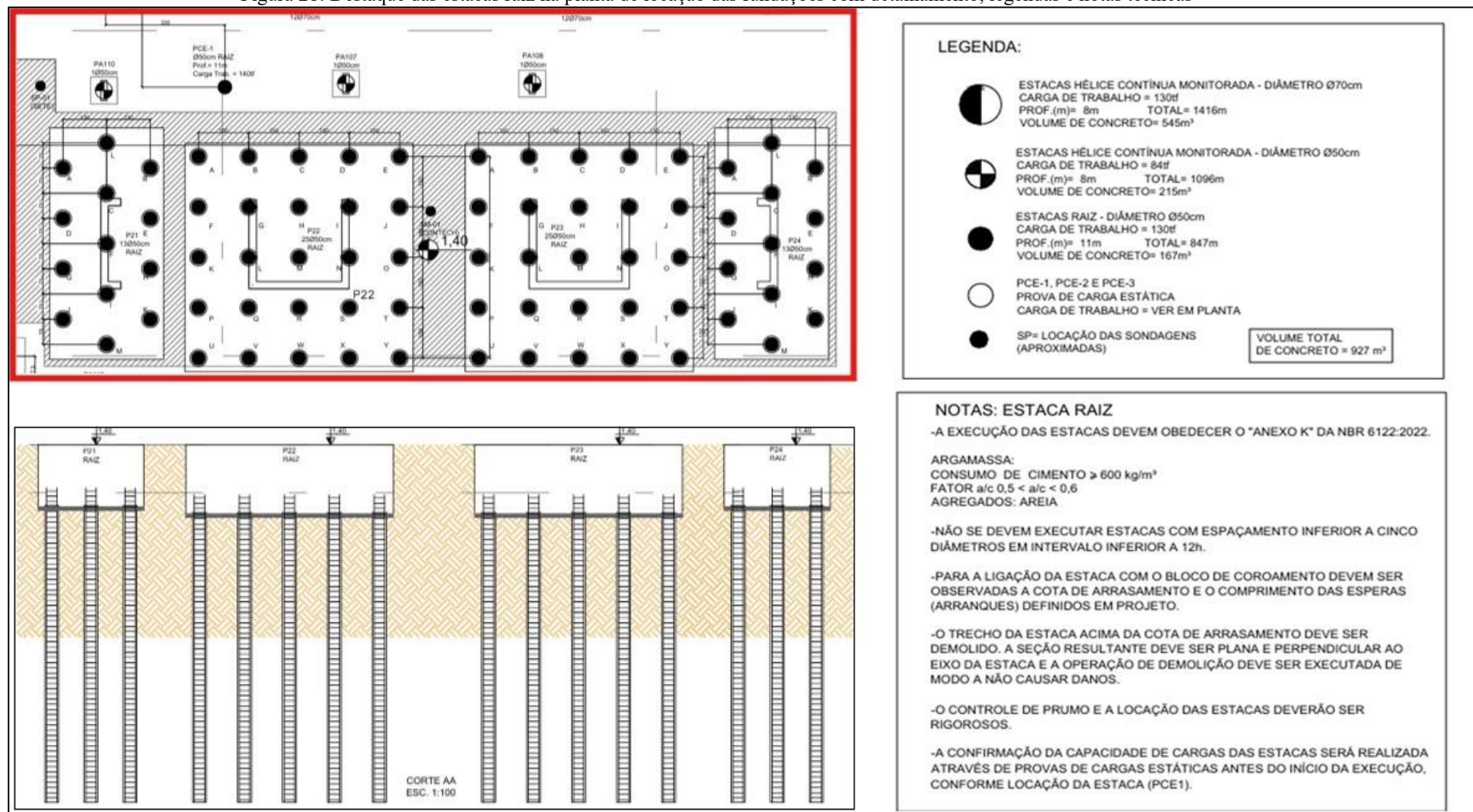
Já na Figura 22, são apresentados os cortes longitudinais das estacas localizadas nos poços dos elevadores, o detalhamento da armadura com penetração de 50 cm no bloco, utilização de espaçadores alternados e aplicação de barras longitudinais com diâmetros variando entre 6,3 mm e 20 mm. A tabela de quantitativo de aço discrimina os tipos e comprimentos das barras utilizadas, totalizando 35.350,78 kg de aço CA-50. Também é apresentado o resumo do consumo das estacas raiz, indicando 77 unidades executadas com profundidade total perfurada de 847 metros e volume estimado de concreto de aproximadamente 167 m^3 . A adoção do sistema de estacas raiz neste projeto é compatível com a necessidade de fundações profundas em áreas com presença de maciços rochosos, garantindo segurança e viabilidade executiva.

