



**CREA**  
Conselho Regional de  
Engenharia e Agronomia



## EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT NA DETERMINAÇÃO DO ATRITO NEGATIVO EM SOLOS DE ALTA COMPRESSIBILIDADE

KÜHL, Giulia T.<sup>1</sup>

OLIVEIRA, Lucas M.D.S.<sup>2</sup>

SIMÕES, Ricardo<sup>3</sup>

Universidade São Francisco

[giuliakuhl00@gmail.com](mailto:giuliakuhl00@gmail.com)

[mateus@bretengenharia.com.br](mailto:mateus@bretengenharia.com.br)

<sup>1</sup>Giulia Tinti Kühl, Aluna do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP;

<sup>2</sup>Lucas Mateus da Silva Oliveira, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP;

<sup>3</sup>Orientador Professor Mestre Ricardo Simões, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP.

**Resumo.** Este artigo aborda o fenômeno do atrito negativo em fundações profundas, um desafio frequente em solos compressíveis que impacta a estabilidade e a segurança estrutural. O atrito negativo ocorre quando o solo ao redor da fundação se desloca verticalmente, gerando forças descendentes adicionais nas estacas, o que pode comprometer a durabilidade da estrutura. O estudo explora métodos para estimar o atrito negativo, com ênfase no uso do ensaio de penetração padrão (SPT), uma alternativa que reduz a necessidade de ensaios específicos e auxilia na otimização de custos e prazos.

Foram comparados três métodos principais de cálculo: o modelo de De Beer-Wallays, o método de Bowles e o método teórico de Alonso. Observou-se que o método de Bowles, com técnicas mitigadoras, gera menores estimativas de atrito negativo, enquanto o método convencional apresenta valores mais conservadores, sendo recomendado para solos de alta compressibilidade.

Os resultados destacam que, embora o SPT seja uma ferramenta eficaz para caracterização preliminar do solo, a escolha do método deve considerar as condições geotécnicas específicas de cada projeto. O estudo conclui que métodos de cálculo que dispensam dados geotécnicos detalhados, embora úteis, podem beneficiar-se de uma validação prática mais robusta, especialmente em solos moles. Recomenda-se, assim, a continuidade de pesquisas com técnicas instrumentadas para aprimorar a precisão das estimativas de atrito negativo, contribuindo para a segurança e sustentabilidade em projetos de fundações profundas.

**Palavras-chave:** camada compreensível, solos moles, De Beer-Wallays, Bowles.

### Introdução

A variabilidade intrínseca dos solos naturais, em contraste com os materiais convencionais de construção, impõe desafios únicos à engenharia civil. Essa complexidade exige abordagens criteriosas e conhecimento especializado para garantir soluções eficazes e seguras em projetos de fundações. Solos compressíveis, como argilas moles, destacam-se por



**CREA**  
Conselho Regional de  
Engenharia e Agronomia



sua propensão a recalques significativos e outras condições adversas, o que pode comprometer diretamente o desempenho das fundações. Nesse contexto, a engenharia geotécnica é fundamental para superar tais desafios, desenvolvendo soluções técnicas adaptadas às particularidades de cada solo e projeto. O atrito negativo, um dos fatores mais impactantes na capacidade de carga e estabilidade de fundações profundas, resulta do recalque excessivo do solo em torno das estacas, invertendo as tensões no fuste e reduzindo a capacidade de suporte. Fatores como o adensamento de camadas compressíveis, a instalação em solos de baixa resistência ou o rebaixamento do lençol freático intensificam esse problema, exigindo métodos confiáveis para dimensionamento e avaliação criteriosa.

Este trabalho estima o atrito negativo e avalia seu impacto na capacidade de carga de estacas em solos compressíveis, com ênfase na avaliação comparativa de três métodos amplamente discutidos na literatura: De Beer-Wallays, Bowles e o método teórico de Alonso. O objetivo central é analisar a precisão desses conceitos na estimativa do ponto neutro e na quantificação da redução de capacidade causada pelo atrito negativo, propondo diretrizes práticas para o dimensionamento de fundações mais seguras e eficientes.

A relevância prática e técnica deste tema torna-se indiscutível ao observar que erros em projetos envolvendo solos moles podem ocasionar graves instabilidades, comprometendo edificações e infraestrutura adjacentes. Ao abordar solos compressíveis típicos, busca-se oferecer métodos técnicos essenciais à prática de engenharia civil e geotécnica em regiões com condições semelhantes.

