



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS - DECEN
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ARQUIMEDES RODRIGUES MOURA

TÉCNICAS MECÂNICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: EVOLUÇÃO, INOVAÇÃO E
NOVAS TECNOLOGIAS EM POLIAS, BATE-ESTACAS, ROLOS
COMPACTADORES E DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS

PAU DOS FERROS

2025

ARQUIMEDES RODRIGUES MOURA

**TÉCNICAS MECÂNICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: EVOLUÇÃO, INOVAÇÃO E
NOVAS TECNOLOGIAS EM POLIAS, BATE-ESTACAS, ROLOS
COMPACTADORES E DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Hidalyn Theodory Clemente
Mattos de Souza, Prof. Dr.

Co-orientador: José Daniel Jales Silva,
Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M929t Moura, Arquimedes Rodrigues.
técnicas mecânicas na construção civil: evolução,
inovação e novas tecnologias em polias, bate-
estacas, rolos compactadores e dimensionamento de
estacas / Arquimedes Rodrigues Moura. - 2025.
47 f. : il.

Orientador: Hidalyn Theodory Clemente Mattos
de Souza.
Coorientador: José Daniel Jales Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Inovação tecnológica. 2. Ensaios geotécnicos.
3. Sistemas de içamento. 4. Compactação dinâmica. 5.
Segurança estrutural. I. Souza, Hidalyn Theodory
Clemente Mattos de, orient. II. Silva, José
Daniel Jales, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ARQUIMEDES RODRIGUES MOURA

**TÉCNICAS MECÂNICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: EVOLUÇÃO, INOVAÇÕES E
NOVAS TECNOLOGIAS EM POLIAS, BATE-ESTACAS, ROLOS
COMPACTADORES E DIMENSIONAMENTO DE ESTACAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 01 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Hidalyn Theodory Clemente Mattos de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

José Daniel Jales Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Barbara Barbosa Tsuyuguchi, Prof^a. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador

Murilo Hudson Da Silva, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e força, agradeço por ter me sustentado durante toda essa jornada. Em cada momento de incerteza, ansiedade ou cansaço, senti Sua mão me guiando e me encorajando a seguir. Quando pensei que não conseguiria, foi Ele quem renovou minha fé, iluminou meu caminho e me deu paz para continuar. Todas as conquistas até aqui são frutos da graça Dele na minha vida.

Aos meus pais, Cacilda da Luz e Aldeni Rodrigues, minha eterna gratidão por tudo. Foram eles que, mesmo com a grande distância da nossa cidade natal, nunca mediram esforços para me apoiar, sustentar e encorajar. Sempre fizeram de tudo para que eu pudesse estudar com dignidade e seguir meus sonhos. São o meu maior exemplo de luta, fé e amor incondicional. Sei que grande parte dessa conquista também pertence a vocês.

Ao meu irmão, Marley Franco, que sempre esteve ao meu lado, desde o início dessa caminhada. Ele viu de perto minhas dificuldades, frustrações e conquistas. Sempre teve palavras certas, o abraço acolhedor e a presença amiga. Sua confiança em mim foi fundamental para que eu acreditasse que era possível chegar até aqui.

A todos os meus familiares, tios, tias, primos, avós e demais parentes que, de perto ou de longe, me acompanharam com carinho, orações e palavras de motivação, deixo minha mais sincera gratidão. Saber que tinha o apoio da minha família foi o que me deu coragem em muitos momentos difíceis. Cada gesto, cada mensagem e cada oração foram combustíveis essenciais nessa longa caminhada.

A minha namorada, Maria Eduarda, que com seu amor, carinho e paciência, soube me acalmar nos momentos de maior tensão. Ela sempre enxergou em mim um potencial que, muitas vezes, eu mesmo não conseguia ver. Estava ao meu lado antes, durante e depois de cada desafio, celebrando comigo mesmo antes das vitórias acontecerem. Sua presença foi um refúgio de afeto e incentivo constante.

Aos meus amigos da cidade onde nasci, que mesmo à distância continuaram me fortalecendo com apoio, palavras de incentivo e orações. E aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada, especialmente aqui na universidade, meu sincero obrigado por todos os momentos compartilhados, pelas trocas de aprendizado e pelas boas risadas que tornaram tudo mais leve.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hidalyn Theodory expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e dedicação ao longo desta pesquisa. Seu comprometimento acadêmico e atenção aos detalhes foram fundamentais para a construção deste trabalho. Suas observações criteriosas e sugestões valiosas elevaram o nível deste estudo e contribuíram enormemente para o meu crescimento intelectual e profissional.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Daniel, agradeço pela contribuição atenta e apoio técnico em momentos decisivos do desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento específico foi essencial para ampliar minha compreensão sobre os temas abordados.

A banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, pela leitura atenta e pelas contribuições oferecidas. A presença de cada um nesta etapa final engrandece este trabalho e representa, para mim, um reconhecimento importante da dedicação que foi investida nesta jornada.

A todos, minha gratidão eterna. Este trabalho é resultado de muitas mãos, muitas orações e muito amor.

O cientista descobre o que existe,
enquanto que o engenheiro cria o que
nunca existiu.

Theodore von Kármán

RESUMO

As inovações tecnológicas vêm desempenhando papel decisivo no aprimoramento das técnicas empregadas na construção civil, setor fundamental para o desenvolvimento urbano e estrutural das cidades. Ainda que novas tecnologias estejam em constante desenvolvimento, muitos dispositivos mecânicos consagrados permanecem essenciais na engenharia civil, sobretudo quando integrados a sistemas modernos que otimizam seu desempenho e adaptam suas funções às demandas atuais de eficiência, segurança e qualidade. Este trabalho aborda a aplicação e o aprimoramento de sistemas mecânicos na construção civil, com destaque para o sistema de içamento no Ensaio Padrão de Penetração (SPT), que utiliza a polia como elemento fundamental; os sistemas de bate-estaca; os rolos compactadores; e a consideração da flambagem em estacas de fundação. A análise demonstra que esses mecanismos, ao passarem por atualizações como a automação, o controle de energia, a mitigação de impactos ambientais e a inclusão de critérios estruturais de verificação, se tornam ainda mais eficientes e seguros. O estudo evidencia que a inovação no setor construtivo está diretamente relacionada à reinterpretação crítica e tecnológica de métodos consagrados, resultando em melhorias expressivas na produtividade, na qualidade da execução, eficiência e na durabilidade das estruturas.

Palavras-chave: inovação tecnológica; ensaios geotécnicos; sistemas de içamento; compactação dinâmica; segurança estrutural.

ABSTRACT

Technological innovations have played a decisive role in improving the techniques used in civil construction, a fundamental sector for the urban and structural development of cities. Although new technologies are constantly being developed, many established mechanical devices remain essential in civil engineering, especially when integrated into modern systems that optimize their performance and adapt their functions to current demands for efficiency, safety, and quality. This paper addresses the application and improvement of mechanical systems in civil construction, with emphasis on the hoisting system in the Standard Penetration Test (SPT), which uses the pulley as a fundamental element; pile driving systems; compactor rollers; and the consideration of buckling in foundation piles. The analysis demonstrates that these mechanisms, when undergoing updates such as automation, energy control, environmental impact mitigation, and the inclusion of structural verification criteria, become even more efficient and safe. The study shows that innovation in the construction sector is directly related to the critical and technological reinterpretation of established methods, resulting in significant improvements in productivity, execution quality, efficiency, and durability of structures.

