

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

KAIO HENRIQUE PIRES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PACOTE *PYTHON* PARA CÁLCULO DE
CAPACIDADE DE CARGA EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS POR MEIO DOS
MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS.**

PALMAS

2025

KAIO HENRIQUE PIRES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PACOTE *PYTHON* PARA CÁLCULO DE
CAPACIDADE DE CARGA EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS POR MEIO DOS
MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil da Unidade Campus Palmas do
Instituto Federal do Tocantins, como exigência à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Me. Cleber Decarli de Assis

PALMAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S586d Silva, Kaio Henrique Pires da
Desenvolvimento de um pacote python para cálculo de capacidade de carga em fundações profundas por meio dos métodos semiempíricos. / Kaio Henrique Pires da Silva. – Palmas, TO, 2025.
54 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Me. Cleber Decarli de Assis

1. Cálculo de capacidade de carga. 2. Python. 3. SPT. I. Assis, Cleber Decarli de. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO


KAIO HENRIQUE PIRES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM PACOTE *PYTHON* PARA CÁLCULO DE CAPACIDADE DE CARGA EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS POR MEIO DOS MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS.


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Unidade Campus Palmas do Instituto Federal do Tocantins, como exigência à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 04 de julho de 2025


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CLEBER DECARLI DE ASSIS**
Data: 04/08/2025 14:55:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Cleber Decarli de Assis
Orientador
IFTO – Campus Gurupi

Documento assinado digitalmente
 **EDIVALDO ALVES DOS SANTOS**
Data: 04/08/2025 22:03:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edvaldo Alves dos Santos
IFTO – Campus Palmas

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO DOS GUIMARAES DE CARVALHO**
Data: 04/08/2025 15:05:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho
IFTO – Campus Palmas

A Deus, por me dar força e sabedoria para superar todos os desafios.

Aos meus pais, Ana Helena e Raimundo Sebastião (*in memoriam*) mais conhecido como Tião — que faleceu antes que pudesse ver este sonho realizado. A vocês, obrigado por serem meu alicerce, pelo amor incondicional, pelo sacrifício e por nunca me deixarem duvidar da minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser a minha fortaleza, por me conceder a saúde, a fé e a perseverança necessárias para superar cada obstáculo e chegar até este momento.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas, pela oportunidade de uma educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço também à Coordenação do Curso de Engenharia Civil por todo o suporte durante a graduação.

Ao meu orientador, Professor Mestre Cleber Decarli de Assis, minha mais sincera e profunda gratidão. Sua orientação, paciência, disponibilidade e seus valiosos ensinamentos foram fundamentais não apenas para o desenvolvimento deste trabalho, mas para minha formação como futuro engenheiro.

Aos membros da banca examinadora, Professor Doutor Edvaldo Alves dos Santos e Professor Doutor Adriano dos Guimarães de Carvalho, agradeço imensamente pelo tempo dedicado à leitura e análise deste trabalho. Suas críticas e sugestões foram de grande valia para o enriquecimento da pesquisa.

A todos os professores do colegiado de Engenharia Civil, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, construindo a base sólida que me permitiu desenvolver este projeto e alcançar a conclusão do curso.

À minha família, meu porto seguro. Em especial à minha mãe, Ana Helena Pires do Nascimento, por seu amor infinito, suas orações e seu incentivo incansável em todos os momentos, bons ou difíceis. Ao meu pai, Raimundo Sebastião Rodrigues Xavier da Silva (*in memoriam*), cujos valores e ensinamentos carrego comigo. Aos meus irmãos e demais familiares, obrigado pela compreensão nos momentos de ausência.

À minha companheira Sarah Oliveira Brito, agradeço por toda a paciência, compreensão e apoio durante os longos dias e noites de estudo. Seu amor e incentivo foram meu refúgio e minha força para seguir em frente. Esta conquista também é nossa.

Aos meus amigos e colegas de turma, companheiros de inúmeras jornadas de estudo, trabalhos em grupo e de merecidos momentos de descontração. A caminhada foi, sem dúvida, mais leve e divertida com vocês ao meu lado.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta história, o meu muito obrigado.

Qualquer tolo consegue escrever código que um computador entende. Bons programadores escrevem código que humanos entendem.

Martin Fowler

RESUMO

O dimensionamento de fundações profundas é uma tarefa complexa na engenharia civil, cujos cálculos manuais são extensos e a falta de ferramentas computacionais de código aberto no Brasil representa uma lacuna significativa. Diante da carência de ferramentas computacionais de código aberto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um pacote *Python* extensível e de código aberto (*Open Source*) para automatizar o cálculo da capacidade de carga em fundações profundas, utilizando os métodos semiempíricos propostos por Aoki e Velloso (1975), Aoki e Velloso (1975) revisado por Laprovitera (1988), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), que utilizam dados do ensaio de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*). A metodologia envolveu uma revisão bibliográfica aprofundada e a implementação dos métodos em um software modular, o *calculus-core*, como um pacote *Python*. Para garantir a precisão, os resultados foram validados através da comparação com o estudo de caso de Schulze (2013). Visando a acessibilidade para estudantes e profissionais sem familiaridade com programação, foi desenvolvida também uma interface gráfica (GUI) que simplifica a entrada de dados e a visualização dos resultados, nomeada de *calculus-app*. Como resultado, o software calcula e retorna de forma consistente a resistência na ponta (R_p), resistência lateral (R_l), a capacidade de carga (R_{CALC}) e a capacidade de carga admissível (R_{adm}). A validação demonstrou excelente compatibilidade com os métodos de Aoki e Velloso, enquanto as discrepâncias encontradas nos métodos de Décourt-Quaresma e Teixeira foram investigadas. Uma verificação manual confirmou que a lógica implementada no programa estava correta, validando a sua implementação. O projeto final, distribuído sob a licença MIT, representa uma contribuição relevante ao oferecer uma ferramenta gratuita e confiável que otimiza o tempo de projeto e preenche uma lacuna na engenharia civil brasileira. O trabalho possui limitações, como o foco exclusivo em métodos baseados no ensaio SPT e a não inclusão do cálculo de recalques. Sugere-se para trabalhos futuros a expansão do pacote para incorporar outros ensaios, como o CPT, e a implementação do cálculo de recalques, avançando ainda mais na criação de soluções de engenharia abertas e colaborativas.

Palavras-chave: Fundações. Python. Open Source. SPT. Capacidade de carga.

ABSTRACT

The design of deep foundations is a complex task in civil engineering, where manual calculations are extensive and the lack of open-source computational tools in Brazil represents a significant gap. Given this scarcity, this work aimed to develop an extensible and open-source Python package to automate the calculation of load-bearing capacity in deep foundations, using the semi-empirical methods proposed by Aoki and Velloso (1975), its revision by Laprovitera (1988), Décourt and Quaresma (1978), and Teixeira (1996), which utilize data from the Standard Penetration Test (SPT). The methodology involved an in-depth literature review and the implementation of these methods in a modular software, *calculus-core*, as a Python package. To ensure accuracy, the results were validated through comparison with the case study by Schulze (2013). Aiming for accessibility for students and professionals unfamiliar with programming, a graphical user interface (GUI), named *calculus-app*, was also developed to simplify data entry and result visualization. As a result, the software consistently calculates and returns the tip resistance (R_p), lateral resistance (R_l), ultimate load-bearing capacity (R_t), and allowable load-bearing capacity (R_{adm}). The validation showed excellent compatibility with the Aoki and Velloso methods, while discrepancies found in the Décourt-Quaresma and Teixeira methods were investigated. A manual verification confirmed that the logic implemented in the program was correct, thus validating its implementation. The final project, distributed under the MIT license, represents a relevant contribution by offering a free and reliable tool that optimizes project time and fills a gap in Brazilian civil engineering. The work has limitations, such as its exclusive focus on SPT-based methods and the non-inclusion of settlement calculations. For future work, it is suggested to expand the package to incorporate other tests, such as the CPT, and to implement settlement calculations, further advancing the creation of open and collaborative engineering solutions.

Keywords: Foundations. Python. Open Source. SPT. Load-bearing capacity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Problema de Pesquisa	10
1.2	Justificativa	10
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Considerações Gerais sobre Fundações Profundas	14
2.2	Tipos de Estacas	18
2.3	Métodos de Cálculos da Capacidade de Carga	21
2.4	Cálculo do Recalque da Estrutura	27
2.4.1	Encurtamento Elástico	27
2.4.2	Recalque do solo.....	28
2.5	Ensaio de Investigação	31
2.5.1	Ensaio de investigação <i>Standard Penetration Test</i> - SPT	31
2.5.2	Ensaio de Investigação de cone (CPT) e de piezocone (CPTU)	33
2.5.3	Ensaio de Investigação de palheta (Vane Test)	33
2.6	Contextualização Sobre <i>Python</i> e Temas Relacionados	34
2.7	Uso do <i>Python</i> na engenharia	36
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As fundações devem suportar as solicitações advindas da superestrutura, como o seu próprio peso, cargas acidentais e excepcionais. Para evitar problemas, é fundamental que o dimensionamento seja feito de modo a garantir a segurança da estrutura e obedecer às normas vigentes.

Para realizar o dimensionamento e a execução das fundações, necessita-se de conhecimentos de geotecnia e cálculo estrutural, para efetuar análise estrutural e dimensionamento de estruturas, de mecânica dos solos e mecânica das rochas, para que possa correlacionar as cargas de forças verticais, forças horizontais e momentos da superestrutura com dados do solo e determinar as deformações (recalques), deslocamentos horizontais e rotações, conhecido como interação solo-estrutura (VELLOSO, LOPES, 2010).

Sendo assim, o engenheiro projetista de fundações precisa de conhecimentos acerca da origem e formação dos solos, caracterização e classificação dos solos, investigações geotécnicas, percolação nos solos, controle da água subterrânea, resistência ao cisalhamento, capacidade de carga e empuxos, compressibilidade e adensamento e distribuição de pressões, cálculo de deformações e recalques (VELLOSO, LOPES, 2010).

Existem diferentes métodos de cálculos que guiam os engenheiros no dimensionamento das fundações. Mas, muitos profissionais acabam optando por um roteiro específico que talvez não seja o mais adequado ao tipo de solo em questão, quando o ideal seria fazer um levantamento do dimensionamento em diferentes métodos a fim de compará-los e eleger o que melhor se adapta a realidade trabalhada.

Após o surgimento de linguagens de programação de alto nível, houve uma maior democratização no desenvolvimento de software, pois, ocorreu a abstração de conceitos e complexidades presentes em linguagens de baixo nível como gerenciamento de memória, tipagem, hardware, gerenciamento de recursos, conceitos antes que eram dominados por cientistas da computação (FRISA *et al*, 2021).

Assim, pode-se o engenheiro civil, pegar a vanguarda para desenvolver tecnologias capazes de auxiliar neste processo, garantindo-lhes mais agilidade e precisão no dimensionamento de estacas para fundações, e quando se trata de indiretas ou profundas, como também são chamadas, que possuem alta complexidade em seu projeto e que têm sido cada vez mais exigentes em função dos avanços da construção civil.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um pacote *Python* para cálculo de capacidade de carga de fundações indiretas, pois este processo é muito empregado em prédios,

pontes, residências edificadas sobre camadas de solos pouco resistentes, e grandes estruturas no geral.

Diante disso, salienta-se que a proposta deste trabalho vai além do desenvolvimento de um software para cálculo de fundação profunda, mas, visa-se oferecer, módulos que permitam facilitar e simplificar o cálculo de capacidade de carga neste tipo de fundação, de forma gratuita, no repositório oficial da linguagem *Python*, um pacote que contenha a documentação instruindo como utilizar a ferramenta, para facilitar seu manuseio por engenheiros e desenvolvedores.

1.1 Problema de Pesquisa

No passado, a única ferramenta à disposição dos engenheiros para realização dos projetos estruturais era o desenvolvimento manual dos cálculos, o que dificultava análises mais realistas dos carregamentos aos quais as estruturas estariam sujeitas, e do seu comportamento na prática. Mas, por volta da década de 70, com a popularização dos computadores, introduziu-se na engenharia estrutural os cálculos eletrônicos. Isso tornou as reações nas fundações mais realistas e os processos de cálculo puderam ser otimizados (CHAVES, 2004).

Atualmente, existem diversas ferramentas computacionais que auxiliam os projetistas da engenharia civil em suas tomadas de decisões. Levando isto em conta, chegou-se ao seguinte problema de pesquisa que norteia o desenvolvimento deste trabalho: Como o desenvolvimento de uma ferramenta computacional gratuita e extensível em *Python* pode suprir a ausência de softwares acessíveis para o cálculo de capacidade de carga na engenharia geotécnica brasileira, democratizando o acesso a análises mais precisas?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de ferramentas tecnológicas como o software proposto neste trabalho é importante, pois, em comparação ao cálculo manual, possibilitam um estudo mais detalhado do desempenho das fundações profundas, previsões de capacidade de cargas mais precisas e próximas do desempenho real, o que confere à engenharia civil maior confiabilidade, além da otimização de tempo e de custos com o projeto.