Por meio de uma abordagem que integra revisão de literatura e validação com base em normas técnicas, como a NBR 6122, este trabalho busca não apenas compreender as limitações e vantagens dos métodos estudados, mas também fomentar avanços no entendimento do atrito negativo e suas implicações nos projetos de fundações. A metodologia aplicada baseia-se na análise de um estudo de caso envolvendo estacas mistas (metálica e concreto) em Recife e modelagens geotécnicas por meio de planilhas e ensaios.

Em 1923, Karl von Terzaghi revolucionou o estudo dos solos ao introduzir o princípio das tensões efetivas. Em camadas saturadas, onde os vazios estão preenchidos por água, as forças internas podem ser divididas em pressão neutra (ou poropressão), que age sobre a água, e pressões efetivas, que atuam diretamente nos sólidos da matriz terrosa. Essas forças são obtidas subtraindo a poropressão da pressão total. Assim, o aumento da carga total, sem alteração na pressão da água, eleva a força efetiva, alterando o volume do solo (TAVARES; TABOZA; PIRES, 2022).

O fenômeno do atrito negativo ocorre quando o recalque do solo adjacente supera o recalque dos elementos de fundação, o que pode ocorrer em casos de adensamento do solo devido a fatores como sobrecargas superficiais ou rebaixamento do lençol freático. Essa condição exige atenção especial no dimensionamento das fundações, pois o atrito lateral negativo gera esforços que precisam ser considerados para garantir a segurança estrutural. Além disso, há recomendações para a adoção de medidas mitigadoras, como o uso de revestimentos específicos nas fundações e a execução de provas de carga, a fim de avaliar a magnitude da força descendente envolvida (ABNT, 2022).

A NBR 6122:2019, revisada após quase uma década, introduziu mudanças significativas das cargas de afundamento da fundação, que se refere ao atrito lateral quando o recalque do solo supera o das estacas ou tubulões. Este fenômeno, comum em camadas moles

deve ser cuidadosamente avaliado no dimensionamento geotécnico e estrutural. A norma atual destaca a importância de atenuar os impactos sobre as fundações, recomendando métodos como pintura betuminosa e provas de carga, porém, ainda deixa lacunas na definição de critérios específicos, especialmente em relação ao adensamento secundário e características técnicas dos materiais. Essas indefinições podem impactar a eficácia das soluções adotadas em projetos práticos. Além disso, o ponto neutro, onde a orientação vetorial inverte-se de negativa para positiva, e a necessidade de considerar cargas variáveis no dimensionamento reforçam a complexidade de projetar fundações sob tais condições. A norma, portanto, representa um avanço ao consolidar práticas anteriores, mas também levanta novas questões que deverão ser abordadas em futuras revisões, garantindo que os engenheiros possam lidar com os desafios impostos pelos obstáculos trazidos pelo atrito lateral descendente de maneira mais eficaz e segura (APL ENGENHARIA, 2019).

A partir das investigações bibliográficas sobre o comportamento do atrito negativo em estacas ao longo do tempo, destacam-se trabalhos como o de Fellenius (1971). Este pesquisador analisou duas estacas pré-moldadas cravadas em profundidade, atravessando argilas sensíveis. Os resultados evidenciaram a influência de fatores como recalques iniciais, dissipação de poropressões e redistribuição de esforços ao longo de seis meses. Observou-se que o atrito negativo tende a estabilizar após esse período. Estudos subsequentes corroboram esses achados, indicando que as pressões geradas dissipam-se em curtos intervalos de tempo e que cargas aplicadas no topo das estacas podem mitigar parcialmente o atrito negativo. Assim, conclui-se que, embora o fenômeno impacte os recalques, não compromete a capacidade estrutural da fundação. A pesquisa sugere que movimentos mínimos podem reduzir a sobrecarga negativa, mantendo a integridade estrutural ao longo do tempo (SANTOS NETO, 1989).

Segundo Tavares, Taboza e Pires (2022), projetar uma estrutura sobre argilas saturadas, também chamadas de solos moles, apresenta desafios significativos devido às suas características. Esses substratos são marcados por sua baixa resistência ao cisalhamento, alta compressibilidade e baixa permeabilidade, o que exige cuidados especiais no projeto de fundações para evitar problemas futuros associados ao recalque e ao comportamento diferido desses materiais.