Keywords: technological innovation. geotechnical testing. hoisting systems. dynamic compaction. structural safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Polia fixa.....	6
Figura 2 - Polia móvel.....	7
Figura 3 - Ilustração polia fixa.....	8
Figura 4 - Sistema de polias fixas e móveis	8
Figura 5 - Ilustração polia fixa.....	10
Figura 6 - Esquema de levantamento do martelo com “ <i>cathead</i> ”	11
Figura 7 – Sistema automatizado	12
Figura 8 - Crannog	14
Figura 9 - Registro do bate estaca.....	15
Figura 10 - Bate estaca hidráulico	17
Figura 11 - Fases do solo	18
Figura 12 - Disposição das partículas do solo antes e após compactação	19
Figura 13 - Rolo compactador estático	20
Figura 14 - Rolo compactador pé de carneiro estático	21
Figura 15 - Rolo compactador liso vibratório.....	22
Figura 16 - Rolo compactador pé de carneiro vibratório	23
Figura 17 - Equilíbrio estável	25
Figura 18 - Equilíbrio neutro	26
Figura 19 - Equilíbrio instável	26
Figura 20 - Coluna ideal.....	28
Figura 21 - Configuração flambada	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo técnico entre os sistemas de içamento no spt	12
Tabela 2 - Características dos rolos compactadores estáticos	21
Tabela 3 - Comparativo entre os rolos tradicionais e vibratórios	23
Tabela 4 - Tipos de condições de equilíbrio	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivo específicos.....	15
3	METODOLOGIA	16
4	ASPECTOS MECÂNICOS E ESTRUTURAIS APLICADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL	17
4.1	Polia no ensaio padrão de penetração	17
4.1.1	Histórico da polia	17
4.1.2	Descrição Qualitativa da Polia	18
4.1.3	Descrição Quantitativa da Polia	19
4.1.4	Aplicações da Polia Ensaio SPT: Da Polia Simples à Automação	21
4.2	Bate-estaca	25
4.2.1	Justificativa e Surgimento do Equipamento	25
4.2.2	Funcionamento e Aplicação do Bate-estaca.....	27
4.2.3	Comparação Histórica: Bate-estaca Tradicional e Moderno.....	28
4.3	Rolos compactadores: mecanização e inovações na compactação de solos...	30
4.3.1	Conceito e importância da compactação mecânica	30
4.3.2	Tipos de rolos compactadores e suas aplicações por tipo de solo.....	31
4.3.3	Evolução tecnológica nos rolos compactadores	33
4.4	Flambagem em estacas de fundação	36
4.4.1	Flambagem	36
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	42
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel essencial no desenvolvimento das sociedades modernas, sendo responsável por grande parte da infraestrutura urbana e das soluções habitacionais, industriais e logísticas que sustentam a vida cotidiana. Sua importância vai além do aspecto físico das obras, estendendo-se à geração de empregos, movimentação econômica e ao progresso tecnológico de um país. Trata-se de um setor dinâmico, que se reinventa continuamente por meio da incorporação de novos equipamentos, processos e materiais.

Dentro desse panorama, as técnicas mecânicas aplicadas à construção civil sempre estiveram presentes como facilitadoras do trabalho humano e como instrumentos para garantir maior eficiência, precisão e segurança nas atividades de campo. Dispositivos como polias, bate-estacas e rolos compactadores foram originalmente concebidos com base em princípios físicos simples, mas hoje operam com suporte de tecnologia de automação, instrumentação digital, motores hidráulicos que ampliam significativamente sua produtividade e confiabilidade (Queiroz, 2019; Massad, 2010).

Este trabalho tem como foco a análise crítica de algumas dessas técnicas mecânicas, com ênfase em suas inovações tecnológicas e aplicações na construção civil contemporânea. São abordados os seguintes dispositivos: a polia, que embora não represente uma inovação em si, constitui um elemento essencial no equipamento Ensaio Padrão de Penetração (SPT), servindo como base para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras ao longo do tempo; o bate-estaca, em sua transição dos sistemas manuais aos hidráulicos modernos; os rolos compactadores, representando a mecanização no preparo do solo; e o fenômeno da flambagem em estacas, cuja consideração em projetos passou a representar um marco técnico na segurança de fundações profundas.

A escolha desses tópicos fundamenta-se em sua representatividade dentro do tema proposto, permitindo uma abordagem integrada entre os conceitos de física, engenharia estrutural e geotecnia. Ao refletir sobre esses elementos, o presente estudo busca destacar como a inovação não se limita à criação de novas ferramentas,

mas também ao aprimoramento de técnicas já consolidadas, contribuindo para construções mais seguras, sustentáveis e com melhor desempenho técnico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar as técnicas mecânicas na construção civil, enfatizando as inovações e os avanços tecnológicos recentes, eficiência e inovação no processo construtivo. O estudo buscou compreender como essas técnicas têm evoluído ao longo do tempo e como as novas tecnologias podem ser incorporadas de forma eficaz para o bom funcionamento, estabilidade e projeção das estruturas.

2.2 Objetivo específico

- Investigar o uso da polia no Ensaio Padrão de Penetração (SPT) e sua evolução tecnológica até os sistemas automatizados de içamento;
- Apresentar o funcionamento do bate-estaca e suas transformações com a introdução de sistemas hidráulicos;
- Identificar os tipos de rolos compactadores e suas respectivas aplicações nos diferentes tipos de solo, avaliando os avanços no controle do processo de compactação;
- Discutir a flambagem em estacas de fundação e sua inclusão como parâmetro de segurança estrutural, a partir da perspectiva da inovação projetual.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se, em sua essência, como um estudo de natureza qualitativa, de abordagem exploratória e caráter técnico-descritivo. A metodologia adotada baseia-se, principalmente, em revisão bibliográfica, fundamentada em livros técnicos, manuais de engenharia, normas da ABNT, artigos científicos e dissertações, com o objetivo de reunir e interpretar informações sobre as técnicas mecânicas utilizadas na construção civil e seus respectivos avanços tecnológicos.

Foram selecionados quatro tópicos centrais para análise: a aplicação da polia no Ensaio Padrão de Penetração (SPT), os sistemas de bate-estaca, os diferentes rolos compactadores e seus modos de ação, e a flambagem em estacas de fundação como parâmetro de inovação projetual. Cada um desses elementos foi abordado a partir de seu histórico técnico, evolução funcional e impacto prático nas obras de engenharia civil.

A metodologia também incluiu a construção de esquemas ilustrativos, tabelas comparativas e a organização do conteúdo com linguagem acadêmica, respeitando as normas da ABNT, especialmente no que se refere à citação de autores, estrutura do texto e apresentação de figuras e tabelas.

4 ASPECTOS MECÂNICOS E ESTRUTURAIS APLICADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 Polia no ensaio padrão de penetração

4.1.1 Histórico da polia

À medida que a tecnologia progrediu ao longo do tempo, surgiram inovações no emprego das polias. Isso ocorre porque a força humana é limitada e muitas vezes insuficiente para determinadas tarefas que exigem grande esforço. As polias, então, surgiram como um avanço significativo na engenharia no domínio da elevação de materiais em diferentes níveis. Elas ajudam a facilitar a tarefa de erguer e transportar materiais – sejam eles leves ou pesados – reduzindo os esforços, independentemente do peso da carga.

Polias ou roldanas são usadas para mudar a direção da força aplicada sobre um corpo. Isso pode nos ser útil quando precisamos puxar um objeto com auxílio de corda ou cabo (força de tração). De acordo com a forma como estão conectadas, as polias podem ajudar alguém a realizar diferentes trabalhos com facilidade e menos esforço; isso torna o trabalho mais eficiente e menos exaustivo.

Embora civilizações antigas, como a egípcia, já empregassem dispositivos semelhantes à polia, não há indícios de um entendimento teórico sobre seu funcionamento. Esse marco ocorre com Arquimedes de Siracusa, que, segundo Boyer (2019), aplicou sistemas de roldanas para içar navios durante o cerco de Siracusa. Mesmo sem abordar a polia isoladamente, seu trabalho representa o início da compreensão sistemática das máquinas simples, estabelecendo fundamentos que permanecem relevantes na engenharia até hoje (Boyer, 2019).

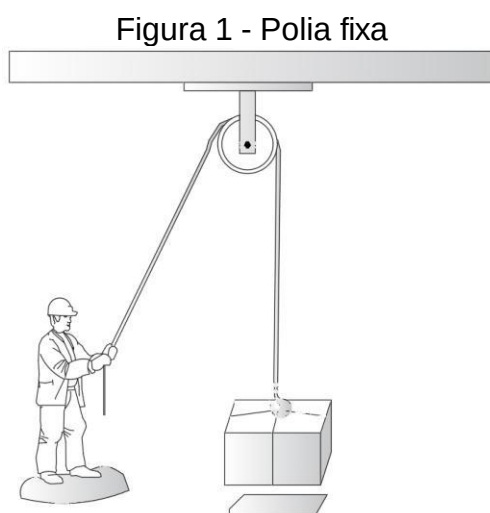
Durante o cerco romano à cidade de Siracusa, no século III a.C., Arquimedes projetou e construiu máquinas de guerra inovadoras, incluindo sistemas com cordas, polias e ganchos, utilizados para içar e destruir navios inimigos. Como destaca Boyer (2019), tais dispositivos demonstravam não apenas engenhosidade militar, mas

também aplicação direta dos princípios da física para amplificar a força humana. Esse é um dos registros mais antigos do uso das polias com uma intencionalidade mecânica clara e documentada — ou seja, para transformar o esforço aplicado em uma força útil maior, como ocorre até hoje nos sistemas de elevação modernos.

4.1.2 Descrição Qualitativa da Polia

Pode-se ter dois tipos de polias: as polias fixas e as polias móveis.