É verdade que já existem disponíveis no mercado um número significativo de programas específicos para o dimensionamento de fundações. Mas, a maior parte deles apresentam altos custos de aquisição, elevada complexidade no manuseio, e/ou não se aprofundam em parâmetros específicos como o cálculo do recalque, por exemplo. Assim, pretende-se contribuir

com a comunidade de desenvolvedores, e também com os projetos de engenharia, com o desenvolvimento de uma ferramenta que possa ser distribuída gratuitamente.

No âmbito das iniciativas *open source* em *Python*, a fim de avaliar os pacotes já existentes e disponíveis na área da engenharia civil, foi realizada uma pesquisa no repositório oficial da linguagem – o PyPI, através da palavra-chave “civil” (que facilmente engloba a engenharia civil em português e inglês). Analisando-se, por relevância, os resultados desta busca, até a página 5 de 15, em termos de nomes, descrições e *tags*, foram encontrados apenas nove pacotes relacionados com a área, sendo eles: *civeng*, *civilpy*, *civiltools*, *structlib*, *cienvpy*, *strupy*, *dxstructure*, *struthon* e *py4structure*.

Os pacotes *civeng* e *structlib*, não apresentavam nenhuma informação da descrição do projeto ou direcionamento para o código fonte, portanto, não se pode compreender qual a sua finalidade prática.

O pacote *civilpy* diz, em sua descrição, que é um pacote focado em utilitários para gerenciamento de arquivos, extração de pdf, manipulação de imagem e conversor de unidade.

Porém, o próprio autor ressalta que este pacote tem como finalidade realizar o acompanhamento do próprio progresso de aprendizado em desenvolvimento.

Já, o *civiltools* não possui uma descrição assertiva, apenas falando que é uma série de ferramentas para engenheiros civis. Ao adentrar no código-fonte, foi possível perceber que se tratava de ferramenta com interface para cálculo estrutural, porém a língua materna do desenvolvedor é persa, sendo o que torna a compreensão do seu funcionamento um tanto mais complexo, já que é um idioma pouco conhecido. Essa dificuldade de leitura fica clara ao observar a página inicial do pacote na Figura 1.

Figura 1- Tela inicial do *civiltools*.



Fonte: GitHub (2021).

Os pacotes *cienvy*, *strupy*, *dxstructure*, *struthon* e *py4structure* são pacotes focados em engenharia estrutural e cálculos como pilares em aço.

É necessário destacar ainda que, nestes projetos, os selos de funcionamento ou estavam ausentes ou quebrados, indicando que estão com *bug* de implantação, não apresentam selos de testes, documentação para uso ausente, sendo estes empecilhos para que sejam propriamente utilizados.

Portanto, pretende-se dar início a um projeto *open source*, sendo criado e distribuído como um pacote *Python*. Este tipo de projeto não se encontra, com facilidade na área de engenharia civil no Brasil, e este software modular poderá auxiliar os engenheiros a criarem suas próprias versões, aproveitando a documentação dos módulos oferecidos, ou mesmo contribuir diretamente com o projeto, e assim ele embarcar, novas matérias relacionadas a fundação e geotecnia, com a contribuição da comunidade *Python* para a comunidade em geral.

Sendo assim, o grande diferencial da proposta deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional gratuita e fácil de ser utilizada tanto por engenheiros experientes quanto por estudantes de engenharia civil ou profissionais iniciantes.

1.3 Objetivos

A seguir, serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um pacote *Python*, de forma livre, capaz de auxiliar engenheiros projetistas no dimensionamento de fundações indiretas, que será distribuído sobre uma licença *open source* acessado pelo repositório oficial da linguagem *Python*.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Estimar a capacidade de carga pelos métodos de Aoki e Velloso, Décourt e Quaresma, e, Teixeira.
- b) Desenvolver um pacote Python que seja extensível e de código aberto para possível evolução em trabalhos futuros por outros pesquisadores.
- c) Publicar o pacote no repositório oficial *PyPi* para facilitar o acesso da comunidade.
- d) Efetuar a validação dos métodos de cálculos implantados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, será apresentada a base teórica para entendimento do tema abordado, como subsídio para o desenvolvimento do software capaz de auxiliar engenheiros projetistas no dimensionamento de fundações profundas.

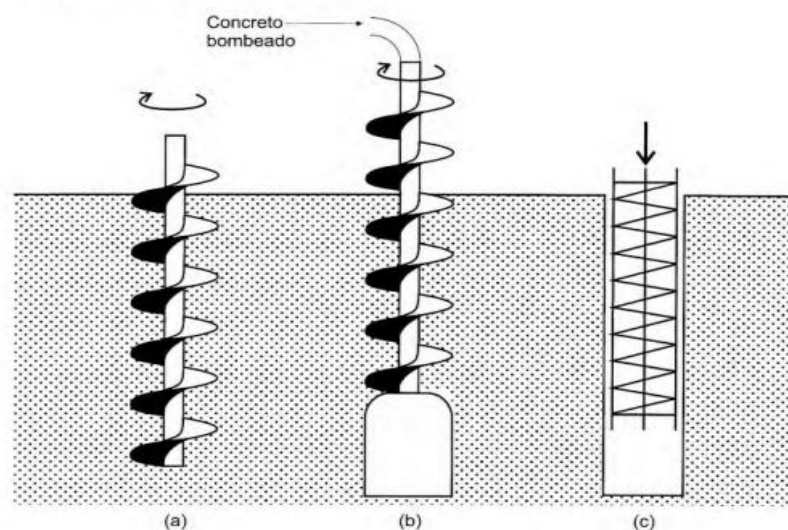
2.1 Considerações Gerais sobre Fundações Profundas

A fundação é o elemento transitório entre a edificação e o solo, que tem como função a transferência de carga da superestrutura para o terreno. Sendo assim, a fundação tem que ser segura, econômica e rápida de ser executada. Além disso, deve ter apenas recalques que possam ser suportados pela superestrutura, evitando a ruptura do solo e do elemento de fundação.

De acordo com a NBR 6122, as fundações indiretas ou profundas são aquelas que apresentam profundidade superior ao dobro da menor dimensão em planta, com no mínimo 3 metros. Este tipo de fundação é mais empregado quando as camadas superficiais do solo apresentam baixa resistência, ou quando é preciso descarregar cargas elevadas no terreno.

O autor separa as fundações em famílias, de acordo com a forma com que é feita a transferência de carga para o solo, sendo elas: superficiais, profundas, injetadas ou de hélice (Figura 2). Dessa forma, as fundações superficiais, conhecidas também como rasas ou diretas, são classificadas assim por fazer a transferência de carga somente pela base. Já as fundações profundas, ou indiretas, fazem essa transferência através de atrito lateral (BERBERIAN, 2017).

Figura 2 - Execução da estaca hélice contínua.



Fonte: (VELLOSO; LOPES, 2010).

Mesmo as fundações injetadas e de hélice sendo também tipos de fundações indiretas, Berberian (2017) as classifica como famílias para salientar seu diferencial. As injetadas são executadas por perfuração rotativa e concretadas por injeção de pasta de cimento, com representantes característicos, como estacas raiz e micro estacas. Já as de hélice, são escavadas por trado contínuo, sendo compostas principalmente pelas hélices contínuas (BERBERIAN, 2017).

O foco deste trabalho se dá nas fundações profundas ou indiretas, portanto, é esta família de fundação que será explorado adiante. Conforme mencionado anteriormente, a norma NBR 6122:2022 define que as fundações indiretas são aquelas que fazem a transmissão de cargas ao terreno tanto pela base, quanto pela superfície lateral por atrito. Por isso, é necessário que sua ponta esteja em uma profundidade de no mínimo 3 metros e superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta.

As fundações indiretas podem ser constituídas dos seguintes elementos: estacas ou tubulões. Segundo a NBR 6122:2022, as fundações de estacas são um tipo de fundação executada por equipamentos ou ferramentas, sem ser necessário efetuar trabalho manual em profundidade, podendo utilizar materiais como madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco*, argamassas e calda de cimento ou mesmo múltiplos materiais. Já os tubulões necessitam do trabalho manual em profundidade para executar o alargamento da base ou efetuar a limpeza do fundo, já que para este tipo de fundação, o método de dissipação das cargas é majoritariamente pela ponta.

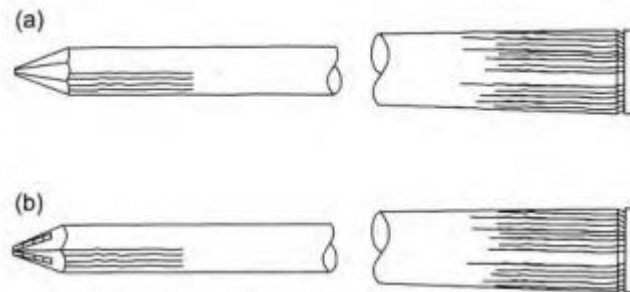
Conforme Albiero e Cintra (1998), muitas vezes os tubulões podem ser difíceis de distinguir das estacas escavadas, por terem características semelhantes e um grande diâmetro na seção, com ou sem alargamento da base. Foi convencionado por muito tempo que a diferença entre tubulão e estaca se dava pelo emprego da mão de obra humana na descida para efetuar a finalização do serviço, mas que com o avanço das técnicas e tecnologias é possível que o emprego do trabalho manual seja abandonado. Neste contexto, as obras internacionais classificam que os tubulões praticados no Brasil são estacas escavadas moldada *in loco* com a base alargada.

Mais uma vez, salienta-se que o foco deste trabalho está na análise de fundações profundas de estacas. Para este tipo de fundação, a NBR 6122:2022 diz que a carga admissível¹ é a principal grandeza a ser considerada, mas necessita que seja levado em conta também o

¹ A carga admissível é a capacidade de carga que estacas e tubulões podem suportar de modo a provocar apenas recalque suportáveis à construção, sem inconvenientes que comprometam a segurança da edificação.

fator de segurança global² e valores característicos ou a força resistente de cálculo³, ao utilizar coeficientes de ponderação⁴ e valores de cálculo.

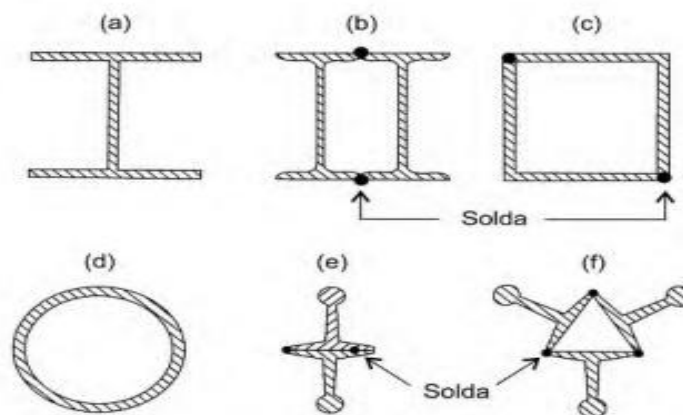
Figura 3 - Estacas de madeira: (a) sem reforço na ponta; (b) com reforço.



Fonte: (VELLOSO; LOPES, 2010).

Considerando as fundações por estacas, Velloso e Lopes (2010) apresentam ainda outros dois tipos de classificações para as fundações: quanto ao material utilizado na fabricação das estacas; e quanto a execução da estaca. Em relação ao material, estas podem ser confeccionadas de madeira (Figura 3), concreto, aço (Figura 4) e misto. Já na classificação segundo a execução da estaca, temos as (i) de deslocamento e (ii) de substituição. Na primeira, há o deslocamento do solo pelas estacas cravadas. E na segunda, o solo é removido, diminuindo as tensões horizontais geostáticas, caracterizando as estacas escavadas.

Figura 4 - Estacas metálicas em suas seções típicas: (a) seção H; (b) seção I dupla; (c) Cantoneira dupla; (d) tubo redondo; (e) trilho duplo; (f) trilho triplo.



Fonte (VELLOSO; LOPES, 2010).

² O fator de segurança global relaciona o limite de carga de trabalho especificado com a carga de ruptura mínima efetiva.

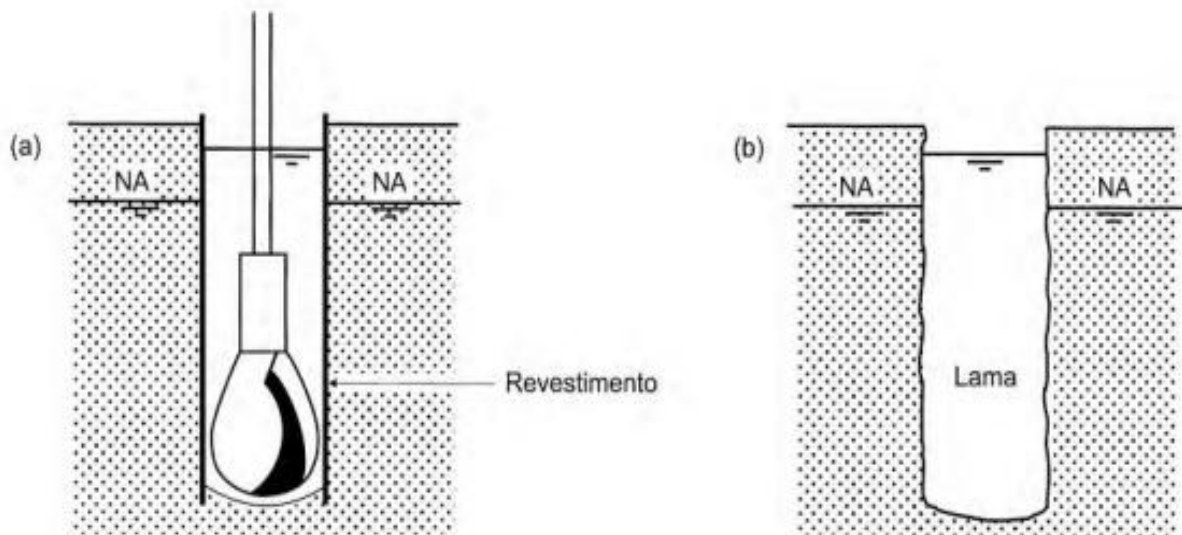
³ A força resistente de cálculo corresponde ao valor de resistência característica minorada por um coeficiente de segurança.