Figura 20: Planta de fundação com destaque na localização das estacas raiz - Destaque para área central do setor A



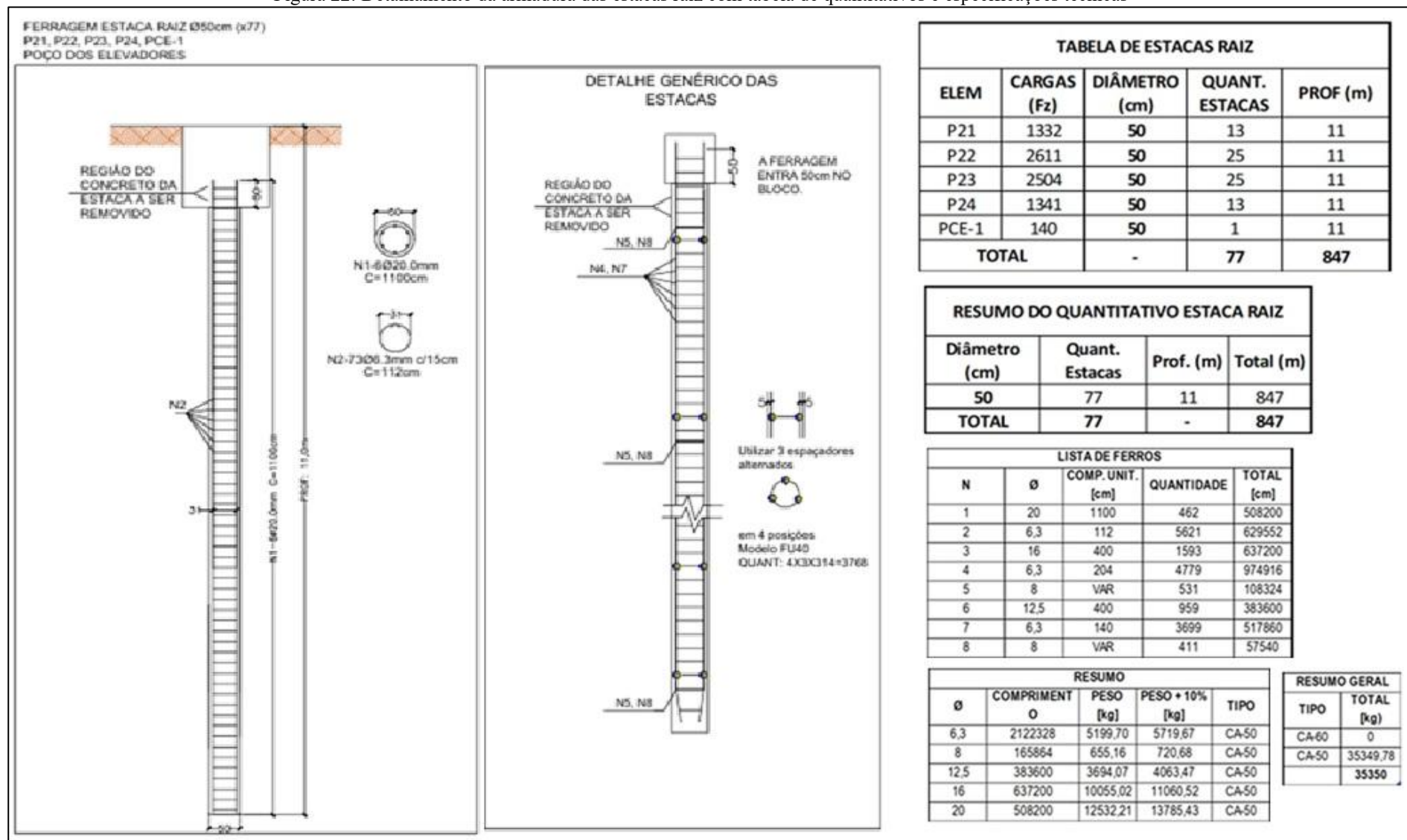
Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Figura 21: Destaque das estacas raiz na planta de locação das fundações com detalhamento, legendas e notas técnicas