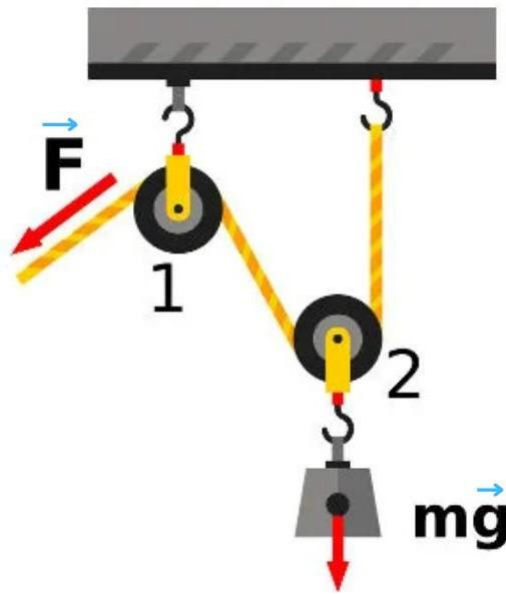
Polia fixa é aquela presa a um ponto fixo, como, por exemplo, viga ou uma estrutura estável (Figura 1). A carga não move a polia neste arranjo; em vez disso, quem exerce o movimento é a corda ou o cabo que passa pela polia. A principal característica da polia fixa é a capacidade de mudar apenas a direção da força aplicada, o que permite que os objetos sejam elevados com mais facilidade e conforto, além de ter um controle e precisão mais adequado (Silas, 2017).



Fonte: Adaptado de Silas (2017).

Polia móvel é uma polia que se move juntamente com a carga (Figura 2). Em um sistema dessa natureza, a carga é conectada à polia e uma extremidade da corda está presa a um ponto fixo. A carga e a polia se movem juntas quando se puxa a outra extremidade da corda (Silas, 2017).

Figura 2 - Polia móvel



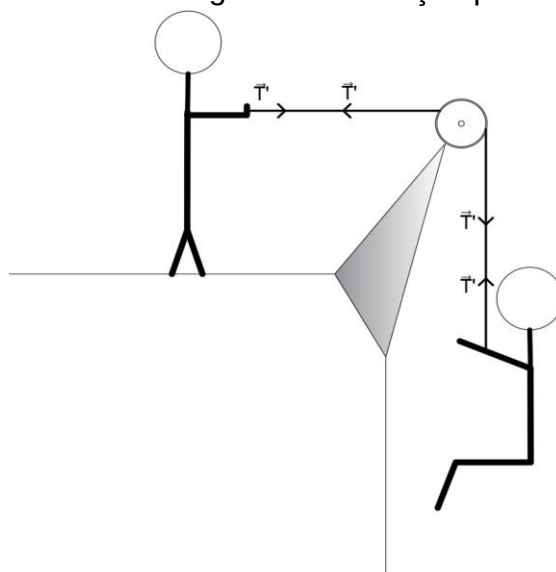
Fonte: Adaptado de Silas (2017).

4.1.3 Descrição Quantitativa da Polia

A polia móvel oferece uma grande vantagem mecânica, permitindo que a força aplicada seja metade do peso da carga. Isso é resultado da distribuição do peso da carga entre dois segmentos da corda que sustenta a carga (Silas, 2017). Por outro lado, ao adicionar mais polias móveis no sistema, exigiria mais espaço (distância e mais corda), como também iria levar mais tempo para puxar ou erguer o objeto.

De acordo com Corradi (2010), ao considerar uma situação na qual um bombeiro está puxando um alpinista utilizando uma polia fixa, a tensão $|T^{\rightarrow}|$ na corda, resultante do peso do alpinista, é igual à força $|T^{\rightarrow'}|$ exercida pelo bombeiro. Em outras palavras, $|T^{\rightarrow}| = |T^{\rightarrow'}|$.

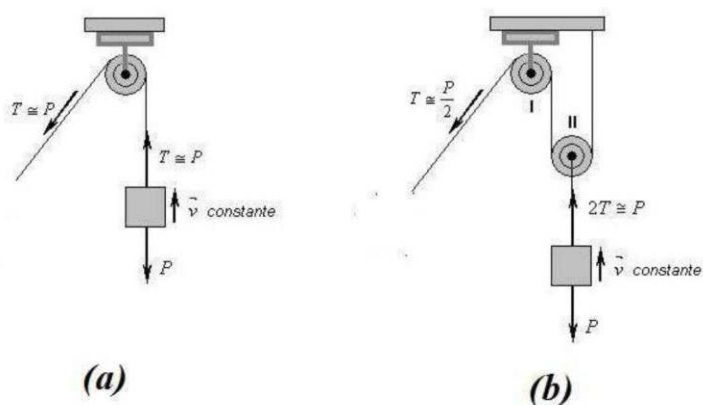
Figura 3 - Ilustração polia fixa



Fonte: Adaptado de Corradi (2010).

O uso de duas ou mais polias pode reduzir o esforço necessário para se levar um corpo. Na figura 4-a a força $|T \rightarrow|$ tem o mesmo valor de $P \rightarrow$. No caso da figura 4-b, existem duas roldanas, a polia I é fixa e II é móvel (seu eixo central pode subir e descer). Como o corpo está preso na polia II ele recebe uma força igual a $2T \rightarrow$. Para que ele suba com velocidade constante tem-se $T \rightarrow = \frac{P}{2}$, ou seja, o necessário para elevar o corpo é apenas a metade do peso dele (Corradi, 2010).

Figura 4 - Sistema de polias fixas e móveis



Fonte: Corradi (2010).

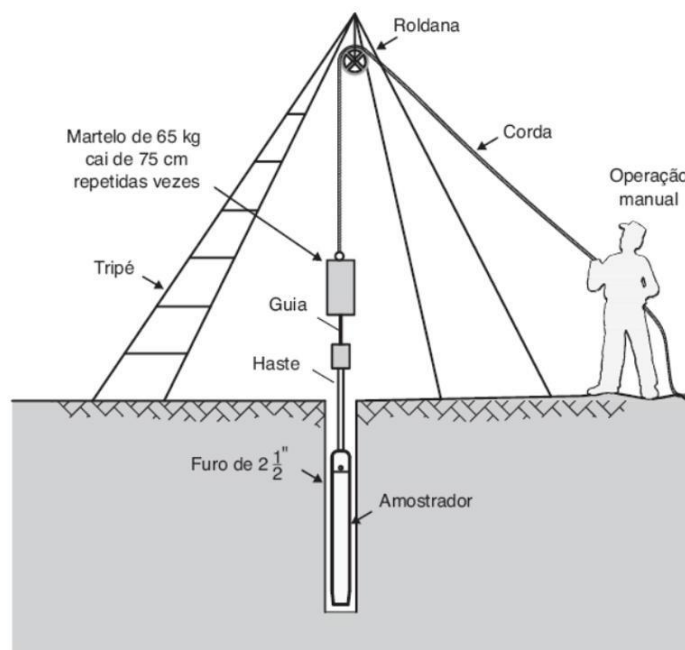
A roldana fixa apenas muda a direção da força exercida pelo bloco sobre a mão, devido à força peso do bloco. A roldana móvel divide o peso ao meio (Corradi, 2010).

4.1.4 Aplicações da Polia Ensaio SPT: Da Polia Simples à Automação

Após a explanação conceitual e histórica das polias como dispositivos mecânicos fundamentais, esta subseção dedica-se à análise de sua aplicação prática na construção civil, com foco no Ensaio Padrão de Penetração (SPT – *Standard Penetration Test*). Destaca-se também a evolução dos sistemas de içamento baseados na polia, os quais se desenvolveram desde configurações manuais simples até içamentos mecanizados.

O SPT é amplamente empregado na análise geotécnica de solos, sendo crucial para avaliar a resistência do solo à penetração dinâmica e investigação das camadas do subsolo. De acordo com Braja Das (2013) o método consiste em cravar um amostrador padrão no solo por meio da queda livre de um peso de 65kg, a uma altura de 75 centímetros, conforme a figura 5. Este procedimento possibilita calcular a compacidade ou consistência do solo em diversas camadas, bem como a capacidade de carga do solo, usada para o projeto e dimensionamento de elementos de fundação.

Figura 5 - Ilustração polia fixa



Fonte: MANTOVANI, 2022, apud ALBUQUERQUE, Paulo José R., 2020.