⁴ Os coeficientes de ponderação são utilizados para suprir as incertezas relacionadas à resistência dos materiais e às ações atuantes, garantem uma segurança aceitável para a estrutura.

A NBR 6122:2022 aduz que as estacas podem ser escavadas através do uso de fluido estabilizante (Figura 5), o que ocorre quando a perfuração utiliza, por exemplo, água como fluido estabilizante, a fim de assegurar a estabilidade da perfuração durante a remoção do solo. Também podem ser escavadas mecanicamente através de trado mecânico, sem utilização de revestimento metálico ou fluido estabilizante.

Velloso e Lopes (2010) alertam que existem processos nos quais as estacas escavadas não necessitam de remoção prévia do solo, neste caso particular são classificadas como sem deslocamento. Os autores apontam ainda que existem outras classificações relacionadas as estacas, como as de compactação, as flutuantes e as de ponta.

Figura 5 - Execução de estacas escavadas: (a) com revestimento; (b) com fluido estabilizante.



Fonte: Adaptado Velloso e Lopes (2010).

Nas de compactação, a transferência de carga se dá, principalmente, por atrito lateral, e ocorre um processo de compactação do solo em torno do grupo, em solos granulares muito permeáveis. As flutuantes também fazem a transferência de carga por atrito lateral, mas se distinguem das anteriores devido à ausência de compactação significativa do solo, aplicadas em solos finos de baixa permeabilidade. Por fim, as de ponta transferem as cargas a uma camada resistente profunda pela ponta (VELLOSO; LOPES, 2010).

Sob a visão de Berberian (2017), a escolha errada do tipo de fundação ocasiona problemas técnicos e financeiros. Apesar disso, o autor afirma que este erro ainda é cometido de forma significativa, motivado pela tentativa dos projetistas de reduzir custos para aumentar a competitividade dos projetos no mercado da construção civil.

O autor levanta parâmetros para nortear a escolha do tipo de fundação a utilizar, sendo eles: segurança, relação custo/benefício, características do local, comportamento das fundações vizinhas, disponibilidade de equipamentos e mão de obra e, por fim, carga e porte da obra. Neste ponto, também é listado vantagens e desvantagens a serem consideradas na escolha, bem como para estacas escavadas que são ideias para solos com coesão, sendo executadas rapidamente e que possuem boa relação custo/benefício, com o contra de serem exequíveis somente acima do nível do lençol freático em solos coesivos (BERBERIAN, 2017).

Rebello (2008) complementa estas orientações, dizendo que a escolha para utilizar uma fundação indireta deve ser dar quando a fundação direta não for possível ou viável. Isto ocorre quando o ensaio de sondagem (SPT) indicar que a camada com profundidade maior que 2 metros, apresenta um número de golpes de 8 ou mais.

A experiência do engenheiro que está conduzindo o projeto será definitiva para a boa escolha do tipo de fundação e a segurança da mesma. O proprietário visa ter uma fundação segura, sem patologias durante a vida útil do empreendimento. Sendo então necessário optar pela fundação que tenha a melhor relação custo/benefício, para isto é necessário analisar mais de uma solução (BERBERIAN, 2017).

Diante das colocações iniciais, apresentadas ao longo deste tópico, já foi possível notar a importância dos tipos de estacas para o desempenho adequado das fundações. Sendo assim, serão apresentados a seguir, de forma mais detalhada, as principais classificações de estacas a serem empregadas em fundações profundas.

2.2 Tipos de Estacas

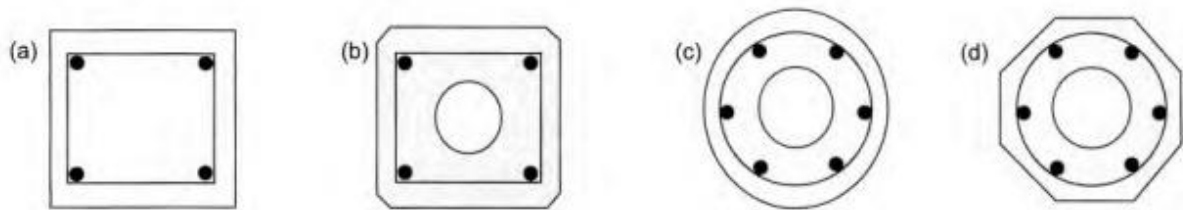
As estacas desempenham o importante papel de transferir a carga para substratos mais resistentes, localizados em camadas mais profundas das fundações. Apresenta diferentes classificações para as estacas das fundações profundas, baseadas nos seguintes aspectos: o tipo de material de fabricação; o modo de transferência de carga ao solo; o deslocamento provocado no solo.

Em relação ao material:

- a) Estaca de madeira.
- b) Estaca de concreto pré-moldado ou moldada in loco.
- c) Estaca Metálica: perfis de aço com seção em perfil H, I, trilho, circular vazada, quadrada vazada.
- d) Estaca Mista: compostas geralmente por concreto e aço.

Por fim, no que diz respeito ao processo de concretagem das estacas de concreto: as estacas moldadas *in loco*, na qual a concretagem é feita diretamente no poço da estaca, com o solo servindo de contensão para o concreto, de modo a garantir aderência entre o concreto e o solo; e as estacas pré-moldadas (Figura 6), que são concretadas ainda nas fábricas, fora do poço da estaca, garantindo melhor controle tecnológico do concreto, porém, menor contato entre concreto e solo, sendo necessário preencher eventuais vazios.

Figura 6 - Seções de estacas pré-moldadas de concreto.



Fonte: Adaptado Velloso e Lopes (2010).

Em relação ao modo de transferência de carga, Berberian (2017) propõem três classificações: as estacas por ponta, que transferem a maior parcela da carga pela ponta, utilizadas em solos com camadas superficiais mais moles ou em obras sob água como pontes; as estacas flutuantes, em que a maior parte da carga é transferida pelo fuste, sendo sujeitas a problemas no caso de colapso do solo adjacente; e as estacas mistas, que transferem a carga de maneira equilibrada pela ponta ou fuste, sendo o tipo de estaca utilizada na maioria das fundações.

No que se refere ao deslocamento provocado no solo, temos as estacas de substituição, com enquadramento das estacas escavadas, são implementadas mediante a retiradas de parcelas do solo durante a escavação. Já as estacas de deslocamento, temos as estacas cravadas em geral, são prensadas ao solo e comprimem o mesmo lateralmente (VELLOSO; LOPES, 2010).

A respeito do deslocamento provocado no terreno, a norma inglesa diferencia as estacas de grande deslocamento, quando são utilizadas estacas cravadas de seção elevada, das estacas de pequeno deslocamento, quando a seção transversal é pequena, ou são utilizados perfis metálicos em seções (H, I) ou seções com ponta. Há ainda as estacas sem deslocamento, que se referem às estacas escavadas, quando o solo é removido durante o processo de escavação e ocorre reposição das tensões geostáticas mesmo que parcialmente (VELLOSO; LOPES, 2010).

Alonso (2001) sugere que a escolha final do tipo de estaca a ser utilizado em determinada construção deve ocorrer mediante estudos profundos que atendam aos critérios técnicos e econômicos do projeto. É preciso considerar as proximidades dos edifícios nos limites da extensão, bem como dos estados das fundações destes edifícios. Esta análise deve englobar também a natureza das camadas do solo, a grandeza das cargas empregadas, além de limitações do mercado. Diante disso, a escolha de fundação é feita, por esgotamento das possibilidades, sendo necessário verificar quais tipos atendem aos requisitos técnicos, e efetuar um estudo comparativos no custo necessários para implementar essa solução.

Com base, na obra de Velloso e Lopes (2010), foi realizado a confecção do quadro resumo sobre as estacas, abaixo:

Quadro 1 - Quadro-resumo tipos de estacas (continua).

Tipo de Estaca	Descrição	Forma/Tipo	Tipo/Dimensão	Carga admissível
Estaca de Madeira	Estacas constituídas por troncos de árvores, retilíneos.	Cilíndrica	Comprimento L menor que 6 m, $\Phi 25\text{cm}$;	De 200 a 600 kN
			Comprimento L maior que 6 m, $\Phi (20+L)\text{ cm}$;	
Estaca Metálicas	Estacas de aço constituídas em perfis laminados ou soldados, com seções I e H, chapas circulares, quadradas, retangulares ou podendo ser trilhos.	Trilho	TR 25 a 50, podendo ser combinado em 2 ou 3.	De 200 a 900 kN
		Perfil I	De 8" a 12", podendo ser combinado em 2.	300 a 1200 kN
		Perfil H	H 200 mm a H 310	700 a 2000 kN
Estaca Pré-Moldada	Estaca de concreto, moldada em canteiro ou usina, com confecção em concreto vibrado, concreto centrifugado, extrusão, e com armadura em concreto armado ou concreto protendido.	Pré-moldada vibrada, de concreto armado, quadrada maciça.	20 x 20 cm até 35 x 35 cm	400 a 1200 kN
		Pré-moldada vibrada, de concreto armado, circular com furo central.	$\Phi 22\text{ cm}$ a $\Phi 33\text{ cm}$	400 a 800 kN
		Pré-moldada vibrada, de concreto protendido.	$\Phi 20\text{ cm}$ a $\Phi 33\text{ cm}$	350 a 900 kN
		Pré-moldada centrifugada, de concreto armado.	$\Phi 20\text{ cm}$ a $\Phi 60\text{ cm}$	300 a 2100 kN

Quadro 1 - Quadro-resumo tipos de estacas (conclusão).

Tipo de Estaca	Descrição	Forma/Tipo	Tipo/Dimensão	Carga admissível
Estaca escavada	Estaca de concreto moldada in loco, onde ocorre a remoção de solo no processo de escavação.	Circulares, sem revestimento ou fluido estabilizante	$\Phi 20$ cm a $\Phi 60$ cm	120 a 1400 kN
		Circulares, com revestimento ou com fluido estabilizante	$\Phi 20$ cm a $\Phi 120$ cm	1400 a 5600 kN
		Estaca barrete ou Estaca Diafragma, escava com fluido estabilizante	(40 até 100) x 250 cm	5000 a 12500 kN
		Estacas Hélice	$\Phi 40$ cm a $\Phi 100$ cm	800 a 4700 kN
		Estacas Raíz	$\Phi 20$ cm a $\Phi 40$ cm	300 a 1400 kN
		Strauss	$\Phi 25$ cm a $\Phi 45$ cm	200 a 650 kN
		Franki	$\Phi 30$ cm a $\Phi 70$ cm	800 a 4500 kN

Fonte: (VELLOSO; LOPES, 2010).

2.3 Métodos de Cálculos da Capacidade de Carga

Ao explicar o significado da capacidade de carga de um elemento em fundações, Cintra e Aoki (2010) convidam a imaginar uma estaca qualquer, de comprimento L , inserida no solo, que é inicialmente submetida a uma carga de compressão que aumenta gradualmente. Com a aplicação da compressão, ocorrerá uma reação de resistência por atrito lateral, entre o solo e o fuste da estaca, e uma reação de tensões resistentes normais na sua base.

O atrito lateral suportará a carga até o seu limite máximo. Então, a resistência de ponta, por sua vez, suporta até a máxima mobilização. Após este limite, a estaca passa a ficar submetida a um recalque incessante, que caracteriza a ruptura da fundação. Dessa forma, a capacidade de carga pode ser definida como sendo o valor que submete o elemento de fundação à máxima resistência, antes do elemento sofrer o recalque incessante (CINTRA; AOKI, 2010).

Segundo a Norma ABNT NBR 6122 (2022), a estimativa da capacidade de carga em estacas pode ser feita através da realização de prova de carga, por métodos teóricos e analíticos, ou por métodos semiempíricos que relacionam resultados provenientes de testes como o de

sondagem do terreno - *Standard Penetration Test* (SPT), e os ensaios de penetração de cone (CPT) com tensão admissível ou com tensões resistentes de cálculo.

Devem ser considerados, nos cálculos da capacidade de carga das estacas, fatores como as características geomecânicas do subsolo, a profundidade da ponta, as dimensões e forma dos elementos de fundação, a posição do lençol d'água, além de particularidades que provocam a alteração das características naturais do solo de apoio, o alívio de tensões, a ocorrência de solicitações adicionais como atrito negativo, esforço horizontais, peculiaridades da obra, sobrecargas externas, inclinação de carga, inclinação de terreno, estratigrafia do terreno e recalques (NBR 6122, 2022).