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Figura 22: Detalhamento da armadura das estacas raiz com tabela de quantitativos e especificações técnicas



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

4.7 Materiais utilizados

Os materiais utilizados no procedimento executivo da estaca raiz foram:

1. Gerador de energia elétrica: responsável por fornecer a energia necessária para o funcionamento dos equipamentos no canteiro de obras.
2. Compressores de ar: fundamentais para a operação de ferramentas pneumáticas e para limpeza das perfurações.
3. A armadura de aço: a armadura é adquirida previamente montada, sendo armazenada no canteiro de obras e empregada como elemento estrutural, proporcionando resistência à tração e garantindo a estabilidade das estacas.
4. Cimento Portland CPII: foi o principal aglomerante usado na preparação da argamassa.
5. Areia média: como agregado, bem lavada para garantir uma mistura adequada.
6. Conjunto misturador e bomba injetora: para o processo de injeção, essencial para preparar e conduzir a argamassa até a estaca.
7. Padiola de madeira: Com as dimensões 0,40 x 0,35 x 0,23 em metros, utilizado para a dosagem da areia.
8. Conjunto de reservatório de água: garantindo o abastecimento de água para a preparação da argamassa.
9. Balde dosador de água: com 10 litros de capacidade, garantindo precisão na dosagem do líquido na calda.
10. Conjunto misturador de argamassa: contendo a bomba injetora e o reservatório de água.
11. Perfuratriz: para a perfuração do solo.
12. Hastes de perfuração: cada haste com 1,5 metros de comprimento conectadas entre si por roscas, permitindo o avanço progressivo da perfuração à medida que a profundidade aumenta.
13. Conjunto de ponta de perfuração: composto por martelo, amortecedor, broca e haste, fundamentais para avanço em rochas e atingir as profundidades desejadas.
14. Tubos de revestimento metálico: foram utilizados 3 tubos com 2 metros de comprimento cada, usados para manter a estabilidade das paredes da perfuração, evitando o colapso do solo durante o processo executivo.

A Figura 23 ilustra todos os materiais utilizados na obra para a execução da estaca raiz.

Figura 23: Materiais utilizados no procedimento executivo da estaca raiz



Fonte: Autor, 2025.

4.8 Processo executivo da estaca raiz

O processo executivo das estacas raiz foi acompanhado diretamente em campo, durante a realização das atividades na obra, possibilitando a observação detalhada de cada etapa e o registro fotográfico das fases principais do procedimento, sendo organizado o passo a passo da execução, conforme observado:

- 1º Marcação do eixo da estaca e posicionamento da perfuratriz: Inicialmente, um topógrafo realizou a marcação do ponto de locação da estaca conforme o projeto executivo. Para garantir a precisão do ponto de perfuração, utilizou-se um cavalete de marcação, que permite o alinhamento da linha média traçada para a definição exata do eixo da estaca. Após o alinhamento, a área do furo foi delimitada com areia, formando um contorno visual que auxilia no posicionamento correto da perfuratriz. Em seguida, a perfuratriz foi posicionada com precisão sobre o ponto marcado para o início da perfuração, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24: Marcação do eixo da estaca e posicionamento da perfuratriz



Fonte: Autor, 2025.

- 2º Perfuração do terreno com avanço dos tubos de revestimento metálico: A perfuração foi iniciada utilizando-se um conjunto de ponta de perfuração composto por martelo, amortecedor, broca e haste. Em seguida, conforme a perfuração foi avançando, foram inseridos os tubos de revestimento metálico, para garantir a estabilidade das paredes internas do furo, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25: Avanço das hastes de perfuração e revestimento do furo



Fonte: Autor, 2025.

- 3º Processo de perfuração em rocha com saída de água pressurizada: Ao atingir a camada de rocha, a perfuratriz aplica o movimento rotativo, desgastando a superfície da rocha e penetrando em suas camadas, a água injetada sob pressão no interior do furo para refrigeração, lubrificação e remoção dos detritos, começa a ser pressurizada devido ao acúmulo de pressão no furo, formando jatos intermitentes, como mostrado na Figura 26.