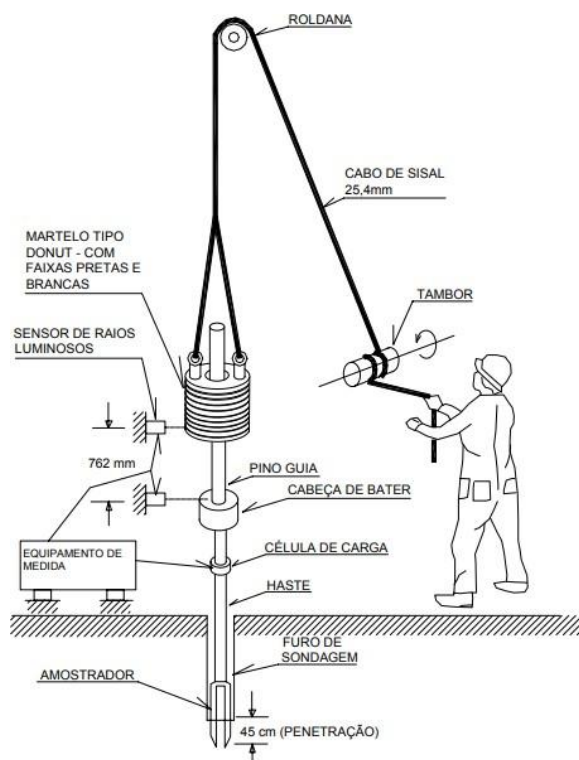
Além disso, Hvorslev (1949 apud Neto, 2013) classificou os fatores que interferem nos resultados dos ensaios em três categorias principais: o equipamento utilizado, o procedimento adotado e as condições do solo. Cada uma dessas categorias abrange diversos elementos que podem influenciar significativamente os resultados obtidos. Entre alguns fatores que podem influenciar os resultados do ensaio, podemos citar: o dispositivo para queda livre, o uso de roldana, tipo de martelo utilizado, entre outros.

Dentro dessa perspectiva, o sistema de polia se insere diretamente na primeira categoria. Com isso, um componente essencial para a realização eficaz do SPT é o sistema de polia fixa, acoplado ao topo da torre metálica do equipamento de sondagem. Esse sistema simples, utilizado desde os primeiros registros do ensaio, permite a passagem da corda de içamento do martelo, garantindo sua trajetória vertical e reduzindo perdas de energia por atrito (Neto, 2013). Trata-se de uma configuração ainda amplamente utilizada e regulamentada pela NBR 6484:2020.

Com a modernização dos processos, passou-se a empregar a polia com tambor, também conhecida como *cathead* ou *drum hoist* (Figura 6), que consiste em um tambor giratório onde a corda do martelo é enrolada. Esse sistema pode ser operado manualmente ou por meio de motor, possibilitando maior controle da altura

de queda, liberação uniforme e redução do esforço físico. De acordo com Odebrecht (2003), com base em ensaios instrumentados em campo, o sistema com tambor pode alcançar eficiências energéticas próximas de 60%, superando os valores típicos do sistema com polia fixa, que giram em torno de 45%.

Figura 6 - Esquema de levantamento do martelo com “cathead”



Fonte: Kovacs e Salomone (1982).

A inovação mais recente está na adoção de sistemas automatizados de içamento (Figura 7), compostos por motores potentes, sensores e controladores eletrônicos. Esses equipamentos permitem controle exato da altura de queda, liberação automatizada do martelo e monitoramento digital dos parâmetros do ensaio, como número de golpes, profundidade de cravação e energia transmitida. Farrar (1980), ao investigar a energia efetivamente entregue no SPT, destaca como a automação reduz a variabilidade dos resultados e eleva o nível de padronização e segurança operacional.

Figura 7 – Sistema automatizado



Fonte: CD 400 (2025).

A seguir, apresenta-se uma comparação técnica entre os sistemas de içamento utilizados no SPT:

Tabela 1 - Comparativo técnico entre os sistemas de içamento no SPT

Sistema	Modo de Operação	Esforço Físico	Controle de queda	Eficiência energética	Padronização
Polia fixa	Manual	Alto	Baixo	~45%	Médio
Polia com tambor	Manual ou mecânico	Médio	Médio	~60%	Alto
Sistema automatizado	Automatico	Nenhum	Alto	~(74,5% a 84,5%)	Muito Alto

Fonte: Estimativas com base em Odebrecht (2003) e Huang et al. (2023).

A polia, embora não represente uma inovação contemporânea, mantém-se como um elemento fundamental nas práticas da engenharia civil. Sua aplicação no (SPT) evidencia como técnicas mecânicas tradicionais ainda exercem papel crucial na eficiência e padronização dos processos construtivos. Alinhando-se aos objetivos desta pesquisa, que incluem a análise crítica das técnicas tradicionais e a exploração dos avanços tecnológicos aplicáveis à construção civil, observa-se que a verdadeira inovação não está apenas na substituição de dispositivos clássicos, mas na sua adaptação e aprimoramento contínuo. A evolução dos sistemas de içamento, do modelo com polia fixa aos mecanismos automatizados, reflete exatamente essa dinâmica de progresso: aproveitar os fundamentos já consolidados e, a partir deles,

desenvolver soluções mais eficazes, seguras e produtivas, contribuindo diretamente para a modernização da engenharia geotécnica.

4.2 Bate-estaca

A aplicação de fundações profundas tornou-se necessária em razão da impossibilidade prática de considerar os apoios das estruturas como perfeitamente rígidos. Como apontam Velloso e Lopes (2025), ao serem carregadas, todas as fundações solicitam o solo, que se deforma, produzindo recalques, deslocamentos horizontais e rotações. Essa realidade compromete a hipótese tradicional de apoios indeslocáveis e exige que o comportamento da fundação e da superestrutura seja analisado de forma conjunta.

Além disso, segundo Korman (2023), “fundações profundas são indicadas quando o solo superficial não possui a capacidade de suportar as cargas da edificação”. Conforme definição apresentada por Velloso e Lopes (2025), as fundações profundas são classificadas em três grupos principais: estacas, tubulões e caixões.

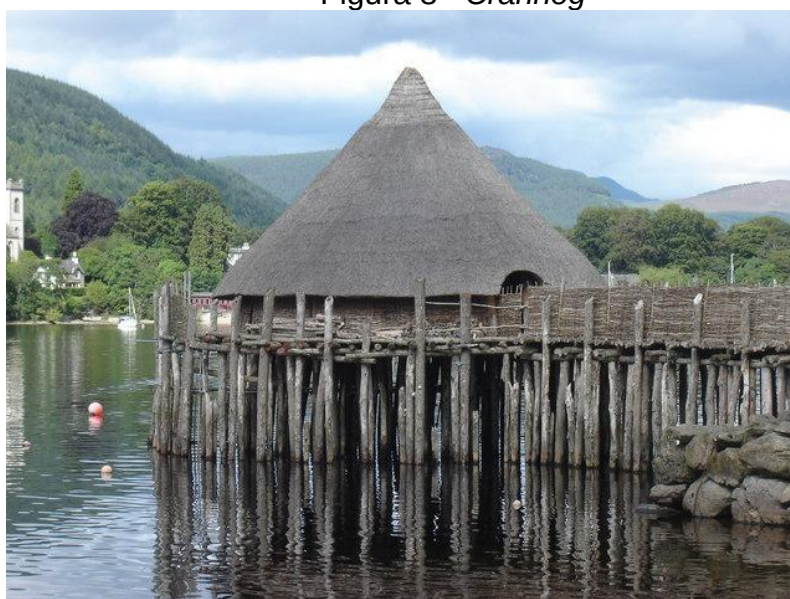
Nesses contextos, as estacas são amplamente empregadas como solução de fundação profunda, especialmente por sua capacidade de transferir os esforços estruturais para camadas mais resistentes do subsolo, por meio da resistência de ponta, de fuste ou de ambas (Velloso; Lopes, 2025). Entre os métodos mais tradicionais e difundidos para sua execução, destaca-se o sistema de cravação com o uso do bate-estaca, foco do presente tópico.

4.2.1 Justificativa e Surgimento do Equipamento

O surgimento do bate-estaca está intrinsecamente relacionado à necessidade de implantação de fundações profundas que garantissem a estabilidade das edificações em terrenos com baixa capacidade de suporte superficial. Com isso, a técnica de utilização de estacas em fundações revela raízes históricas profundas.

Evidências arqueológicas indicam que há cerca de 3720 a 2600 a.C, na região das Ilhas Britânicas, já se empregavam estacas de madeira cravadas no fundo de lagos para sustentar plataformas habitacionais conhecidas como *crannogs* (Figura 8), estruturas construídas sobre áreas alagadiças, principalmente na Escócia e na Irlanda, durante o Neolítico e a Idade do Ferro. Esses assentamentos demonstram o conhecimento empírico sobre a necessidade de apoiar edificações em bases mais firmes, mesmo em solos instáveis (Crone, 1993; Armit, 2003, Apud Garrow; Sturt, 2019).