Apesar de serem previstas na norma, Cintra e Aoki (2010) ressaltam que as fórmulas teóricas referentes à determinação da capacidade de carga em elementos de fundações profundas dificilmente obtêm modelos físicos e matemáticos que sejam aderentes à realidade. Embora tenham sido muito estudadas, não foram encontradas soluções eficazes para a utilização destas fórmulas teóricas na previsão de carga das estacas.

Como alternativa para este impasse, surgem os métodos de cálculos semiempíricos, que são métodos baseados nas correlações empíricas de ensaios *in situ*, ajustados com provas de carga. Estes, por sua vez, apresentam resultados adequados para a previsão de capacidade de carga em fundações por estacas (CINTRA; AOKI, 2010).

Entre os métodos semiempíricos de cálculos da capacidade de carga de estacas, Alonso (2001) destaca os métodos desenvolvidos por Aoki e Velloso (1975), e os métodos desenvolvidos por Décourt e Quaresma (1978). Ambos descrevem a carga de ruptura (PR) de uma estaca isolada como a soma de duas parcelas: a parcela do atrito lateral (PL) e a parcela da ponta (PP), conforme apresentado na equação a seguir:

$$PR = PL + PP$$

O cálculo da parcela do atrito lateral (PL) é feito pela equação:

$$PL = U \sum \Delta l \times R_l$$

Onde:

U = perímetro da seção transversal do fuste.

R_l = incógnita geotécnica relacionada ao tipo de solo e tipo de estaca utilizada.

Δl = trecho com R_l constante.

E o cálculo da parcela da ponta (PP) é feito pela equação:

$$PP = A \times R_p$$

Onde:

A = área da projeção da ponta da estaca.

R_p = incógnita geotécnica relacionada ao tipo de solo e tipo de estaca utilizada.

Os métodos de cálculo de Aoki e Velloso (1975) e de Décourt e Quaresma (1978) se diferem na forma de estimar os valores de R_l e R_p (ALONSO, 2001).

Para Aoki e Velloso (1975), o valor de R_p e de R_l são estimados, respectivamente, através das seguintes equações:

$$R_p = \frac{K \times N}{F_1}$$

$$R_l = \frac{\alpha \times K \times N}{F_2}$$

Onde:

N = valor do teste de sondagem do terreno SPT.

α e K = coeficientes que dependem do tipo de terreno.

F_1 e F_2 = coeficientes que dependem do tipo de estaca.

Os valores propostos por Aoki e Velloso para F_1 e F_2 , e para α e K, são respectivamente apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2 a seguir:

Tabela 1 - Valores de F_1 e F_2 por tipo de estaca por Aoki e Velloso.

Tipo de estacas	F_1	F_2
Franki	2,5	5,0
Pré-moldadas	1,75	3,5
Escavadas	3,0	6,0

Fonte: (ALONSO, 2001).

Tabela 2 - Valores dos coeficientes K e α por Aoki e Velloso.

Tipo do solo	$K(MPa)$	$\alpha(\%)$
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia silto-argilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilo-siltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte areno-argiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argilo-arenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila areno-siltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila silto-arenosa	0,33	3,0

Fonte: (ALONSO, 2001).

Em 1998 Laprovitera propôs uma tabela revisada para os coeficientes K e α e fatores F_1 e F_2 , além de incluir um novo α' conforme a confiabilidade da sondagem.

Tabela 3 - Valores de F_1 e F_2 por tipo de estaca por Aoki e Velloso.

Tipo de estacas	F_1	F_2
Franki	2,50	2,00
Metálica	2,40	3,40
Pré-moldadas	2,00	3,50
Escavadas	4,50	4,50

Fonte: (LAPROVITERA, 1988).

Tabela 4 - Valores dos coeficientes K e α por Aoki e Velloso por Danziger e Laprovitera (1988).

Tipo do solo	$K(MPa)$	$\alpha(\%)$	$\alpha'(\%)$
Areia	0,60	1,4	1,4
Areia siltosa	0,53	1,9	1,9
Areia silto-argilosa	0,53	2,4	2,4
Areia argilosa	0,53	3,0	3,0
Areia argilo-siltosa	0,53	2,8	2,8
Silte	0,48	3,0	3,0
Silte arenoso	0,48	3,0	3,0
Silte areno-argiloso	0,38	3,0	3,0
Silte argiloso	0,30	3,4	3,4
Silte argilo-arenoso	0,38	3,0	3,0
Argila	0,25	6,0	4,0
Argila arenosa	0,48	4,0	2,6
Argila areno-siltosa	0,30	4,5	3,0
Argila siltosa	0,25	5,5	3,6
Argila silto-arenosa	0,30	5,0	3,3

Fonte: (LAPROVITERA, 1988).

Já Decourt e Quaresma (1978), estimaram os valores de R_l e de R_p da seguinte maneira:

$$R_l = 10. \left(\frac{N}{3} + 1 \right) \text{ em kPa.}$$

$$R_p = C \underline{N}$$

Onde:

\underline{N} = a média entre os valores do SPT na ponta e nas camadas imediatamente acima e abaixo

C = coeficiente que depende do tipo de solo

Os valores de C propostos por Decourt e Quaresma para estacas escavadas são apresentados na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Valor de C para estacas escavadas por Decourt e Quaresma

Tipo do solo	C (kPa)
Argila	100
Siltes argiloso	120
Siltes arenoso	140
Areia	200

Fonte: (ALONSO, 2001).

Teixeira (1996) utilizando referências dos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), propôs uma equação unificada para o cálculo de capacidade de carga.

$$R = R_p + R_l = \alpha N_p A_p + \beta N_l PL$$

Onde:

α = coeficiente que depende do tipo do solo e tipo da estaca.

N_p = valor médio entre os valores SPT entre 4 diâmetros acima da ponta da estaca e 1 diâmetro abaixo.

A_p = área de projeção na ponta da estaca.

β = coeficiente que depende do tipo da estaca.

N_l = valor médio ao longo do fuste da estaca.

P = perímetro do fuste da estaca.

L = comprimento da estaca.

Tabela 6 – Coeficiente α (TEIXEIRA, 1996).

Tipo de Solo ($4 < N < 40$)	Tipo de Estaca - α [kPa]			
	Pré-moldada e perfil metálico	Franki	Escavada a céu aberto	Raiz
Argila siltosa	110	100	100	100
Argila arenosa	210	160	130	140
Silte argiloso	160	120	110	110
Silte arenoso	260	210	160	160
Areia argilosa	300	240	200	190
Areia siltosa	360	300	240	220
Areia	400	340	270	260
Areia com pedregulhos	440	380	310	290

Fonte: (CINTRA; AOKI, 2010).

Tabela 7 – Coeficiente β (TEIXEIRA, 1996).

Tipo de Estaca	β [kPA]
Pré-moldada e perfil metálico	4
Franki	5
Escavada a céu aberto	4
Raiz	6

Fonte: (CINTRA; AOKI, 2010).

2.4 Cálculo do Recalque da Estrutura

Conforme Cintra e Aoki (2010), o recalque, ocorre numa estaca qualquer, de comprimento L , em que exista uma distância C , entre a estaca e a camada indeslocável (como topo rochoso ou camada de solo rígida que possa ser considerada indeformável), que esteja submetida a uma carga vertical P . A aplicação dessa carga P provoca deformações na estaca, como o encurtamento elástico da própria estaca (ρ_e), e no solo, como as deformações verticais de compressão das camadas de solo subjacentes à base até a camada indeslocável (ρ_s).

Dessa forma, o comprimento L da estaca e a distância C são diminuídos conforme as equações seguintes:

$$L - \rho_e$$

$$C - \rho_s$$

Diante disso, a estaca passa a estar submetida a um deslocamento vertical total, para baixo, que é chamado de recalque (ρ), sendo calculado através da soma das parcelas de deformação, conforme apresenta-se a seguir:

$$\rho = \rho_e + \rho_s$$

Dada a importância do encurtamento elástico (ρ_e) e do recalque do solo (ρ_s), ambos serão analisados de forma individual.

2.4.1 Encurtamento Elástico

Cintra e Aoki (2010), descrevem que o encurtamento elástico, pode ser obtido ao analisar o diagrama de esforço normal ao longo da estaca, por uma profundidade Z . É possível observar a diminuição do esforço normal em $P(z)$, do valor máximo no início da estaca, até o mínimo na base da estaca.

Dessa forma, ao aplicar a lei de Hooke⁵ para a obtenção do ρ_e , temos:

$$\rho_e = \frac{1}{A \times E_c} \sum (P_i \cdot L_i)$$

Onde:

A = área da seção transversal do fuste da estaca

E_c = módulo de elasticidade do concreto

Na ausência de valor específico para E_c , podem ser considerados os valores descritos por Cintra e Aoki (2010), apresentados na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Módulo de elasticidade do concreto por tipo de estaca	
Tipo de estaca	E_c
Pré-moldada	28 a 30 GPa
Hélice contínua, Franki e estação	21 GPa
Strauss e escavada a seco	18 GPa

Fonte: (CINTRA, AOKI, 2010).

2.4.2 Recalque do solo

Devido à 3ª lei de Newton (lei da ação e reação), à estaca aplica reações ao solo, ao longo do fuste e de sua base e, por consequência deste carregamento, as camadas entre a base da estaca até a superfície da camada indelocável sofrem deformações que resultam no recalque (ρ_s) do solo (CINTRA; AOKI, 2010).

Considerando a propagação de tensões na proporção 1:2, e aplicação de carga vertical para abaixo, é possível calcular o acréscimo de tensões nas camadas do solo pela equação abaixo:

⁵ Lei de Hooke é uma lei da física relacionada à elasticidade dos corpos, segundo a qual, a forma aplicada é igual ao produto da deformação por uma constante elástica, dependendo do material do qual o corpo é constituído.

$$\Delta\sigma_p = \frac{4P_p}{\pi(D + h + \frac{H}{2})^2}$$

Onde:

P_p = força vertical para baixo aplicada ao solo, que provoca acréscimo de tensões numa camada subjacente qualquer.

D = diâmetro da base da estaca.

H = camada subjacente submetida a acréscimo de tensão.

h = distância vertical do ponto de aplicação da força ao topo da camada H .

De maneira análoga, Cintra e Aoki (2010) demonstram que, para a determinação do acréscimo de tensão que ocorre em função de reações à resistência lateral (R_{Li}), pode-se aplicar a mesma equação, substituindo a carga P_p , pela R_{Li} . Com o ponto de aplicação sendo o centroide do segmento, temos:

$$\Delta\sigma_i = \frac{4R_{Li}}{\pi(D + h + \frac{H}{2})^2}$$

Dessa forma, o acréscimo de tensões totais, será dado por:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_p + \sum\Delta\sigma_i$$

O recalque do solo (ρ_s) é, portanto, estimado pela Teoria da Elasticidade Linear, após a determinação do acréscimo de tensões para cada uma das camadas que fizer parte da análise, da base da estaca até o indeslocável, conforme apresenta-se a seguir:

$$\rho_s = \sum\left(\frac{\Delta\sigma}{E_s}H\right)$$

Onde:

E_s = módulo de deformabilidade da camada de solo.

Cintra e Aoki (2010) apontam que este módulo de deformabilidade (E_s), por sua vez, pode ser calculado através da expressão abaixo, adaptada de Janbu (1963):

$$E_s = E_0 \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Onde:

E_0 = módulo de deformabilidade do solo antes da execução da estaca.

σ_0 = tensão geostática no centro da camada.

n = expoente relativo à natureza do solo ($n = 0,5$ para materiais granulares; $n = 0$ para argilas duras e rijas).

Para isso, Cintra e Aoki (2010) consideram valores de $n = 0,5$, para materiais granulares, e de $n = 0$, para argilas duras e rijas. Já para os valores de E_0 , considera-se a relação apresentada abaixo, exposta por Aoki (1984):

$$E_0 = 6 \cdot K \cdot N_{SPT}, \text{ para estacas cravadas.}$$

$$E_0 = 4 \cdot K \cdot N_{SPT}, \text{ para estacas hélice contínua.}$$

$$E_0 = 3 \cdot K \cdot N_{SPT}, \text{ para estacas escavadas.}$$

Onde, K é o coeficiente empírico cujos valores já foram apresentados na Tabela 2 deste trabalho, e N_{SPT} é proveniente do teste SPT.

2.5 Ensaios de Investigação

Segundo Cintra *et al* (2013), os recalques são inevitáveis, desta forma o projeto de fundações precisa considerar valores admissíveis de recalque, absoluto e diferencial, sendo então, necessário conduzir ensaios de investigação geotécnica.

O solo como material natural, é variável quanto a composição e comportamento, ao comparar duas amostras relativamente próximas, é possível detectar variação do maciço quanto ao tipo de solo, consistência, compactidade, resistência e deformabilidade. Então, deve-se em cada projeto efetuar a investigação geotécnica do solo (CINTRA *et al*, 2013).

Temos variados tipos de ensaio de investigação como SPT, CPT e CPT-U e ensaio de palheta (*Vane Test*), este trabalho foca no detalhamento do ensaio SPT por conta de as metodologias de cálculo de capacidade de carga abordadas serem baseadas no mesmo.