Figura 26: Processo de perfuração da camada de rocha



Fonte: Autor, 2025.

- 4º Limpeza do furo e colocação da armadura: Após atingir a profundidade de projeto, realizou-se a limpeza interna do furo com a injeção de água sob pressão, removendo materiais soltos e detritos, com o furo limpo e estabilizado, a armadura previamente montada foi transportada e içada para o local da perfuratriz com auxílio de uma retroescavadeira e com o posicionamento correto realizado pelos operadores, a armadura foi introduzida no interior da estaca, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27: Introdução da armadura



Fonte: Autor, 2025.

- 5º Preparo da argamassa: o traço da argamassa realizada na obra foi composto por 55 litros de água, medidas no balde dosador com capacidade de 10 litros, 2 sacos de cimento Portland CII e 4 padiolas de areia média lavada. A relação água/cimento é de 0,55 e o consumo de cimento de 600 kg/m³. Conforme observações da equipe de campo, geralmente uma estaca utiliza em torno de 16 a 18 traços de argamassa. A Figura 28 mostra o preparo da argamassa na obra.

Figura 28: Preparo da argamassa



Fonte: Autor, 2025.

- 6º Concretagem da estaca: foram inseridos tubos de injeção (mangotes) até o fundo do furo, permitindo o lançamento da argamassa de cimento e areia de forma ascendente e contínua. À medida que a argamassa era injetada sob pressão, a água anteriormente acumulada no interior do furo foi sendo expulsa pela boca, juntamente com os resíduos da perfuração. O processo seguiu até que se observasse a saída da argamassa limpa e homogênea, o que indicou o completo preenchimento do furo, mostrado na Figura 29.

Figura 29: Concretagem da estaca



Fonte: Autor, 2025.

- 7º Retirada do revestimento metálico e finalização da concretagem: os tubos metálicos de revestimento foram sendo retirados de forma gradual e controlada, permitindo que a argamassa preenchesse os espaços anteriormente ocupados pelos mesmos. Após a retirada total dos tubos e a conclusão do preenchimento com argamassa, o topo da estaca foi demarcado. A estaca foi então considerada pronta para cura, mostrado na Figura 30.

Figura 30: Retirada do revestimento metálico e finalização da concretagem



Fonte: Autor, 2025.

4.9 Observações técnicas da obra

Durante o acompanhamento da execução das fundações, foram observadas algumas particularidades técnicas. Em relação a produtividade, a execução da estaca raiz apresenta maior complexidade e menor rendimento diário quando comparada à hélice contínua. Em média, são executadas 3 estacas raiz por dia, com tempo estimado de 3 a 4 horas por unidade, considerando-se o processo completo: perfuração, limpeza, inserção da armadura, concretagem e retirada do revestimento. Já em comparativo com a hélice contínua, esta alcança uma produção significativamente superior, com média de 10 estacas por dia, devido à mecanização do processo e ao uso de concreto usinado.

As estacas raiz executadas possuem diâmetro nominal de 50 cm e profundidade de 11 metros. No entanto, a escavação total atinge 14 metros, incluindo o trecho de 3 metros destinado ao bloco de coroamento. Já as estacas de hélice contínua apresentam profundidade de 8 metros. Ao todo, a fundação da obra é composta por aproximadamente 77 estacas raiz, executadas em áreas específicas e mais críticas da estrutura, e 314 estacas de hélice contínua, utilizadas predominantemente nas demais regiões da fundação.

Para o controle de qualidade da argamassa, são moldados 4 corpos de prova (CP) para cada estaca raiz, sendo 2 corpos de prova rompidos aos 7 dias e 2 corpos de prova rompidos aos 28 dias. A moldagem é realizada na própria obra, com posterior envio dos corpos de prova para ensaio em laboratório especializado em Goiânia, assegurando o monitoramento da resistência à compressão da argamassa injetada. O concreto das estacas de hélice contínua, por sua vez, é adquirido usinado, com controle de qualidade feito pelo fornecedor e conferido em campo.