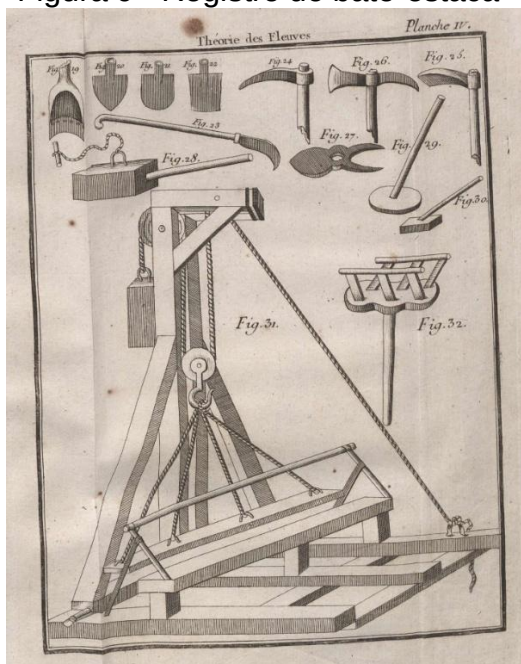
Figura 8 - *Crannog*



Fonte: Westerback (2005).

Embora não existissem, na época, equipamentos mecanizados como os bate-estacas modernos, registros arqueológicos e relatos históricos indicam que a cravação de estacas era realizada com ferramentas rudimentares — como pedras ou troncos suspensos por cordas — operados manualmente ou com tração animal. Esses métodos representam os primeiros indícios do princípio de funcionamento que mais tarde daria origem ao bate-estaca (Bowles, 1997). A figura 9 apresenta uma das primeiras ilustrações técnicas conhecidas de um bate-estacas, publicada em 1769.

Figura 9 - Registro do bate-estaca



Fonte: Silberschlag (1769).

Conforme descrito por Caputo e Caputo (2021), as estacas podem ser executadas por diversos métodos, sendo a cravação, realizada com o auxílio do bate-estaca, um dos procedimentos mais tradicionais e amplamente utilizados na engenharia de fundações.

A introdução desse equipamento possibilitou a mecanização do processo de execução de estacas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento da engenharia geotécnica, ao viabilizar a transferência das cargas estruturais para camadas mais resistentes do subsolo. Assim, o bate-estaca consolidou-se historicamente como um dos principais recursos na execução de fundações profundas, sendo objeto constante de aperfeiçoamento tecnológico (Caputo; Caputo, 2021).

4.2.2 Funcionamento e Aplicação do Bate-estaca

O bate-estaca é um equipamento destinado à cravação de estacas no solo por meio da aplicação de energia de impacto ou vibração, transferida à estaca para que esta vença a resistência oferecida pelo solo e alcance a profundidade projetada. Conforme descrevem Caputo e Caputo (2021), o princípio básico de funcionamento

do bate-estaca consiste na elevação de uma massa, denominada martelo, que é então liberada para cair livremente sobre a cabeça da estaca, transmitindo impulsos sucessivos que promovem sua penetração no solo.

Existem diversos tipos de bate-estaca, classificados de acordo com a fonte de energia utilizada para a elevação do martelo, podendo ser manual, a vapor, a diesel, hidráulico ou vibratório. O modelo mais tradicional é o de queda livre, no qual a massa é elevada, seja pelo método manual ou mecanizado, e solta sobre a estaca (Caputo; Caputo, 2021). Já os sistemas vibratórios, mais modernos, utilizam vibrações de alta frequência para reduzir a resistência do solo e facilitar a cravação, minimizando impactos e ruídos (Mapa Da Obra, 2023).

Além disso, estudos mostram que os bate-estacas manuais, especialmente em áreas urbanas, geram ruídos de alta intensidade, caracterizando um impacto ambiental relevante, sobretudo pela perturbação ao bem-estar da comunidade local (SILVA et al., 2012).

Segundo Caputo e Caputo (2021), a escolha do tipo de estaca, e, conseqüentemente, o bate-estaca, depende de diversos fatores, tais como as características do solo, a profundidade necessária e as condições ambientais.

O bate-estaca é amplamente aplicado em obras de infraestrutura, como fundações de pontes, obras de contenção, edifícios de múltiplos pavimentos, onde se exige o uso de fundações profundas (Mapa Da Obra, 2023).

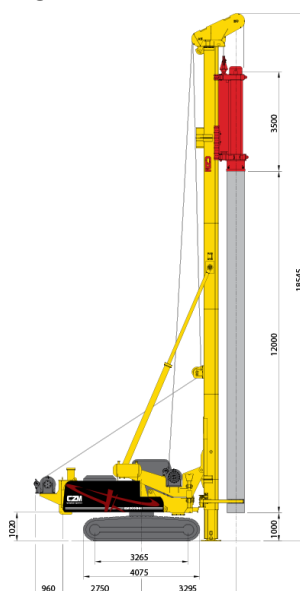
4.2.3 Comparação Histórica: Bate-estaca Tradicional e Moderno

Historicamente, o bate-estaca evoluiu de uma ferramenta rudimentar para um equipamento altamente especializado, incorporando avanços tecnológicos que proporcionaram maior eficiência, segurança e precisão na execução das fundações profundas. O bate-estaca tradicional consistia, essencialmente, em um sistema simples de elevação e queda de um peso sobre a estaca, acionado por mecanismos manuais, mecanizados ou por meio de sistemas a vapor. Este processo era caracterizado pela elevada intensidade de impactos e, conseqüentemente, pela

geração de vibrações e ruídos significativos, além de exigir longos períodos de execução (Caputo; Caputo, 2021).

Com a evolução da engenharia geotécnica e o desenvolvimento de novas tecnologias, surgiram os bate-estacas modernos, que utilizam fontes de energia mais controladas e sistemas automatizados. Dentre estes, destacam-se os equipamentos hidráulicos (Figura 10), e vibratórios, que, segundo Velloso e Lopes (2025), oferecem maior controle sobre a energia aplicada. Nesse contexto, o processo de cravação deve seguir rigorosamente as normas técnicas; por exemplo, a NBR 6122:2019, que trata do projeto e execução de fundações, exige que "o registro dos parâmetros de cravação (energia, tempo, deslocamento e profundidade) seja documentado e avaliado continuamente durante a execução" (ABNT, 2019).

Figura 10 – Bate-estaca hidráulico



Fonte: JFA (2024).

Desse modo, a trajetória evolutiva do bate-estaca ilustra de forma clara como as técnicas mecânicas impulsionam o progresso da construção civil, viabilizando soluções mais eficientes e seguras. A mecanização do processo de cravação, impulsionada por inovações tecnológicas constantes, transformou o bate-estaca em um equipamento indispensável para obras que demandam fundações profundas, evidenciando a relação direta entre desenvolvimento tecnológico e aprimoramento das práticas construtivas.

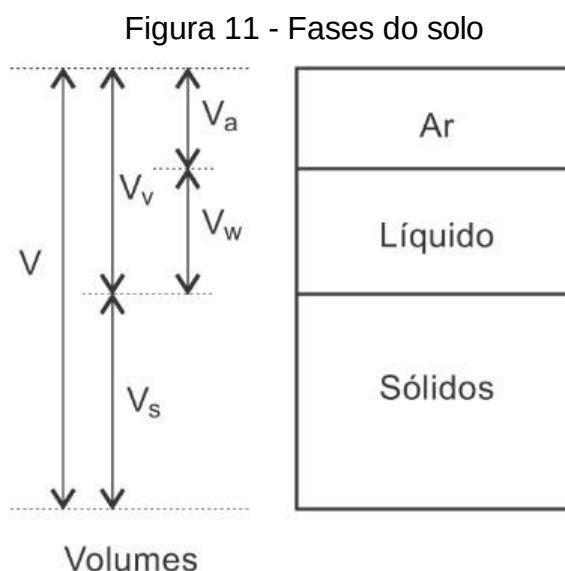
Primordialmente, esses avanços contribuíram para melhorias ergonômicas, ao minimizar a necessidade de esforço físico intenso por parte dos operadores, que

anteriormente realizavam tarefas com pesos variando entre 50 e 200 kg. Além disso, tais inovações reduziram significativamente os danos potenciais às estacas e às estruturas vizinhas, bem como mitigaram os impactos ambientais e sociais relacionados ao ruído e às vibrações, consolidando o bate-estaca como símbolo do processo contínuo de modernização na engenharia civil.