2.5.1 Ensaio de investigação *Standard Penetration Test* - SPT

Conforme Cintra *et al* (2013), o ensaio SPT ou *Standard Penetration Test* é um ensaio de penetração dinâmica, mais utilizado no Brasil, e por vezes o único ensaio realizado, que consiste em fazer perfurações verticais no maciço, efetuada por um trado, que alterna com o conjunto de haste e amostrador, no qual amostras são obtidas a cada metro até a cota de interesse.

A sondagem ou ensaio SPT, é normatizado pela ABNT NBR 6484:2020, que especifica o método de execução, seja o manual ou mecanizado, para obter as informações do tipo de solo, profundidades das camadas, nível de água, e o N_{SPT} que consiste no índice de resistência à penetração a cada metro investigado.

A norma define que o ensaio, consiste na perfuração e cravação dinâmica de um amostrador-padrão, a cada metro, no caso da execução de sondagem manual, o amostrador é cravado no solo com uso de um martelo elevado manualmente até o topo do tripé ou torre, e na execução mecanizada o amostrador é cravado no solo com o martelo acionado mecanicamente.

Os elementos principais para a execução manual, consistem em:

- a) Torre de aço com roldana.
- b) Tubos de revestimento de aço com diâmetro interno mínimo de 63,5 mm até 165 mm, com segmentos emendando por luvas.

- c) Hastes de perfuração ou cravação do amostrador-padrão, de aço, diâmetro interno 25mm e massa teórica de 3,23 kg/m, acopladas por roscas e luvas, que formam um conjunto retilíneo, em segmentos de 1 m e/ou 2m.
- d) Trado-concha compatível com revestimento.
- e) Trado helicoidal de diâmetro mínimo de 56mm e que possua uma margem de 5 mm a 7 mm do diâmetro interno do revestimento.
- f) Trépano de aço com largura de (62 ± 5) mm, diâmetro nominal de 25 mm, tendo a extremidade em biselada, dotada de duas saídas laterais para água, a lâmina do trepano deve ter folga de 3 mm a 5mm em relação ao diâmetro interno do tubo de revestimento, as saídas de água dever estar pelo menos 200 mm e até 300 mm do bisel.
- g) Amostrador-padrão, possui diâmetro externo de $(50,8 \pm 2)$ mm e diâmetro interno de $(34,9 \pm 2)$ mm, cabeça tendo saídas laterais para água e ar, corpo retilíneo, bico de aço temperado.
- h) A cabeça de bater que faz parte do sistema de cravação, peça responsável por receber o impacto do martelo, sendo constituída de tarugo de aço de (88 ± 10) mm de diâmetro, (90 ± 10) mm de altura e massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg.
- i) Martelo-padrão, deve ser de ferro em forma prismática ou cilíndrica, podendo ser maciço ou vazado, com haste-guia com marca visível de 0,75 m da cabeça de bater, o martelo deve eixo de simetria longitudinal para assegurar centralização do impacto, e conjunto deve ter massa total de 65 kg.

Na execução mecanizada as principais diferenças de equipamento são:

- a) Perfuratriz rotativa, mecanizada que efetua a penetração do solo.
- b) Conjunto para martelo automático, martelo de aço, cilíndrico com 65 kg de massa, mecanismo para garantir queda de 75 cm, sistema de guia, sistema de elevação do martelo com regulagem de golpes por minuto.

A execução propriamente dita, ocorre com a perfuração do solo até 1 m de profundidade, então instalado o revestimento (se necessário), então a operação segue de maneira intercalada com amostragem e perfuração, caso o trado helicoidal tenha tido avanço inferior a 50 mm após 10 min de operação, utiliza-se a perfuração por circulação de água com trépano.

O ensaio é realizado a cada metro, sendo 55 cm por perfuração em trado ou trepano de lavagem, e então, segue com o amostrador-padrão para os próximos 45 cm, o amostrador é cravado com o golpe do martelo-padrão, a cravação é feita em três camadas de 15 cm e anotado

o número de golpes necessário para avançar, o N_{SPT} consiste na média do número de golpes dos 30 cm finais do amostrador.

A parada da cravação do amostrador-padrão, a norma indica que:

- a) Se em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30.
- b) Se o amostrador-padrão não avançar durante a aplicação de cinco golpes sucessivos.
- c) Os critérios de paralisação do ensaio, recomendados pela norma são:
- d) Avanço da sondagem até a profundidades de 10 m de resultados consecutivos indicam N iguais ou superiores a 25 golpes.
- e) Avanço da sondagem até a profundidades de 8 m de resultados consecutivos indicam N iguais ou superiores a 30 golpes.
- f) Avanço da sondagem até a profundidades de 6 m de resultados consecutivos indicam N iguais ou superiores a 35 golpes.
- g) Neste ensaio, é obtida a caracterização da camada do solo pelo material que vem no amostrador, o nível do lençol freático, e o número de golpes por camada de 15 cm.

2.5.2 Ensaio de Investigação de cone (CPT) e de piezocone (CPTU)

Os ensaios de cone (CPT) e de piezocone (CPTU) efetuam a penetração do solo com uma ponta cônica a velocidade constante e 2 cm/s. Ocorrendo então a investigação de 1 m de solo por minuto. Por este motivo o ensaio é chamado de penetração estática ou quase estática (CINTRA *et al*, 2013).

Neste ensaio, durante a cravação do cone, na ponta mede-se a resistência da ponta, e com uma luva de atrito acoplada à ponta mede-se o atrito lateral. Com o advento do CPT elétrico com células de carga e a adição de medidor de pressão d'água mede-se também a poropressão durante a penetração, este sendo o ensaio de piezocone ou CPTU (CINTRA *et al*, 2013).

2.5.3 Ensaio de Investigação de palheta (Vane Test)

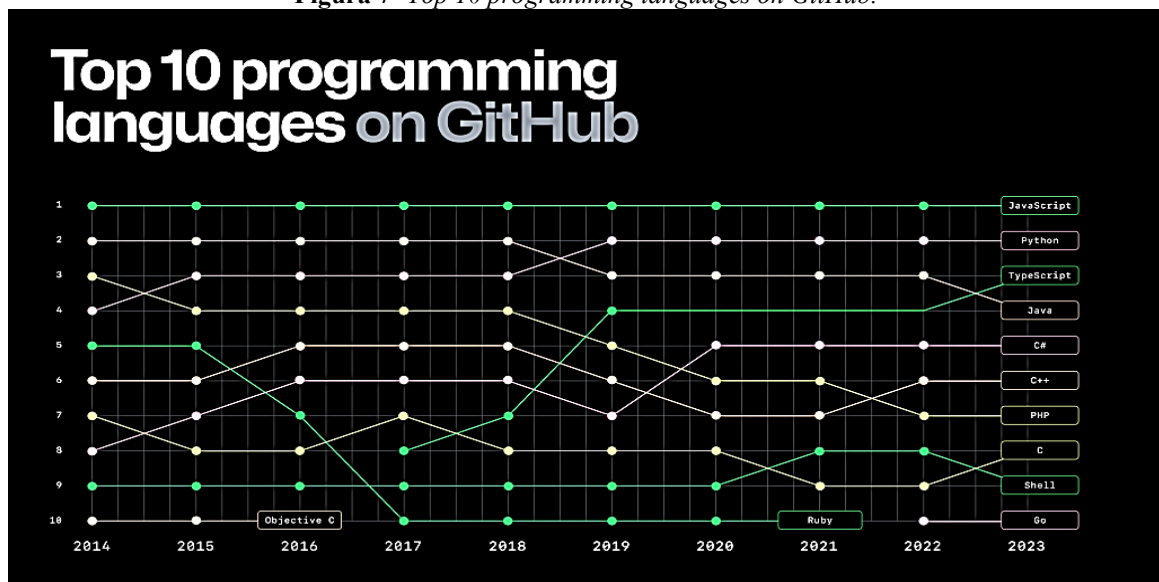
O ensaio de palheta conforme a NBR 10905/89 é adequado para determinação da resistência não drenada do solo. Por uma palheta constituída de quatro pás, em aço resistente, que formam ângulos retos entre si, com diâmetro de 65 mm e altura de 130 mm, que quando

cravadas no solo cisalhando em uma superfície em forma de cilindro. Para aferição do resultado mede-se o torque em função da rotação da palheta.

2.6 Contextualização Sobre *Python* e Temas Relacionados

Hoje existem diversas linguagens de programação como *JavaScript*, *TypeScript*, *Python*, *Java*, *C#*, *C++*, *C*, *PHP*, *Go*, *Ruby* e centenas de outras, que poderiam ter sido escolhidas para o desenvolvimento, porém a linguagem de programação escolhida, para a execução deste trabalho, foi *Python*, linguagem esta, que está presente consistentemente entre as cinco posições de destaque no ranking do GitHub de linguagens de programação mais populares, pelos últimos 10 anos, conforme Figura 7.

Figura 7- Top 10 programming languages on GitHub.



Fonte (DAIGLE, 2023)

Além de, popularidade, no site do *PSF Python Brochure Project*, é distribuído o documento, no qual, compartilha casos de sucesso e projetos de grande impacto, nas áreas de negócios, ciências, indústria, educação, mídia, governo, setor público e caridade, neste documento encontramos empresas como *Mozilla*, *Google*, *Youtube*, *SurveyMonkey*, *Esri* e *ArcGIS* no quais seus projetos são utilizados diretamente na engenharia civil, e até mesmo em projetos que procuram vida em Marte, como o projeto da Agência Espacial Europeia (ESA) que desenvolveu uma rede neural para reconhecer bioassinaturas (RADSCHINSKI, 2019).

A linguagem *Python*, foi criada no início de 1990 por Guido van Rossum, enquanto estava na *Stichting Mathematisch Centrum (CWI)* na Holanda, embora *Python* tenha várias

logos e imagens associadas a cobras, seu nome foi batizado assim como homenagem ao grupo de comédia britânico *Monty Python*, Guido tinha como objetivo criar uma linguagem fácil de ler e de escrever, com sintaxe clara e intuitiva (PYTHON™, 2023).

Em 1995, o trabalho foi continuado na Corporação para Iniciativas Nacionais de Pesquisa (CNRI) em Reston, Virgínia, em meados de 2000, Guido e a equipe principal de desenvolvimento do *Python* se filiaram a *BeOpen.com* para formar o time *BeOpen PythonLabs* e no mesmo ano a equipe migrou para *Digital Creations* que virou *Zope Corporation*. Em 2001, formou-se a *Python Software Foundation*, uma organização sem fins lucrativos criada especificamente para possuir a propriedade intelectual relacionada a *Python* (PYTHON™, 2023).

Python é historicamente uma linguagem de código aberto ou *Open Source*. No site da iniciativa *Open Source* (2006), descreve-se que para ser considerada uma linguagem de código aberto é necessário atender os critérios de:

- a) Distribuição gratuita, ou seja, a licença não deve restringir nenhuma parte de vender ou utilizar o software como componente de uma distribuição agregada, livre de taxas ou royalties
- b) Código-fonte, o programa deve incluir código-fonte e deve permitir distribuir o código-fonte, e o meio de obtenção do código-fonte ser acessível, bem divulgado e sem custos.
- c) Trabalhos derivados, a licença deve permitir que modificações e trabalhos derivados sejam distribuídos sobre os mesmos termos que a licença original.
- d) Integridade do código fonte do autor, a licença pode restringir o código-fonte de ser distribuído em forma modificada somente se a licença permitir a distribuição de patch, a licença deve permitir explicitamente que a distribuição de software construído a partir de código-fonte modificado, a licença pode exigir que os trabalhos derivados tenham nome ou número de versão diferente que o original.
- e) Não discriminar pessoas ou grupos, a licença não pode discriminar qualquer pessoa ou grupo de pessoas.
- f) Não discriminar área de atuação, a licença não deve restringir ninguém e fazer uso do programa em campo específico de empreendimento.
- g) Distribuição da licença, os direitos associados ao programa devem aplicar-se a todos a quem o programa é redistribuído sem a necessidade de execução de uma licença adicional.

- h) A licença não deve ser específica a um produto, os direitos associados ao programa não devem depender de o programa fazer parte de uma distribuição de software específica.
- i) A licença não deve restringir outro Software, a licença não deve impor restrições a outro software que é distribuído juntamente com o licenciado.
- j) A licença deve ser neutra, nenhuma parte da licença pode ser baseada em qualquer tecnologia individual ou estilo de interface.

Esta linguagem de programação tem sido utilizada em diversas áreas como desenvolvimento web, ciência de dados, inteligência artificial, automações e outras, uma característica importante do *Python* é sua portabilidade, podendo ser executado em diversos sistemas operacionais como *Windows*, *Mac OS*, *Linux*, *Android* e entre outros (PYTHON™, 2023).

O *Python Package Index* ou PyPI é um repositório de software para a linguagem de programação *Python*, utilizado por desenvolvedores do mundo todo, para distribuir seus pacotes *Python*, por meio do Pip ou *Package Installer for Python*, é como o nome diz, um instalador de pacotes, que pode instalar pacotes que advêm do PyPI ou outros repositórios (PYTHON™, 2023).