Foram executados 4 furos específicos para prova de carga estática, sendo 1 estaca instrumentada de projeto e 3 estacas para reação, conforme os procedimentos normativos e exigências técnicas. Por se tratar de um processo que gera tensões no terreno, a execução das estacas raiz respeita um espaçamento mínimo entre estacas vizinhas de 12 a 24 horas, evitando interferência entre as unidades recém-executadas e garantindo o desempenho estrutural da fundação.

4.10 Resultado da prova de carga estática da estaca raiz

Os resultados obtidos no ensaio de prova de carga estática realizados na obra tiveram como finalidade analisar a relação entre carga aplicada e deslocamento, possibilitando estimar a capacidade de carga do elemento de fundação. Esse procedimento é regulamentado pela ABNT NBR 16.903:2020, consiste na instrumentação do topo da estaca e na aplicação de cargas estáticas de forma gradual, até atingir a carga máxima mobilizada ou o dobro da carga de projeto prevista pela ABNT NBR 6122:2022, registrando simultaneamente os recalques correspondentes. Os deslocamentos medidos incluem tanto a deformação elástica recuperável do fuste quanto o recalque definitivo da ponta.

O ensaio identificado como PCE1 foi realizado em uma estaca-teste com diâmetro de 500 mm em solo, reduzindo para 400 mm em camada de alteração de rocha e prosseguindo em rocha sã, com profundidade total de 14,0 m. A estaca estava posicionada próxima a uma fundação de referência (P22) e a um ponto de sondagem (SM-01). A execução da estaca partiu do nível maior que 3,25 m do térreo da edificação.

O sistema utilizado para aplicação da carga foi composto por um atuador hidráulico, acionado por bomba hidráulica elétrica, com capacidade nominal de 420 tf (4.120,2 kN). A medição da carga aplicada foi efetuada por meio de um indicador acoplado à célula de carga e pelo manômetro da bomba hidráulica, este com capacidade nominal de 700 kg/cm². A relação de calibração do atuador hidráulico é expressa pela Equação 19:

$$Y = 0,60 \cdot L \quad \text{Eq.(19)}$$

Onde:

Y = Carga (tf);

L = Leitura média no manômetro da bomba manual (kg/cm²)

O sistema de reação utilizado para a prova de carga à compressão foi constituído, em cada lado, por duas estacas de mesmo diâmetro da estaca ensaiada, totalizando quatro estacas à tração, armadas ao longo de todo o fuste conforme especificações do projeto de ensaio. A viga principal de reação foi apoiada sobre cavaletes metálicos e rigidamente travada por vigas secundárias, formadas por perfis metálicos do tipo duplo “I”, dispostas sobre a viga de reação.

O posicionamento do sistema de reação atendeu ao critério de distância mínima de três vezes o diâmetro da seção transversal da estaca ou, no mínimo, 1,50 m, medidos do eixo da estaca ensaiada até o eixo das estacas de reação. Essa configuração garantiu que as estacas à tração transmitissem os esforços ao solo sem interferir na zona de influência do ensaio.

A Figura 31 apresenta a montagem do sistema de reação juntamente com o dispositivo de aplicação de carga.

Figura 31: Sistema de reação e dispositivo de aplicação de carga



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

O atuador hidráulico foi instalado entre a viga de reação e o bloco de coroamento construído sobre a estaca ensaiada. Dessa forma, à medida que a carga era aplicada pelo atuador, a estaca era comprimida diretamente, enquanto o conjunto estacas à tração/solo era simultaneamente solicitado em tração. O monitoramento das cargas aplicadas foi realizado por meio da leitura contínua dos valores indicados pela célula de carga, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32: Indicador de carga da célula de carga.



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Os deslocamentos verticais no topo da estaca foram registrados simultaneamente por meio de quatro deflectômetros digitais, com precisão de centésimo de milímetro, posicionados em pontos aproximadamente equidistantes ao redor do fuste. Esses equipamentos foram fixados em duas vigas metálicas de referência, projetadas com rigidez compatível à sensibilidade das

medições e apoiadas fora da zona de influência do ensaio, de modo a evitar interferências decorrentes de eventuais movimentações do terreno.

A Figura 33 apresenta a disposição dos deflectômetros na obra e o sistema de apoio adotado.

Figura 33: Deflectômetros fixados em vigas de referência metálica.