4.3 Rolos compactadores: mecanização e inovações na compactação de solos

4.3.1 Conceito e importância da compactação mecânica

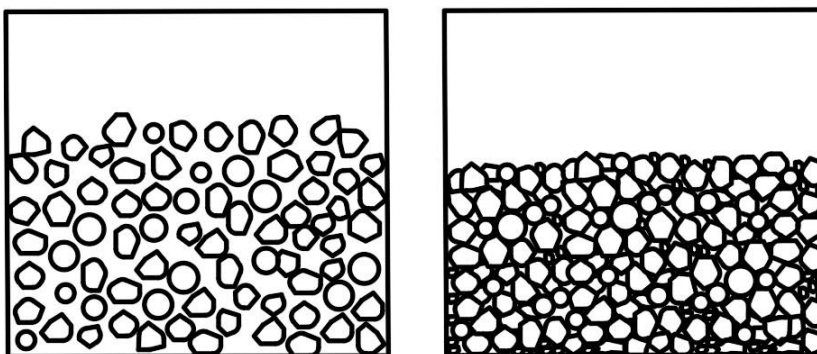
A compactação mecânica é uma etapa essencial em projetos de infraestrutura na construção civil, sendo responsável por aumentar a densidade do solo por meio da redução dos vazios, elevando, assim, sua capacidade de suporte. Conforme ilustrado na figura 11, considerando que o solo é composto por três fases — sólidos, água e ar — a redução desses vazios é fundamental, pois consiste na expulsão do ar presente nos poros do solo.



Fonte: Pinto (2025).

A figura 12 nos mostra a ilustração de um solo antes e depois da compactação.

Figura 12 - Disposição das partículas do solo antes e após compactação



Fonte: Autoria Própria (2025).

Conforme explica Massad (2010), “a compactação objetiva imprimir ao solo uma homogeneização e melhorias de suas propriedades de engenharia, tais como: aumentar a resistência ao cisalhamento, reduzir os recalques e aumentar a resistência à erosão”. Ainda segundo o autor, a compactação de camadas de solo constitui uma das fases mais determinantes da execução de obras de terra, pois atua diretamente sobre a estabilidade das estradas, aterros, fundações, barragens e plataformas industriais. A ausência ou má execução dessa etapa pode gerar recalques excessivos, rupturas ou falhas estruturais prematuras. O grau de compactação obtido influencia diretamente no desempenho final da obra e, por isso, deve ser sistematicamente controlado durante sua execução.

A execução da compactação em campo exige a aplicação de energia mecânica capaz de modificar o arranjo das partículas do solo, reduzindo seus vazios e promovendo o adensamento. Segundo Massad (2010), “os equipamentos utilizados na compactação podem ser classificados de acordo com o tipo de esforço que exercem sobre o solo: estático, dinâmico ou por impacto”. No entanto, neste tópico, será dada ênfase aos rolos compactadores, que atuam predominantemente por pressão estática (peso próprio do equipamento) e por vibração induzida (energia dinâmica).

4.3.2 Tipos de rolos compactadores e suas aplicações por tipo de solo

A compactação de solos exige equipamentos que interajam com os materiais de maneira eficiente, considerando suas características geotécnicas. Entre esses

equipamentos, os rolos compactadores se destacam por atenderem de forma específica às demandas de compactação em campo, sendo os modelos liso estático e pé de carneiro amplamente utilizados em obras de infraestrutura. Segundo Massad (2010), a escolha do equipamento de compactação deve levar em conta o tipo de solo a ser trabalhado, de modo a assegurar o desempenho adequado da estrutura compactada.

Um dos modelos mais simples e tradicionais é o rolo liso estático (Figura 13), que atua exclusivamente com seu peso próprio, transmitindo esforço de compactação por pressão vertical. Seu uso é indicado principalmente em compactação superficial, especialmente em solos com baixa coesão, como solos granulares (areias e britas), nos quais as partículas se rearranjam facilmente quando submetidas a cargas estáticas.

Figura 13 - Rolo compactador estático



Fonte: Newman Tractor (2024).

Projetado para atuar em solos coesivos, como argilas e siltes, o rolo pé de carneiro (Figura 14) é constituído por um cilindro dotado de saliências ou “pés”, que penetram no solo e geram tensões de cisalhamento. Esse mecanismo permite a desestruturação do solo e o rearranjo das partículas, melhorando a densidade e estabilidade da camada compactada. Massad (2010) indica o uso do pé de carneiro para solos coesivos (de textura fina), enfatizando sua ação de compactação de baixo para cima, o que melhora sua compactação interna.

Figura 14 - Rolo compactador pé de carneiro estático



Fonte: Newman Tractor (2024).

A tabela 2 apresenta um resumo comparativo entre os dois tipos de rolos compactadores estáticos, destacando o tipo de solo para o qual são mais adequados e o modo de atuação de cada um.

Tabela 2 - Características dos rolos compactadores estáticos

Tipo de Rolo	Tipo de Solo Aplicável	Modo de Compactação
Rolo liso estático	Granulares (areia, brita)	Pressão estática
Rolo pé de carneiro	Coesivos (argila, silte)	Pressão estática com penetração

Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.3 Evolução tecnológica nos rolos compactadores

O aprimoramento dos rolos compactadores ao longo das últimas décadas representa um avanço significativo nas práticas de engenharia de solos. A partir dos modelos tradicionais — como o rolo liso estático e o pé de carneiro — surgiram versões mais eficientes, capazes de melhorar a compactação do solo com menor número de passadas, maior controle e adaptabilidade a diferentes condições do terreno. O principal marco dessa evolução foi a introdução do sistema vibratório, que permite a transmissão de energia dinâmica ao solo durante a passagem do rolo.

Com isso, o rolo liso vibratório (Figura 15) é uma versão tecnicamente aprimorada do modelo estático, que mantém a aplicação de carga por peso próprio, mas adiciona um mecanismo de vibração induzida por eixo excêntrico. Esse sistema permite que a energia transmitida ao solo seja tanto gravitacional quanto vibratória, o que resulta em uma compactação mais profunda e uniforme. Em solos granulares, como areias e pedregulhos, prevalecem forças gravitacionais e atrito entre as partículas, e o acréscimo de vibração promove o rearranjo dessas partículas, aumentando significativamente a densidade da camada compactada. Dessa forma, a versão vibratória supera a limitação de profundidade da compactação estática e melhora o desempenho mecânico do solo.

Figura 15 - Rolo compactador liso vibratório



Fonte: Dynapac (2025).

A inovação também alcançou o rolo pé de carneiro (Figura 16), com a incorporação do sistema vibratório ao seu mecanismo tradicional. Além das saliências que promovem penetração e cisalhamento, a vibração adicional intensifica o distúrbio da estrutura do solo, favorecendo a compactação de camadas mais espessas e menos homogêneas. Isso torna o rolo pé de carneiro vibratório uma alternativa ideal para compactação de solos mistos, onde há simultaneamente camadas coesivas e granulares. Nessas situações, esse equipamento contribui para uniformizar o grau de compactação em toda a seção da camada, dispensando a alternância entre diferentes tipos de rolos e proporcionando maior produtividade com qualidade controlada.

Figura 16 - Rolo compactador pé de carneiro vibratório



Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre os principais modelos de rolos compactadores tradicionais e suas respectivas versões vibratórias, destacando os tipos de solo aos quais são mais adequados, o modo de ação predominante e os ganhos em eficiência proporcionados pelas inovações tecnológicas incorporadas a cada equipamento.

Tabela 3 - Comparativo entre os rolos tradicionais e vibratórios

Tipo de Rolo	Tipo de Solo Aplicável	Modo de Ação	Eficiência/Inovação
Rolo liso estático	Granulares	Pressão estática	Compactação superficial e limitada em profundidade
Rolo liso vibratório	Granulares	Pressão + vibração	Compactação profunda e aumento de densidade
Rolo pé de carneiro estático	Coesivos	Penetração	Ação progressiva sobre camadas de solo fino
Rolo pé de carneiro vibratório	Solos mistos (coesivos e granulares)	Vibração + penetração	Promove a compactação de solos heterogêneos

Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa forma, os rolos compactadores representam não apenas uma aplicação consolidada da mecanização na construção civil, mas também um campo em

constante inovação. A evolução dos modelos tradicionais para versões vibratórias evidencia o esforço contínuo em aprimorar a eficiência, a padronização e a qualidade da compactação de solos. A escolha adequada do equipamento, alinhada às características geotécnicas do solo e às exigências da obra, é fator decisivo para a estabilidade e o desempenho das estruturas construídas.