2.7 Uso do *Python* na engenharia

O *Python* tem sido utilizado na engenharia civil, para efetuar projetos de análise de custos, capacidade de carga, análises de vigas, automação de relatórios e entre outros. As vantagens do uso desta linguagem na engenharia encontram-se nos seus benefícios de produtividade, por conta da sintaxe simplificada, bibliotecas robustas, por ser de código aberto e gratuito, possuir grande comunidade, permitir a integração e automação com os softwares que fazem parte do arsenal do engenheiro civil. Além de contar com projetos como *Numpy*, *Pandas* e *Matplotlib*, que o turbinam para execução de cálculos matriciais, álgebra linear, lidar com dados tabulares, plotar gráficos e outras atividades de análise de dados.

Na literatura, podem ser encontrados muitos exemplos de aplicações práticas de softwares em *Python*, como o trabalho de Nascimento, Padilha e Cid (2019), que desenvolveram um software educacional em *Python* para cálculo de capacidade de carga em sapatas isoladas, utilizando *Pycharm* como ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) e a biblioteca *Kivy*.

Outro exemplo é o trabalho do Santos *et al* (2022), que desenvolveu uma análise de risco dos custos de projeto de obra civil em *Python*, realizando simulações com o método de abordagem de identificação orientada ao risco e o diagrama de precedência com PERT/CPM.

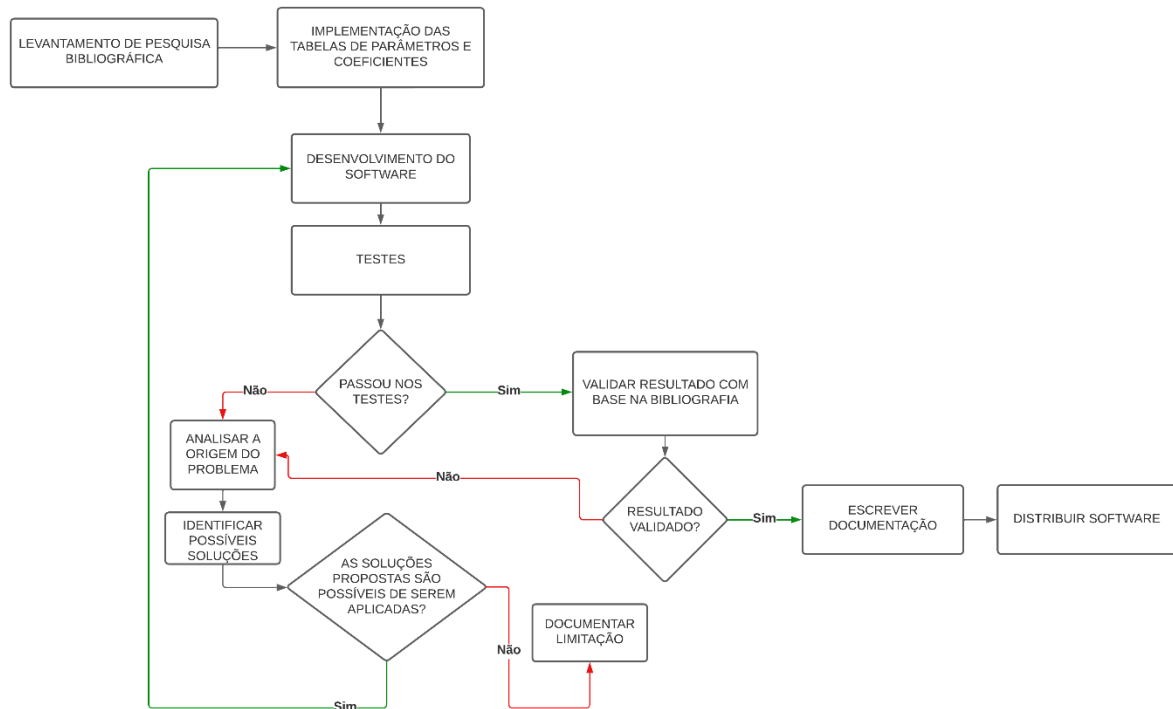
Temos ainda Oliveira (2018), que efetuou, em sua monografia, o desenvolvimento de programa em *Python* para análise de vigas pelo método das seções, a fim de gerar um relatório com dados, cálculos, diagrama de corpo livre, equações de apoio, momentos fletores e esforços cortante.

Diante dessas demonstrações, fica evidenciado que, atualmente, o engenheiro civil possui capacidade para ser o protagonista no desenvolvimento de soluções para o seu contexto, podendo utilizar linguagens de programação com grande repositório e amigáveis para resolver problemas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento deste software, seguiram-se as etapas previstas na Figura 8 abaixo, dessa forma, foram pesquisadas diversas bibliografias relacionadas à área de estruturas de fundações profundas, apresentadas no capítulo de revisão de literatura deste trabalho. Além disso, a modelagem seguirá a norma ABNT NBR 6122:2022.

Figura 8 - Fluxograma das Etapas do desenvolvimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A linguagem *Python* utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhida pela relevância crescente que vem apresentando no meio acadêmico, por ser uma linguagem de programação com comunidade ativa e de código livre. Ademais, é uma linguagem moderna, utilizada por grandes empresas como *Google*, *YouTube*, *Instagram*, etc.

Com o propósito de desenvolver um software modular que será disponibilizado como um pacote *Python* em um repositório como o *PyPI*, o programa cria soluções na forma de funções e objetos para cálculos relacionados à capacidade de carga das fundações que permite ser importadas por qualquer indivíduo interessado e utilizadas como quiser, sobre uma licença aberta.

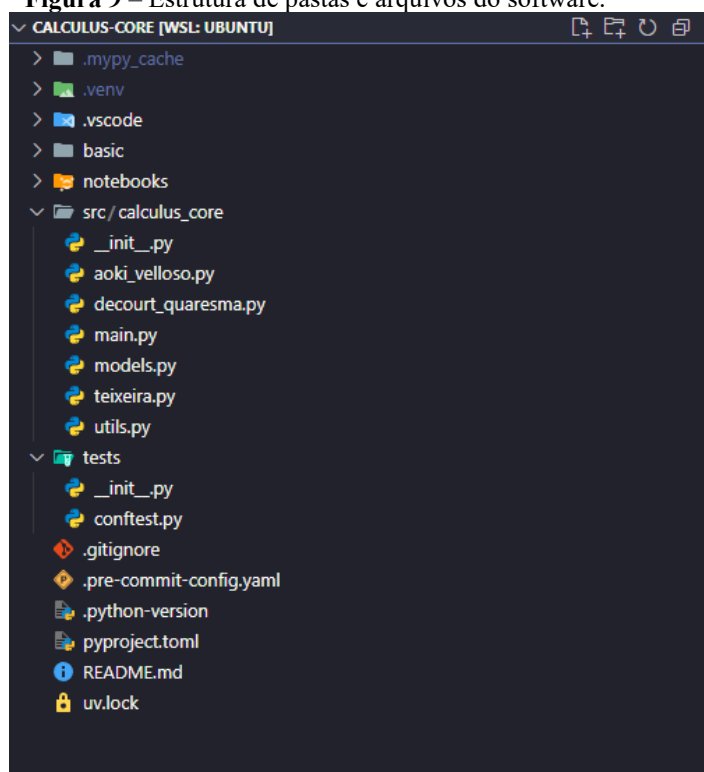
A escrita do código fonte feita através do *Visual Studio Code* (VS code), uma ferramenta desenvolvida pela Microsoft, foi escolhida por ser altamente customizável, por meio de *plug-*

ins criados pela própria empresa ou pela comunidade. Além disso, é uma ferramenta gratuita, de acesso livre.

Para o desenvolvimento, foi organizado fórmulas para cada método, tabelas e constantes utilizadas, além de considerações específicas como método de coleta do número de golpes SPT para a ponta da estaca e/ou lateral e outras especificidades.

Portanto, a seguinte estrutura foi montada para a organização do software, em *src/calculus_core* contém os códigos que efetuam o processamento, cada método ficou abrigado em um módulo como em *src/calculus_core/aoki_velloso.py* que abriga as informações e especificidades da metodologia, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Estrutura de pastas e arquivos do software.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em sequência, foi definido três estruturas de dados, sendo a primeira a do perfil de sondagem SPT, utilizando dados como nome da sondagem (ou identificador), se a sondagem é confiável e uma lista de camadas de solo; a segunda, a camada de solo que contém informações como profundidade (cota), número de golpes e o tipo de solo; e por fim, a estaca, com tipo de estaca, processo de construção, formato, seção e cota de assentamento.

Além disso, observou-se a necessidade em criar uma classe abstrata que serviria de interface para a implementação das classes que iria compor os métodos de cálculo, obrigando a implementação de métodos comuns.

Com o uso da classe abstrata, ficou definido que todas as classes que representariam os métodos de cálculo, deveriam receber os mesmos *inputs*, ou seja, a mesma denominação *objeto.calcular(perfil_spt, estaca)* para o uso ser comum e flexível.

Na implementação das classes que representam os métodos de cálculos, verificou-se semelhanças em como calcular/obter o N_p (número de golpes na camada da ponta da estaca), N_l (número de golpes nas camadas laterais), recuperar os coeficientes, por exemplo, K e α e fatores f_1 e f_2 , da abordagem de Aoki e Velloso (1975), para então poder implementar os métodos que efetuariam os cálculos como R_p , R_l parcial ou unitário e carga admissível.

Figura 10 – Módulo aoki_velloso em src/calculus_core.

```

Code Blame 375 lines (324 loc) · 11.6 KB
1  from .models import Estaca, MetodoCalculo, PerfilSPT
2  from .utils import normalizar_tipo_estaca, normalizar_tipo_solo
3
4  ✓ coeficientes_aoki_velloso_1975 = {
5      'areia': {'k_kpa': 1000, 'alpha_perc': 1.4},
6      'areia_siltosa': {'k_kpa': 800, 'alpha_perc': 2.0},
7      'areia_silto_argilosa': {'k_kpa': 700, 'alpha_perc': 2.4},
8      'areia_argilosa': {'k_kpa': 600, 'alpha_perc': 3.0},
9      'areia_argilo_siltosa': {'k_kpa': 500, 'alpha_perc': 2.8},
10     'silte': {'k_kpa': 400, 'alpha_perc': 3.0},
11     'silte_arenoso': {'k_kpa': 550, 'alpha_perc': 2.2},
12     'silte_areno_argiloso': {'k_kpa': 450, 'alpha_perc': 2.8},
13     'silte_argiloso': {'k_kpa': 230, 'alpha_perc': 3.4},
14     'silte_argilo_arenoso': {'k_kpa': 250, 'alpha_perc': 3.0},
15     'argila': {'k_kpa': 200, 'alpha_perc': 6.0},
16     'argila_arenosa': {'k_kpa': 350, 'alpha_perc': 2.4},
17     'argila_areno_siltosa': {'k_kpa': 300, 'alpha_perc': 2.8},
18     'argila_siltosa': {'k_kpa': 220, 'alpha_perc': 4.0},
19     'argila_silto_arenosa': {'k_kpa': 330, 'alpha_perc': 3.0},
20 }
21 ✓ fatores_f1_f2_aoki_velloso_1975 = {
22     'franki': {'F1': 2.50, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
23     'metálica': {'F1': 1.75, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
24     'pré_moldada': {
25         'F1': lambda D: 1 + (D / 0.8),
26         'F2': lambda f1: 2 * f1,
27     },
28     'escavada': {'F1': 3.00, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
29     'raiz': {'F1': 2.00, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
30     'hélice contínua': {'F1': 2.00, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
31     'ômega': {'F1': 2.00, 'F2': lambda f1: 2 * f1},
32 }

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 10, constata-se a implementação das tabelas de coeficientes em forma de dicionários aninhados para armazenar as informações de K e α e fatores f_1 e f_2 utilizados por Aoki e Velloso (1975) e por Laprovitera (1988).

Neste sentido, como os métodos de cálculo semiempíricos possuem revisões pelos próprios autores e demais estudiosos, as tabelas são atualizadas, sem mudar as fórmulas e especificidades do método. Assim, a classe que armazena a lógica do método recebe no momento de instância quais os coeficientes, permitindo a reutilização do corpo lógico, mas com incorporações de outros dados como na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Reutilização da classe *AokiVelloso* para construir os métodos de 1975 e revisado em 1988.

```

354
355     aoki_velloso_1975 = AokiVelloso(
356         coeficientes_aoki_velloso=coeficientes_aoki_velloso_1975,
357         fatores_f1_f2=fatores_f1_f2_aoki_velloso_1975,
358     )
359     aoki_velloso_1975_laprovitera_1988 = AokiVelloso(
360         coeficientes_aoki_velloso=coeficientes_aoki_velloso_1975_laprovitera_1988,
361         fatores_f1_f2=fatores_f1_f2_aoki_velloso_1975_laprovitera_1988,
362     )
363

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Dessa forma, a implementação do método principal denominado *calcular* efetua a orquestração dos cálculos, de modo que ocorre o tratamento dos dados de entrada, obtendo as informações necessárias e invocando as funções para realizar cada etapa do cálculo.