Fonte: Guiotti Cintra Engenharia (2025).

O ensaio PCE1 foi executado com carregamento lento, sendo os recalques medidos por meio dos deflectômetros nos tempos de 0 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min e, posteriormente, em intervalos regulares, adotando-se tempo mínimo de 30 minutos para cada estágio de carga. A aplicação do próximo estágio somente ocorreu após a verificação da estabilização dos recalques, conforme critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16.903:2020. A carga aplicada, registrada no indicador da célula de carga, foi continuamente monitorada e ajustada para se manter constante no valor previsto para cada estágio.

De acordo com a ABNT NBR 16.903:2020, a prova de carga deve prosseguir até a ruptura da estaca ou, no mínimo, até o dobro do valor estimado para a carga de trabalho.

A estaca-teste PCE1 possuía 500 mm de diâmetro na porção em solo, reduzindo para 400 mm em camada de alteração de rocha e avançando em rocha sã, com profundidade total de 14,0 m. Sua execução ocorreu próxima a uma fundação de referência (P22) e a um ponto de sondagem (SM-001), conforme projeto de prova de carga estática. O ensaio teve início às 17h50 do dia 26/07/2025, após a leitura inicial dos deflectômetros, sem aplicação de carga.

A Tabela 14 apresenta os valores de deslocamento registrados no topo da estaca durante a execução da prova de carga estática PCE1.

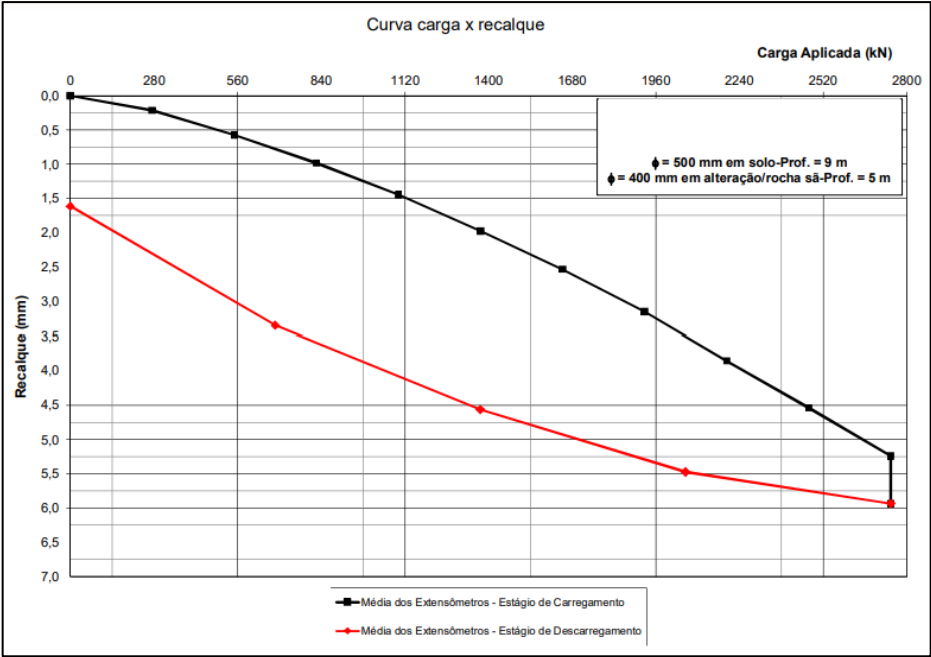
Tabela 14: Deslocamentos medidos no topo da estaca PCE1.

Carga (ton)	Carga (kN)	Deslocamento				
		D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	Média (mm)
0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,00	274,68	0,16	0,23	0,27	0,18	0,21
56,00	549,36	0,43	0,50	0,71	0,64	0,57
84,00	824,04	0,74	0,81	1,23	1,14	0,98
112,00	1098,72	1,18	1,20	1,72	1,67	1,44
140,00	1373,40	1,58	1,62	2,40	2,29	1,97
168,00	1648,08	1,97	2,09	3,14	2,92	2,53
196,00	1922,76	2,42	2,60	3,94	3,63	3,15
224,00	2197,44	2,91	3,20	4,85	4,44	3,85
252,00	2472,12	3,38	3,78	5,76	5,22	4,54
280,00	2746,80	3,84	4,38	6,60	6,14	5,24
280,00	2746,80	4,49	4,91	7,37	6,96	5,93
210,00	2060,10	3,98	4,41	7,03	6,47	5,47
140,00	1373,40	3,17	3,47	6,02	5,58	4,56
70,00	686,70	2,27	2,28	4,50	4,34	3,35
0,00	0,00	1,04	1,07	2,20	2,13	1,61

Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A Figura 34 apresenta a curva Carga × Deslocamento do topo da estaca, obtida a partir da média dos recalques registrados pelos deflectômetros no ensaio da estaca PCE1. Observou-se estabilização dos deslocamentos até o 10º estágio de carregamento, correspondente à carga de 280,0 tf, sem ocorrência de ruptura geotécnica.

Figura 34: Curva Carga x Deslocamento do topo da estaca PCE1.



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

A análise da Figura 34 indica que a capacidade de carga geotécnica última da estaca PCE1 não pôde ser determinada, uma vez que o recalque máximo registrado foi inferior ao valor correspondente a 10% do diâmetro da estaca (50 mm), parâmetro que, segundo o método adotado, caracteriza a ruptura.

A Tabela 15 apresenta o resumo do desempenho da estaca ensaiada, incluindo: carga de projeto (admissível), carga de ruptura geotécnica, recalque medido na carga de projeto, recalque na carga de ruptura e fator de segurança geotécnico individual.

Tabela 15: Resumo do desempenho da estaca ensaiada

Estaca	Profundidade total executada	Carga de projeto	Carga de ruptura geotécnica	Recalque na carga de projeto	Recalque na carga de ruptura	Fator de segurança geotécnico individual
	(m)	(tf)	(tf)	(mm)	(mm)	
PCE1	14,0	140,0	-	1,97	-	> 2,0

Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2025).

Na avaliação do desempenho das fundações, foi considerado o fator de segurança geotécnico individual, juntamente com a magnitude dos recalques sob a carga de projeto, levando em conta o efeito de grupo e a interação fundação–fundação. Para a estaca PCE1, a rigidez inicial (K) obtida foi de 668.717 kN/m.

A estaca ensaiada PCE1 foi submetida a uma carga equivalente ao dobro da carga de projeto, sem que tenha ocorrido ruptura geotécnica. Para a carga máxima admissível (carga de projeto), os deslocamentos verticais médios medidos no topo da estaca foram aproximadamente 1,97 mm. O recalque máximo registrado na estaca-teste PCE1 permaneceu abaixo do limite correspondente a 10% do diâmetro da estaca (50 mm), valor que caracteriza a ruptura geotécnica segundo o critério adotado.

A capacidade de carga das estacas na obra está condicionada ao rigor na execução dos procedimentos construtivos, especialmente na contribuição da resistência de ponta. Dessa forma, foi recomendado que a execução das estacas seguisse estritamente as orientações técnicas estabelecidas nas normas vigentes, incluindo o uso de revestimento ao longo de toda a profundidade até o topo da rocha, a fim de evitar a presença de solo desagregado na base da estaca embutida em rocha.

Os resultados obtidos pela prova de carga estática foram encaminhados aos engenheiros responsáveis pelos projetos de fundações e estruturas para análise e validação.

5. CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados no referencial teórico, foi possível identificar a origem da técnica da estaca raiz, seu desenvolvimento histórico, bem como suas aplicações, vantagens e limitações. Além disso, com os dados técnicos apresentados de sondagem e projeto de fundação juntamente com o acompanhamento da obra localizada no município de Rio Verde em Goiás, foi possível a vivência do processo executivo completo da fundação profunda do tipo estaca raiz, permitindo o registro técnico e fotográfico das etapas construtivas.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi possível compreender, tanto sob o ponto de vista teórico quanto prático, a importância dessa técnica no cenário da engenharia civil. A análise do processo executivo demonstrou que, embora a estaca raiz apresente produtividade inferior quando comparada à estaca hélice contínua, seu desempenho estrutural, versatilidade e capacidade de perfuração em materiais de alta resistência a tornam uma opção indispensável em determinados contextos.