4.4 Flambagem em estacas de fundação

4.4.1 Flambagem

É fundamental que um componente estrutural atenda a requisitos específicos de resistência, deflexão e estabilidade ao ser projetado. Alguns componentes estruturais podem sofrer uma deflexão ou uma oscilação lateral significativa quando submetidos a cargas de compressão, especialmente se forem longos e esbeltos, como é o caso das estacas de fundações profundas.

De acordo com IS 456 (2000), uma coluna é um elemento de compressão cujo comprimento efetivo é superior a três vezes sua menor dimensão lateral. O termo "menor dimensão lateral" refere-se ao menor lado da seção transversal da coluna.

Esses elementos são submetidas a uma força de compressão axial, o que pode causar um fenômeno chamado flambagem. A flambagem é um tipo de deflexão lateral que pode causar uma falha súbita e fatal do mecanismo ou da estrutura. Portanto, para garantir a integridade da estrutura, os elementos devem ser projetadas com muito cuidado para que possam suportar as cargas aplicadas sem sofrer a deflexão.

A carga crítica, que também pode ser chamada de carga crítica de Euler ou de flambagem, é a carga axial máxima que uma coluna pode suportar antes de entrar em um estado de instabilidade e sofrer flambagem. Quando a coluna aumentar acima dessa carga, ela romperá e causará uma deflexão lateral significativa.

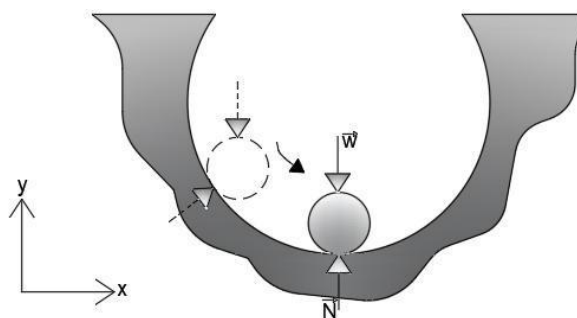
- Estabilidade das estruturas

É amplamente reconhecido no campo da Engenharia Civil que todos os problemas envolvem questões de equilíbrio. Portanto, é fundamental compreender os diferentes tipos de equilíbrio e as formas de estabilidade associadas.

De acordo com Kassimali (2011), uma estrutura é considerada internamente estável, ou rígida, se mantiver sua forma e permanece um corpo rígido quando separado dos suportes. Por outro lado, uma estrutura é denominada internamente instável (ou não rígida) se não consegue manter sua forma e pode sofrer grandes deslocamentos sob pequenas perturbações quando não é apoiado externamente.

A análise do equilíbrio de uma esfera sobre três diferentes superfícies pode ilustrar perfeitamente esse conceito. As figuras 17, 18 e 19 apresentam três situações distintas em que uma esfera está em equilíbrio, ou seja, $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ e $\sum M = 0$.

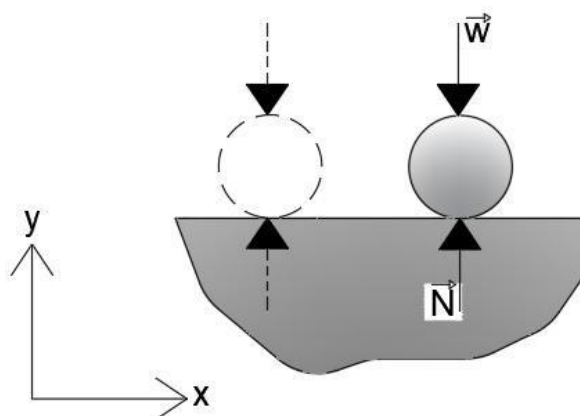
Figura 17 - Equilíbrio estável



Fonte: Adaptado De Lima (2003).

A esfera está em equilíbrio estável na figura 17. Ao ser liberada nesta configuração, a esfera sempre retornará à posição de equilíbrio no fundo do "vale", independentemente do deslocamento causado.

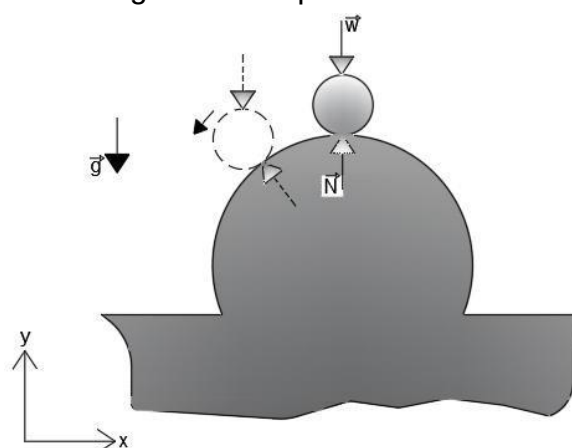
Figura 18 - Equilíbrio neutro



Fonte: Adaptado De Lima (2003).

Já na figura 18, a esfera encontra-se em cima de uma superfície completamente plana, ocasionando um equilíbrio neutro. Nesse cenário, caso a esfera seja levemente movida em qualquer direção, ela não mostrará inclinação para voltar à sua posição inicial nem para deslocar-se além disso. Após o movimento, a esfera estará uma vez mais em equilíbrio, porém em uma localização nova e distinta da inicial.

Figura 19 - Equilíbrio instável



Fonte: Adaptado De Lima (2003).

Por fim, na figura 19, a esfera encontra-se em equilíbrio instável. Apesar de estar em uma posição de equilíbrio, qualquer deslocamento o fará se afastar cada vez mais da sua posição original. Ao aplicar uma pequena perturbação, a distância da esfera em relação à posição original aumenta continuamente neste tipo de equilíbrio.

Correlacionando a carga crítica incrementada e suportada com os tipos de equilíbrios, tem-se:

Tabela 4 – Tipos de condições de equilíbrio

Estável	Neutro	Instável
$P < P_{cr}$	$P = P_{cr}$	$P > P_{cr}$

Fonte: Adaptado De Lima (2003).

Onde P_{cr} representa a carga crítica suportada pela coluna até o rompimento por flambagem, e P representa a carga aplicada à coluna.

4.4.2 A flambagem em estacas: inovação no projeto de fundações profundas

A flambagem, fenômeno estrutural associado à instabilidade de elementos esbeltos submetidos à compressão axial, passou a desempenhar um papel relevante nos projetos de fundações profundas. Seu estudo e consideração constituem um avanço tecnológico no campo da engenharia geotécnica, à medida que contribuem para o aprimoramento da segurança, da precisão do dimensionamento e da eficiência das soluções executivas em solos de baixa rigidez lateral.

Historicamente, a verificação da flambagem em estacas enterradas foi negligenciada nos projetos convencionais. Segundo Velloso e Lopes (2010), “salvo nos casos de estacas com trecho desenterrado, como em fundações de pontes e obras marítimas, não se fazia qualquer verificação da segurança à flambagem das estacas, mesmo em terrenos com espessa camada de argila mole” (p. 488). Essa omissão técnica esteve associada à suposição de que o confinamento do solo seria suficiente para impedir a instabilidade, o que se revelou equivocado em diversas condições práticas, especialmente em solos moles, compressíveis e com baixo módulo de reação lateral.

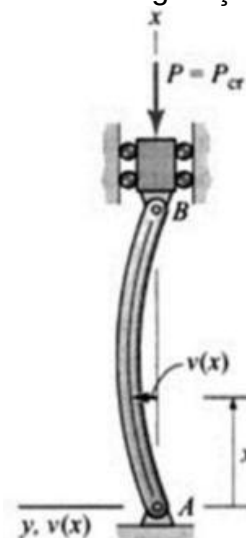
Nas figuras 20 e 21, podemos observar os dois primeiros tipos de equilíbrio, onde o elemento estrutural se encontra estável, e posteriormente na iminência da sua ruptura.

Figura 20 - Coluna ideal



Fonte: Lima (2003).

Figura 21 - Configuração flambada



Fonte: Lima (2003).

Com o avanço das pesquisas e da instrumentação geotécnica, evidenciou-se que estacas esbeltas, cravadas em solos com baixo confinamento lateral, podem apresentar instabilidade por flambagem, mesmo quando inteiramente embutidas no terreno. Esse comportamento passou a ser reconhecido como crítico, especialmente com o aumento da utilização de estacas com seções transversais reduzidas, como perfis metálicos ou estacas raiz.

De maneira complementar, Milititsky et al. (2004) relatam que, durante décadas, foi comum o uso de estacas tubulares ou metálicas em solos argilosos

profundos sem qualquer verificação de flambagem, o que levou a colapsos inesperados em campo. Segundo o autor:

“Utilização de cargas de trabalho nominais sem verificação de flambagem de estacas muito esbeltas em solos moles, caso dos trilhos e perfis simples, estacas constituídas de tubos ou estacas raiz. Nessas condições pode ocorrer o fenômeno de instabilidade por flambagem, usualmente não considerado em peças totalmente enterradas” (Milititsky et al., 2004, p. 40).