Portanto, os dados de entradas para o *software* calcular a capacidade de carga de estacas indiretas compatíveis com as três metodologias de cálculo apresentados na revisão, são: dados do ensaio *Standard Penetration Test* (SPT), que fornece profundidade, o número de golpes necessários para penetrar na camada de solo e as características gerais desta camada; e informações sobre a estaca como, tipo (escavada, Franki, pré-moldada etc.), processo de construção no quesito de impacto no solo, sendo de deslocamento ou escavada, formato (quadrada ou circular), seção em metros e cota de assentamento.

Após o processamento das informações fornecidas pelo usuário, será entregue o resultado (dados de saída), gerando a resistência na ponta (R_p), resistência lateral (R_l), a capacidade de carga (R_{CALC}) e a capacidade de carga admissível (R_{adm}).

Ao final do desenvolvimento do *software*, a saída do código foi validada, de modo que houve uma comparação entre o resultado obtido pelo programa e cálculos descritos na bibliografia de fundações profundas para estacas escavadas.

Além disso, dentro do programa, em *notebooks/*, contém arquivos *jupyter notebooks*, demonstrando como utilizar o *software* com base na resolução de cálculos efetuados em outros trabalhos para facilitar o aprendizado no uso do pacote.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia adotada, tornou-se viável o desenvolvimento do pacote *Python* para calcular capacidade de carga usando os métodos de cálculo de Aoki e Velloso (1975), Aoki e Velloso por Laprovitera (1988), Décourt e Quaresma (1978, 1996) e Teixeira (1996).

O método de Aoki e Velloso por Alonso (1981) foi descartado devido a sua especificidade para a utilização da tabela, uma vez que Alonso fez o estudo em regiões de São Paulo/SP, e adicionou as regiões de seu estudo como variável, modificando a configuração da tabela, sendo incompatível com as proposições anteriores.

Após o desenvolvimento da ferramenta, buscou-se trabalhos para realizar as validações dos cálculos. Com base na dissertação de Schulze (2013), defendido na UNICAMP, sobre análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos, tornou-se viável efetuar as comparações dos resultados de cálculo da capacidade de carga entre as diversas metodologias.

No campo experimental da UNICAMP, o solo estudado apresentava as seguintes características para o ensaio SPT:

Tabela 9 – Ensaio SPT utilizado para efetuar os cálculos.

Profundidade	Nº SPT	Tipo de Solo
1	3	Argila Siltosa
2	3	Argila Siltosa
3	6	Argila Siltosa
4	6	Argila Siltosa
5	6	Argila Siltosa
6	6	Argila Siltosa
7	6	Argila Siltosa
8	6	Argila Siltosa
9	20	Silte Argilo-Arenoso

Fonte: (SCHULZE, 2013).

Neste contexto, foi executada uma estaca escavada de diâmetro 0,25m e a cota de assentamento igual a -5m, por meio de trado helicoidal. Com base nessas informações, Schulze (2013) obteve os resultados do cálculo de capacidade de carga dos métodos semiempíricos, conforme apresentados na tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Resultados Schulze, resistência na ponta (R_p), resistência lateral (R_l) e carga de ruptura (R_{CALC}).

Método	R_p [kN]	R_l [kN]	R_{CALC} [kN]
Aoki e Velloso (1975)	22	24	46
Aoki e Velloso por Laprovitera (1988)	16	51	67
Décourt e Quaresma (1978, 1996)	24	56	80
Teixeira (1996)	28	42	70

Fonte: (SCHULZE, 2013).

Na figura 12 abaixo, observa-se o *jupyter notebook* utilizado para dar entrada nos dados. Em primeiro lugar, é necessário executar a importação dos módulos que estão dentro do pacote *calculus_core*, como o módulo *aoki_velloso*, *decourt_quaresma*, *teixeira* e *models*.

No módulo *aoki_velloso*, faz-se a importação dos métodos de cálculo *aoki_velloso_1975* e *aoki_velloso_1975_laprovitera_1988*. Quanto ao módulo *decourt_quaresma* ocorre a importação de *decourt_quaresma_1978_revisado*. Por sua vez, no módulo *teixeira* sucede a importação de *teixeira_1996* e em *models*, importa-se as classes *Estaca* e *PerfilSPT*. Por fim, é criado os objetos *estaca* e *perfil_spt*, contendo os dados de entrada.

Figura 12 – Primeiro bloco de código no *jupyter notebook* preparando os dados de entrada.

```

from calculus_core.aoki_velloso import (
    aoki_velloso_1975,
    aoki_velloso_1975_laprovitera_1988,
)
from calculus_core.decourt_quaresma import decourt_quaresma_1978_revisado
from calculus_core.models import Estaca, PerfilSPT
from calculus_core.teixeira import teixeira_1996

estaca = Estaca(
    tipo='escavada',
    processo_construcao='escavada',
    formato='circular',
    secao_transversal=0.25,
    cota_assentamento=5,
)

perfil_spt = PerfilSPT(nome_sondagem='Schulze_Tami', confiavel=True)

camadas = [
    (1, 3, 'argila_siltosa'),
    (2, 3, 'argila_siltosa'),
    (3, 6, 'argila_siltosa'),
    (4, 6, 'argila_siltosa'),
    (5, 6, 'argila_siltosa'),
    (6, 6, 'argila_siltosa'),
    (7, 6, 'argila_siltosa'),
    (8, 6, 'argila_siltosa'),
    (9, 20, 'silte_argilo_arenoso'),
]

perfil_spt.adicionar_medidas(camadas)

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao final, para calcular a capacidade de carga, as variáveis *estaca* e *perfil_spt* são utilizadas pelos métodos de cálculo importados anteriormente, como demonstrado na figura 13.

Figura 13 – Execução dos cálculos de capacidade de carga.

```

aoki_velloso_1975.calcular(perfil_spt=perfil_spt, estaca=estaca)
[7] ✓ 0.0s Python
... {'resistencia_ponta': 21.59844949342983,
     'resistencia_lateral': 24.190263432641405,
     'capacidade_carga': 45.788712926071234,
     'capacidade_carga_adm': 22.894356463035617}

aoki_velloso_1975_laprovitera_1988.calcular(
    perfil_spt=perfil_spt, estaca=estaca
)
[8] ✓ 0.0s Python
... {'resistencia_ponta': 16.36246173744684,
     'resistencia_lateral': 50.396382151336255,
     'capacidade_carga': 66.75884388878309,
     'capacidade_carga_adm': 33.379421944391545}

decort_quaresma_1978_revisado.calcular(perfil_spt=perfil_spt, estaca=estaca)
[9] ✓ 0.0s Python
... {'resistencia_ponta': 25.034566458293664,
     'resistencia_lateral': 67.02064327658226,
     'capacidade_carga': 92.05520973487593,
     'capacidade_carga_adm': 46.027604867437965}

teixeira_1996.calcular(perfil_spt=perfil_spt, estaca=estaca)
[10] ✓ 0.0s Python
... {'resistencia_ponta': 29.45243112740431,
     'resistencia_lateral': 65.97344572538566,
     'capacidade_carga': 95.42587685278997,
     'capacidade_carga_adm': 47.712938426394985}

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na tabela 11, os resultados do programa são organizados para facilitar a comparação com os resultados obtidos por Schulze (2013).

Tabela 11 – Resultados do programa, resistência na ponta (R_p), resistência lateral (R_l) e carga de ruptura (R_{CALC}), e carga admissível (R_{adm}).

Método	R_p [kN]	R_l [kN]	R_{CALC} [kN]	R_{adm} [kN]
Aoki e Velloso (1975)	21,6	24,19	45,79	22,89
Aoki e Velloso por Laprovitera (1988)	16.36	50.40	66.76	33.38
Décourt e Quaresma (1978, 1996)	25.03	67.02	92.06	46.03
Teixeira (1996)	29.45	65.97	95.42	47.71

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O método de Décourt e Quaresma revelou uma variação de 4,29% na resistência de ponta e uma discrepância mais significativa, de 19,67%, na resistência lateral. Dada a magnitude desta última, procedeu-se à verificação por meio de cálculo manual.

De forma análoga, o método de Teixeira exibiu uma variação de 5,17% na resistência de ponta, enquanto a resistência lateral apresentou a maior divergência, atingindo 57,07%. O valor expressivo motivou igualmente uma verificação manual.

Portanto, verifica-se diferenças nos resultados obtidos quanto a resistência lateral para os métodos de Décourt e Quaresma e Teixeira. Desse modo, com o objetivo de validar os resultados, recorreu-se à metodologia estabelecida por Décourt e Quaresma (1978, 1996) e Teixeira (1996), realizando-se o cálculo manual.

Para a obtenção da resistência lateral é de prática excluir a primeira camada de solo, onde se executa o bloco.

Neste cenário, o método de Décourt e Quaresma, apresenta o coeficiente beta igual a 0,8 como fator redutor, e obtemos o perímetro do fuste da estaca pela expressão $2 \cdot \pi \cdot 0,125$ e o comprimento da estaca igual a 4m.

Isto posto, a única variável na qual pode-se ter discrepância seria na obtenção do NI, onde deve-se considerar a média do número de golpes nas camadas ao longo do fuste da estaca, excluindo-se as utilizadas para a ponta da estaca (profundidade 5m a 7m). Neste caso, está disponível as camadas na profundidade 2m a 4m para o cálculo do NI, obtendo-se a média 5.

$$R_l = 10 \left(\frac{N}{3} + 1 \right) PL$$

$$R_l = 0,8 \times 10 \left(\frac{5}{3} + 1 \right) \times 2 \times \pi \times 0,125 \times 4 \cong 67 \text{ kN}$$

Para o método de Teixeira, observou-se situação semelhante, temos o coeficiente beta igual 4 kPa, perímetro pela expressão $2 \cdot \pi \cdot 0,125$ e o comprimento da estaca igual a 4m ao desconsiderar a primeira camada de solo.

Novamente, é nítida a discrepância na variável NI, e diferentemente do método anterior, para obter o NI, a média das camadas ao longo do fuste não desconsidera a camada da ponta, neste caso, a média do SPT é calculada observando as camadas de profundidade 2m a 5m, obtendo-se a média 5,25.

$$R_l = \beta N_l PL$$

$$R_l = 4 \times 5,25 \times 2 \times \pi \times 0,125 \times 4 \cong 66 \text{ kN}$$

Dessa forma, ambos os resultados produzidos manualmente corroboram para a consistência na lógica adicionada no pacote *Python*, desenvolvido como objetivo deste trabalho.

Figura 14 – Cálculos de capacidade de carga metro a metro.

```

from pprint import pprint

from calculus_core.aoki_velloso import aoki_velloso_1975
from calculus_core.main import calcular_capacidade_estaca
from calculus_core.models import PerfilSPT

perfil_spt = PerfilSPT()
perfil_spt.adicionar_medidas(
    [
        (1, 3, 'areia_argilosa'),
        (2, 3, 'areia_argilosa'),
        (3, 5, 'areia_argilosa'),
        (4, 6, 'argila_arenosa'),
        (5, 8, 'argila_arenosa'),
        (6, 13, 'argila_arenosa'),
        (7, 17, 'argila_arenosa'),
        (8, 25, 'argila_arenosa'),
        (9, 27, 'argila_areno_siltosa'),
        (10, 32, 'argila_areno_siltosa'),
        (11, 36, 'argila_areno_siltosa'),
    ]
)
resultado = calcular_capacidade_estaca(
    aoki_velloso_1975,
    perfil_spt,
    tipo_estaca='pré-moldada',
    processo_construcao='deslocamento',
    formato='quadrada',
    secao_transversal=0.3,
)
pprint(resultado, sort_dicts=False)