Além disso, o acompanhamento do processo executivo da estaca raiz evidenciou a adequação da técnica às condições específicas do terreno, confirmando sua eficiência e capacidade de execução em situações com presença de rocha. As principais dificuldades observadas relacionaram-se à logística de execução, ao tempo necessário para perfuração e concretagem, e à exigência de mão de obra qualificada para garantir precisão e qualidade. A realização de uma bateria de sondagens prévias, distribuídas ao longo área de implantação, mostrou-se fundamental para caracterizar corretamente o solo, definindo os perfis geotécnicos, proporcionando o planejamento adequado para a solução de fundação mais segura e viável.

Portanto, conclui-se que a estaca raiz, embora tenha menor rendimento diário, oferece vantagens fundamentais em obras com solos complexos, contribuindo para a segurança estrutural e a viabilidade técnica de empreendimentos com características geotécnicas desfavoráveis. Dessa forma, este trabalho contribui não apenas para o aprofundamento do conhecimento acadêmico sobre o tema, mas também para a prática profissional, servindo de referência para estudantes, engenheiros e demais interessados no estudo de fundações.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484: Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.
- ALONSO, U. R. **Dimensionamento de fundações profundas**. 1. ed. digital. São Paulo: Edgard Blücher, 2012. 7. reimpr. 2017.
- ARAÚJO, R. S.; WOLLE, C. M. **Proposta de Adequação de uma Metodologia Consagrada para a Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas para Estacas Mega de Concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG). São Paulo, 2006.
- BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Previdência e Trabalho. **Portaria nº 3.733, de 10 de fevereiro de 2020**. Altera a Norma Regulamentadora nº 18 – Condições de Segurança e Saúde no Trabalho na Indústria da Construção. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 29, p. 24–31, 11 fev. 2020.
- CHEDIAK, H. **Manual de Construção Civil**. 4. ed. São Paulo: PINI, 2013.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas. Projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DECOURT, L.; et al. **Análise e Projeto de fundações profundas**. In: Fundações, Teoria e Prática. Ed. Pini/ABMS/ABEF, 1996. cap. 8, p. 265-327.
- FALCONI, F.; CORRÊA, C. N.; ORLANDO, C.; SCHIMDT, C.; ANTUNES, W. R.; ALBUQUERQUE, P. J.; HACHICH, W.; NIYAMA, S. (org.). **Fundações: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- FONDAZIONE ACCIAIO. **I Micropali. Milano: Fondazione Promozione Acciaio**, 2020. 10 p. Disponível em: <https://www.promozioneacciaio.it>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- FURLANETTO, P. **A engenharia por trás das pirâmides do Egito**. Neo Ipsum, 15 maio 2020. Disponível em: <https://neoipsum.com.br/a-engenharia-por-tras-das-piramides-do-egito/>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- GUIOTTI CINTRA ENGENHARIA. **Relatório técnico e projeto de fundações**. Elaborado por Daniela Silva Cintra de Oliveira. Goiânia, 2025.
- HACHICH, W. et al. **Fundação Teoria e Prática**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1998.
- MONTEIRO, F. F. **Desenvolvimento de uma proposta para o controle executivo de estacas do tipo raiz**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal

do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2016.

MOURA, F. S. **Análise de cortina de estacas raiz justapostas atirantada – Mergulhão Clara Nunes**. 2012. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NOGUEIRA, A. A.; REBOUÇAS, A. S.; COSTA JÚNIOR, J. G. B. **Principais materiais e práticas construtivas que contribuíram para a longevidade do Coliseu**. Educação & Linguagem, ano 10, n. 2, p. 34-51, mai./ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.24277/classica.v9i9/10.517>. Acesso em: 11 jul. 2025.

PEREIRA, C. **Estaca Raiz: Características, Processo Executivo, Vantagens e Desvantagens**. Escola Engenharia, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/estaca-raiz/>. Acesso em: 18 de julho de 2025.

REIS, E.; ANDRADE, R. **Fundação superficial em residência unifamiliar: estudo de execução em Santana do Araguaia/PA**. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Santana do Araguaia, 2023.

TANZINI, M. **Micropali e pali di piccolo diametro: aspetti progettuali e tecnologici**. 2. ed. Palermo: Dario Flaccovio Editore, 2011. ISBN 978-88-579-0074-2.