A partir da década de 1990, e com reforço na NBR 6122:2010, a verificação da flambagem passou a ser explicitamente exigida, especialmente quando a estaca ultrapassa o nível do terreno ou atravessa camadas espessas de solos moles. A norma define que as estacas devem ser verificadas quanto à estabilidade global (ABNT, 2010), o que inclui, entre outros mecanismos, a flambagem por falta de suporte lateral do solo.

A consideração desse efeito nas análises permite maior refinamento no projeto, possibilitando:

- A verificação da carga crítica de flambagem por meio de modelos de fundações flexíveis;
- A otimização do comprimento efetivo das estacas;
- A adoção de seções transversais mais rígidas.

Dessa forma, a consideração da flambagem em projetos de estacas deixou de ser uma hipótese conservadora e passou a representar um avanço concreto nos critérios de segurança estrutural e geotécnica, promovendo soluções mais confiáveis para fundações profundas em solos de baixa capacidade lateral.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O presente trabalho buscou analisar técnicas mecânicas aplicadas à construção civil, destacando seus processos de inovação e os avanços tecnológicos incorporados a equipamentos tradicionais, bem como a inclusão de fenômenos projetuais antes desconsiderados, como a flambagem em estacas. A abordagem evidenciou que os aprimoramentos não se limitam à substituição de equipamentos, mas incluem a modernização de sistemas operacionais, eficiência, ganhos em ergonomia, desempenho estrutural, segurança e sustentabilidade.

A análise da polia no Ensaio Padrão de Penetração (SPT) demonstrou que, embora não represente uma inovação recente, é um dispositivo essencial que permitiu o surgimento de avanços como os sistemas de tambor e os automatizados, os quais melhoram a eficiência da energia transmitida e padronizam o ensaio. O estudo do bate-estaca evidenciou transformações significativas, não apenas nos aspectos técnicos com a adoção de sistemas hidráulicos, mas também em fatores como a redução de danos às estacas, a mitigação de impactos ambientais (ruídos) e o ganho ergonômico nas operações.

No caso dos rolos compactadores, os avanços tecnológicos permitiram a transição de versões estáticas tradicionais para os modelos vibratórios, que proporcionam maior eficiência operacional, melhor uniformidade na compactação das camadas de solo e maior controle sobre os resultados obtidos em campo. Esses aperfeiçoamentos contribuíram significativamente para elevar o nível de desempenho da compactação, refletindo diretamente na produtividade e na durabilidade das estruturas construídas.

Já o estudo da flambagem em estacas de fundação destacou uma mudança conceitual relevante nos projetos geotécnicos: a transição do desconsiderar para o incorporar esse fenômeno como critério de verificação estrutural, sobretudo em solos moles, promovendo maior confiabilidade no dimensionamento.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos de caso reais, que permitam comparar o desempenho de métodos tradicionais e modernos na prática, evidenciando ganhos em produtividade, segurança e eficiência. Além disso, destaca-se o potencial de ampliar o escopo das inovações técnicas

analisadas para outras áreas da engenharia civil, como os sistemas elétricos, hidrossaniários e de materiais construtivos, os quais também vêm sendo significativamente transformados por avanços tecnológicos. Complementarmente, tendo em vista a discussão sobre flambagem em estacas, recomenda-se abordar, em estudos futuros, a evolução dos projetos estruturais, desde os métodos manuais de verificação até os modelos computacionais modernos, que permitem maior precisão e confiabilidade no dimensionamento. Essa abordagem integrada pode contribuir para uma visão mais abrangente e atualizada das tendências na construção civil contemporânea.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6484**: Sondagem de simples reconhecimento. Rio de Janeiro, 2020.

BOYER, Carl B. **História da matemática**. São Paulo: Editora Blucher, 2012. *E-book*. p.100. ISBN 9788521216117. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521216117/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. Cap. 17.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos solos**: obras de terra e fundações. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. *E-book*. p.capa. ISBN 9788521638018. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638018/>. Acesso em: 04 mai. 2025.

CD 400. Disponível em: <<https://diamonddrillmaquinas.com.br/produto/22/cd-400>>. Acesso em: 23 jul. 2025.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas**: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CORRADI, W. et al. **Fundamentos de física i**. Disponível em https://lilith.fisica.ufmg.br/~wag/transf/TEACHING/FUNDAMENTOS_FISICA_I_JULHO2010_WCORRADI.pdf. Acesso em: 19 jun. 2024

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 4. ed. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2019. *E-book*. p.633. ISBN 9788522128280. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522128280/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

DYNAPAC. **CA250**. Disponível em: <https://dynapac.com/br-pt/products/compaction/ca250?q=ca250&search=ca250>>.

FARRAR, D. M. Energy delivered in SPT equipment. College Park: University of Maryland, 1980.

GARROW, D.; STURT, F. Neolithic crannogs: rethinking settlement, monumentality and deposition in the Outer Hebrides and beyond. **Antiquity**, v. 93, n. 369, p. 664–684, jun. 2019.

JFA. **EM5000HH - CZM Brasil**. Disponível em: <<https://czm.com.br/em5000hh/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HUANG, Y.; XIE, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, H.; HUANG, Z. **Energy Measurement in Standard Penetration Tests**. Sustainability, v. 15, n. 6, p. 4763, 2023.

Kassimali, aslam. “3.4 Determinação Estática, Indeterminação, e Instabilidade”. *Análise estrutural, a pressão exercida na parede segue uma distribuição vertical uniforme*, 2011.

KORMAN, Alessandro. **Fundações rasas e profundas**: escolha exige estudo geotécnico detalhado para garantir segurança e durabilidade da obra. Cimento Itambé, 2023. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/fundacoes-rasas-e-profundas-escolha-exige-estudo-geotecnico-detalhado-para-garantir-seguranca-e-durabilidade-da-obra/>.

KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A. (1982) **SPT hammer energy measurements**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, V. 108, n. GT4

LIMA, Luciano. *Resistência dos materiais*. Rio de Janeiro: UERJ, 2003. Disponível em: http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/cap1_1.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

MAPA DA OBRA. O que é bate-estaca e como ele é utilizado na construção civil. 2023. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/o-que-e-bate-estaca-e-como-ele-e-utilizado-na-construcao-civil/>. Acesso em: 22 maio 2025.

MASSAD, Faíçal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. p.47. ISBN 9788579751028. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751028/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

MILITITSKY, J. et al. **Patologia das fundações: desafios para melhoria da prática de projeto e execução**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

O. NETO. M.D. Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT, Projeto de Graduação ao curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007641.pdf>.

ODEBRECHT, E. G. **Avaliação da eficiência de sistemas de aplicação de energia no SPT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

PINTO, Carlos de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. p.17. ISBN 9788579751165. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751165/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

POWERFUL PULLEYS - lesson. Disponível em: https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_simple_lesson05>. Acesso em: 19 jun. 2024.

QUEIROZ, R. C. **Introdução à engenharia civil: História, principais áreas e atribuições da profissão.** [s.l.] Editora Blucher, 2019.

SILAS, DA S. **Polias.** Disponível em:
<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/polias.htm#>.

SPT EQUIPAMENTOS DE SONDAGEM. Disponível em:
<https://sptequipamentosdesondagem.com.br/loja/pagina-exemplo/>. Acesso em: 14 maio 2025.

SILBERSCHLAG, J. E. **Abhandlung vom Wasserbau an Strömen.** fre. Disponível em: https://preserver.beic.it/delivery/DeliveryManagerServlet?dps_pid=IE6748440. Acesso em: 20 jul. 2025.

SILVA, L. C.; SOUZA, P. A.; MENEZES, F. R. **Avaliação dos efeitos do ruído gerado por equipamentos de construção civil em áreas urbanas: o caso de bate-estacas.** Revista Engenharia e Meio Ambiente.

MANTOVANI, F. **Cena A O sr. K.** Disponível em:
<https://www.linkedin.com/pulse/investiga%C3%A7%C3%A3o-geot%C3%A9cnica-o-exame-do-subsolo-felipe-mantovani/>. Acesso em: 6 jul. 2025.

VELLOSO, Dirceu de A.; LOPES, Francisco de R. **Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas.** Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. p.162. ISBN 9788579752094. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752094/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

WESTERBACK, C. **Crannog.** Disponível em:
<https://www.geograph.org.uk/photo/35551>. Acesso em: 02 jul. 2025.