```

```

[2]
... [{"cota": 1,
      "resistencia_ponta": 117.81818181818181,
      "resistencia_lateral": 0,
      "capacidade_carga": 117.81818181818181,
      "capacidade_carga_adm": 58.90909090909091},
      {"cota": 2,
      "resistencia_ponta": 196.36363636363637,
      "resistencia_lateral": 23.563636363636363,
      "capacidade_carga": 219.92727272727274,
      "capacidade_carga_adm": 109.96363636363637},
      {"cota": 3,
      "resistencia_ponta": 137.45454545454544,
      "resistencia_lateral": 62.836363636363636,

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A funcionalidade de calcular a resistência na ponta (R_p), resistência lateral (R_l), a capacidade de carga (R_{CALC}) e a capacidade de carga admissível (R_{adm}) ao longo de todo o perfil SPT, metro a metro, está disponível no módulo *main*. Assim, para realizar esses cálculos, é preciso fornecer o método de cálculo, o perfil SPT, o tipo da estaca, o processo de construção, o formato e a seção. Além disso, a cota de assentamento é gerada dinamicamente pelo programa, que aloca à estaca em diversas camadas do solo, simplificando o processo, conforme Figura 14 acima.

Com o intuito de tornar a ferramenta acessível a um público mais amplo, incluindo estudantes e profissionais de engenharia sem familiaridade com a linguagem *Python*, foi

desenvolvida uma interface gráfica (GUI) que serve como um portal de acesso amigável ao motor de cálculo do pacote *calculus_core*. Esta aplicação simplifica a entrada dos dados do perfil de sondagem e das características da estaca, automatizando a interação com as funções de cálculo validadas na seção anterior. O resultado é a apresentação direta e organizada em *DataFrame* que se assemelha a uma tabela de *MS Excel* ou *Google Sheets*. Adicionalmente, ela plota um gráfico da profundidade pela carga admissível, oferecendo uma análise visual imediata que auxilia o projetista na escolha da cota de assentamento mais eficiente para a fundação. A Figura 15 ilustra a tela principal da aplicação com um exemplo de cálculo e o seu respectivo gráfico.

Figura 15 – Interface gráfica (GUI) – *calculus-app*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No menu lateral responsivo, apresentado na Figura 16 abaixo, efetua-se a entrada dos seleção de quais métodos de cálculo se deseja calcular, por padrão selecionado todos os métodos, após insere-se os dados da estaca, tipo de estaca, processo de construção e forma por seleção em caixa suspensa, seção por digito decimais com resolução de duas casas decimais, e o perfil de sondagem SPT na forma de um *DataFrame* editável, para preenchimento da profundidade, N_{SPT} e tipo de solo, para o tipo de solo o preenchimento é seleção em caixa suspensa das opções válidas para os métodos de cálculo.

Figura 16 – Menu Lateral – *calculus-app*.

Parâmetros de Entrada

Selecione os Métodos de Cálculo

Aoki e Veloso (1... x Aoki e Veloso (1... x

Décourt e Quare... x Teixeira (1996) x

Dados da Estaca

Tipo de Estaca

Pré-moldada

Processo de Construção

Deslocamento

Formato da Estaca

Circular

Seção Transversal (m)

0.30

Perfil de Sondagem (SPT)

Insira os dados do ensaio SPT abaixo:

Profundidade (m)	N_SPT	Tipo de Solo
1	3	Argila Arenosa
2	3	Argila Arenosa
3	5	Argila Arenosa
4	6	Argila Arenosa
5	8	Argila Arenosa
6	13	Areia Argilosa
7	17	Areia Argilosa
8	25	Areia Argilosa
9	27	Areia Silto Argilosa
10	32	Areia Silto Argilosa

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na primeira parte dos resultados, conforme Figura 17, é apresentado a tabela contendo os resultados de cálculo metro a metro, de cada método, lado a lado para comparação.

Figura 17 – Resultados dos Cálculos – *calculus-app*.

Proposta de interface para Calculus-Core

Esta aplicação permite calcular a capacidade de carga de estacas utilizando os métodos de cálculo incluído pacote *calculus-core*.

Calcular Capacidade de Carga

Cálculo concluído com sucesso!

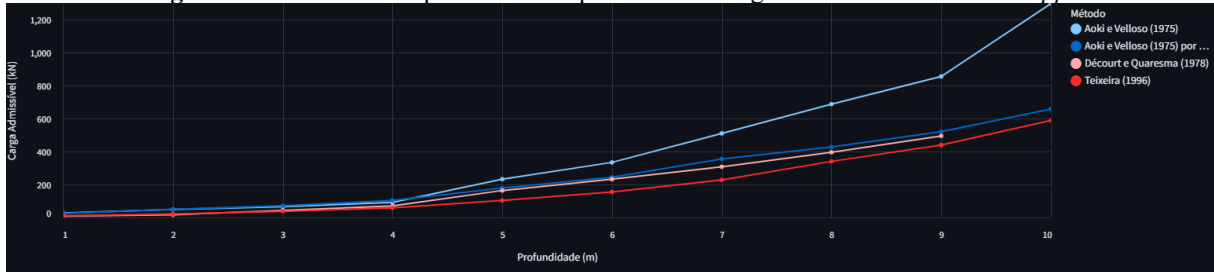
Resultados dos Cálculos

Cota (m)	Resistência de Ponta (kN)				Resistência Lateral (kN)				Capacidade de Carga (kN)		
	Aoki e Veloso (1975)	Aoki e Veloso (1975) por Laprovitera (1988)	Décourt e Quaresma (1978)	Teixeira (1996)	Aoki e Veloso (1975)	Aoki e Veloso (1975) por Laprovitera (1988)	Décourt e Quaresma (1978)	Teixeira (1996)	Aoki e Veloso (1975)	Aoki e Veloso (1975) por Laprovitera (1988)	Décourt
1	53.98	50.89	31.10	44.53	0.00	0.00	0.00	0.00	53.98	50.89	50.89
2	89.96	84.82	39.58	54.43	8.64	15.51	9.42	11.31	98.60	100.33	100.33
3	107.96	101.79	53.72	69.27	23.03	41.36	37.70	30.16	130.99	143.15	143.15
4	143.94	135.72	76.34	94.01	40.30	72.38	65.97	52.78	184.25	208.10	208.10
5	400.98	243.51	358.14	190.85	63.32	113.74	96.34	82.94	464.32	257.26	257.26
6	524.36	318.44	518.36	268.61	143.53	169.40	133.52	131.95	667.89	487.84	487.84
7	771.12	468.29	650.31	388.77	248.40	242.19	188.50	196.04	1019.52	710.48	710.48
8	971.61	505.76	791.68	585.28	402.63	349.23	256.56	200.28	1374.24	854.99	854.99

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na última parte mostrada na Figura 17, é efetuado a plotagem do gráfico de capacidade de carga admissível por profundidade segregados por método.

Figura 17 – Gráfico Comparativo da Capacidade de Carga Admissível – *calculus-app*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O código original de implantação está disponível em <https://github.com/kaioasilva-dataeng/calculus-core>, no *commit* 96211bd. O arquivo *README* possui uma descrição do projeto, guia de instalação e instruções de uso. O projeto está distribuído sob a licença MIT, cujos detalhes podem ser encontrados no arquivo *LICENSE*, a demonstração pode ser encontrando em <https://calculus-app.streamlit.app>.

Conclui-se que a automação desses cálculos, em vez de abordagens manuais, garante maior precisão e consistência nos resultados, visto que o programa padroniza o processo de análise, minimizando a ocorrência de erros e inconsistências que poderiam surgir da aplicação de diferentes interpretações em cálculos repetitivos. Conseqüentemente, a utilização do sistema otimiza o dimensionamento das estacas, fornecendo dados confiáveis para o planejamento geotécnico e elevando a segurança dos projetos na construção civil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A etapa de validação da ferramenta computacional, realizada a partir da comparação com os resultados de Schulze (2013), permitiu atestar a precisão dos algoritmos implementados. Os métodos de Aoki e Velloso demonstraram excelente compatibilidade com a referência, e as pequenas divergências foram atribuídas aos critérios de arredondamento da fonte.

Notavelmente, os métodos de Décourt-Quaresma e Teixeira apresentaram discrepâncias mais acentuadas, concentradas na parcela de resistência lateral, com variações de 19,67% e 57,07%, respectivamente. Tais diferenças, embora significativas, foram submetidas a uma verificação por meio de cálculos manuais. Esta análise confirmou que os valores gerados pelo programa estavam corretos e em total conformidade com as premissas de cada metodologia, validando assim a sua implementação.

Portanto, o objetivo fim deste trabalho, de desenvolvimento de um pacote *Python* de código livre (*Open Source*) e extensível para cálculo de capacidade de cargas por métodos semiempíricos de Aoki e Velloso, Décourt e Quaresma, e, Teixeira, foi alcançado com sucesso.

Durante a execução deste trabalho, enfrentaram-se desafios significativos, a carência de pacotes *Python* de código aberto voltados à geotecnia e engenharia civil no cenário nacional, o que foi constatado em pesquisas nos repositórios do *PyPI* e *GitHub*, o que exigiu uma estruturação pioneira do projeto. Ademais, um desafio técnico substancial foi a ‘tradução’ das nuances e especificidades de cada metodologia de cálculo para uma lógica de programação flexível e precisa. O processo demandou mais do que a simples conversão de fórmulas, foi crucial interpretar e implementar corretamente as particularidades e os critérios específicos de cada autor, como as diferentes formas de se obter as médias do N_{SPT} para a ponta e para o fuste, a fim de garantir a consistência e a precisão dos resultados.

Reconhece-se, contudo, que o trabalho possui limitações, como o foco exclusivo em métodos baseados no ensaio SPT. Portanto, metodologias baseadas em outros ensaios de campo, como o SPT-T, CPT, ou abordagens puramente teóricas não foram contempladas nesta versão. Adicionalmente, embora o cálculo de recalques seja discutido na revisão de literatura como parte fundamental da análise de fundações, sua implementação não fez parte do escopo deste projeto, sendo uma das principais sugestões para a expansão futura do pacote.

A principal contribuição deste trabalho reside no desenvolvimento de uma ferramenta computacional gratuita, de código aberto e extensível, que visa otimizar uma etapa crucial do projeto geotécnico. Para o profissional de engenharia, o pacote oferece agilidade e precisão, permitindo a comparação rápida entre diferentes métodos e minimizando erros manuais. Para

o ambiente acadêmico, a ferramenta se apresenta como um valioso recurso didático, auxiliando estudantes na compreensão e verificação de cálculos complexos. Por fim, o projeto contribui para a comunidade de software livre ao preencher uma lacuna existente e fomentar a cultura de desenvolvimento e colaboração na engenharia civil brasileira, incentivando que engenheiros sejam protagonistas na criação de soluções para seus próprios desafios.

Para elaboração de trabalhos futuros, pode-se explorar várias frentes aproveitando a modularidade do código, expandindo a quantidade de métodos semiempíricos, como também avançar em outras áreas, como a sugestão de tipo e seção de estaca, os já mencionados cálculos de recalque e o dimensionamento de armaduras, quando aplicável.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 1622: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.
- ABNT. **NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.
- ABNT. **NBR 10905: Solo – Ensaio de Palheta “in situ”**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.
- ALBIERO, José Henrique; CINTRA, José Carlos Ângelo. Tubulões e Caixões. In: HACHICH, Waldemar *et al.* **Fundações: teoria e prática**. 2. ed., São Paulo: Editora Pini LTDA, 1998.
- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.
- BERBERIAN, Dickran. **Engenharia de fundações: passo a passo**. Ed. UNB, 2017.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson.; TSUHA, Cristina de H. C.; GIACHETI, Heraldo L. **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- CHAVES, R. A. **Fundações de Torres de Linhas de Transmissão e de Telecomunicação**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2004.
- DAIGLE, Kule. **Octoverse: the state of open source and rise of AI in 2023**. In: GitHub Blog. 2023. Disponível em: <https://github.blog/2023-11-08-the-state-of-open-source-and-ai/>. Acesso em: 03 dez. 2023.
- FLEURY, Maria Tereza Leme; DA COSTA WERLANG, Sergio Ribeiro. Pesquisa aplicada: conceitos e abordagens. **Anuário de Pesquisa GVPesquisa**, 2016.
- FRIA, Bruno Lopes de; ALVES, Janainne Nunes; COSTA, Claudiane Moreira. **Uma experiência de inserção de Linguagem de Programação no Ensino Médio Integrado à Educação Profissional Técnica a partir da flexibilização curricular**. Revista Labor, Fortaleza, v. 1, n. 25, p. 242-260, jan./jun.2021.
- GITHUB. **Ebrahimraeyat: Civil Tools**. 2021. Disponível em: <https://github.com/ebrahimraeyat/civilTools>. Acesso em: 04 dez. 2023.
- LAPROVITERA, H. **Reavaliação de método semi-empírico de previsão de capacidade de carga de estacas a partir de banco de dados**. [s. l.], 1988. Disponível em: <http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/3821>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- NASCIMENTO, Antônio Sergio Alves; PADILHA, Camila Loures da Silva; CID, Mariana Moraes de Souza. Software educacional para dispositivos móveis para cálculo de capacidade

de carga em sapatas isoladas. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 17460-17471, 2019.

NBR 6122. **Projeto e execução de fundações**. 2022. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5248/nbr6122-projeto-e-execucao-de-fundacoes>. Acesso em: 22 nov. 2023.

OLIVEIRA, Webert Araújo. **Desenvolvimento de um programa em Python para análise de vigas pelo método das seções**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Caraúbas – RN, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/4d7c25c3-8bd7-4686-9c7b-d7dee7cc9860>. Acesso em: 04 dez. 2023.

OPEN SOURCE INITIATIVE. **The Open Source Definition**. 2006. Disponível em: <https://opensource.org/osd/>. Acesso em: 03 dez. 2023.

PYTHON™. **Python 2.0 License Information: History of the software**. Disponível em: <https://www.python.org/download/releases/2.0/license/#:~:text=Python%20was%20created%20in%20the,from%20CWI%20was%20Python%201.2>. Acesso em: 03 dez. 2023.

RADSCHINSKI, Armin C. Stross. **Get the Python Brochure Vol. 1 as download**. In: Python™. 2019. Disponível em: <https://brochure.getpython.info/>. Acesso em: 03 dez. 2023.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Fundações: guia prático de projeto execução e dimensionamento**. Editora Zigurate. 2008.

SANTOS, J. A. L.; CARDOSO, I. P.; SILVA, J. M. da; BRITO, A. F. Risk Analysis regarding the costs of a residential civil works project via Python. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. e20411528203, 2022.

SCHULZE, Tami. **Análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos**. Orientador: Paulo José Rocha de Albuquerque. 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **FUNDAÇÕES: Critérios de projetos | Investigações do subsolo | Fundações superficiais | Fundações Profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.