O Código Dinamarquês de Fundações estabelece diretrizes para elementos de fundação que atravessam as camadas terrosa sujeitos a recalques por aterros. Além das cargas provenientes da superestrutura, o código menciona dois tipos adicionais de esforço: (1) forças adicionais no bloco, geradas pelo peso do aterro e por pressões de superfície em uma área cônica ou piramidal inclinada de 1:2 (horizontal), e (2) atrito negativo nas estacas e outras estruturas próximas. O cálculo do fenômeno considera o menor valor entre o atrito lateral usual nas camadas superiores e o esforço que pode gerar recalques, dentro da área de influência. Caso ocorra sobreposição com estacas vizinhas, a pressão é distribuída entre elas. Long e Healy (1974) referem-se a este método como "aproximado", baseando-se na hipótese de uma inclinação de 1:2, que limita o atrito lateral descendente à sobrecarga aplicada na área especificada (DANZIGER; LOPES, 2021).

O ponto neutro em uma estaca é definido como a posição onde a estrutura e o terreno ao seu redor experimentam o mesmo assentamento. Acima dessa zona, o solo tende a se assentar mais que a estrutura de suporte, enquanto abaixo o pilar de fundação se acomoda

mais que o solo. Essa zona de equilíbrio é crucial, pois nela ocorre a maior força ao longo da estrutura. No caso de suportes que alcançam rocha, o nível neutro se posiciona pouco acima do topo da rocha e é frequente considerar que o atrito negativo atua ao longo de toda a extensão da estrutura. Em terrenos menos firmes a posição de equilíbrio pode ocorrer em uma altura considerável acima do estrato de apoio, e uma suposição conservadora pode subestimar o potencial da seção da estrutura de fundação (LONG; HEALY, 1994).

A força vetorial descendente em estacas enfatiza dois aspectos principais: o esforço adicional e a influência na capacidade de suporte. O primeiro aspecto refere-se ao peso extra que deve ser considerado na estrutura de suporte, além da carga estrutural. O segundo aspecto diz respeito à diminuição das pressões verticais ao redor da estrutura devido ao solo que se "pendura" nos elementos de fundação, o que reduz as pressões próximas em comparação com áreas mais distantes. Esse fenômeno impacta a capacidade de suporte, pois as tensões efetivas ao longo do fuste e na ponta das estacas não devem ser assumidas como iguais às pressões geostáticas, devendo-se considerar a presença de aterro no projeto (DANZIGER; LOPES, 2021).

### *Fundações profundas*

O uso de fundações em estacas é uma técnica antiga, com evidências de sua aplicação desde a pré-história, em construções como palafitas. Straub (1964, apud VELLOSO; LOPES, 2010) destaca que, na engenharia civil romana, estruturas de suporte eram essenciais em áreas pantanosas ou com escassez de materiais rochosos, sendo utilizadas passadiços de madeira.

Em estruturas de suporte para pontes, Vitruvius recomendava o uso de elementos fundacionais feitos de materiais duráveis, como amieiro, oliveira e carvalho, cravados e preenchidos com cinzas para maior estabilidade. Na Idade Média, Fra Giocondo aplicou estacas para a proteção das bases de apoio das pontes, como na Ponte della Pietra e na Ponte de Rialto (VELLOSO; LOPES, 2010).

Em De reaedificatoria (1485), Leon Battista Alberti define proporções para estacas, enfatizando dimensões adequadas para suportes. No século XVIII, Perronet introduz critérios de resistência à cravação, enquanto Stephenson, em 1846, acelera o processo com o martelo a vapor. Em 1897, Hennebique utiliza estaca de concreto armado em fundações industriais. Nas estruturas offshore modernas, como a plataforma Cognac, avançou-se no uso de estacas tubulares de aço de grandes dimensões, demandando novas tecnologias de cravação e controle (VELLOSO; LOPES, 2010).

Inicialmente, no Brasil, estacas pré-moldadas de concreto se destacaram pelo custo-benefício, com aumentos de comprimento possibilitados pela protensão. Nos anos 1940 a expansão da siderurgia nacional facilitou o uso de perfis de aço e tubos, antes importados, e o reaproveitamento de trilhos. Em um marco importante a Ponte Rio-Niterói, construída no final dos anos 1960, empregou estacas de grande diâmetro, instaladas com tecnologias alemãs, como os equipamentos Wirth e Bade. A década de 1970 trouxe a popularização dos elementos de fundação profunda tipo raiz e das escavadas com lama bentonítica, ambas técnicas italianas inicialmente aplicadas em reforço estrutural. Nos anos 1980, a introdução da estaca hélice contínua impulsionou a execução de sistemas de apoio profundo pela agilidade e

eficiência, consolidando-a rapidamente no mercado de engenharia de fundações. (DANZIGER; LOPES, 2021)

### *Estacas*

Conforme a NBR 6122:2022, estruturas de suporte profundo são projetadas para transferir cargas ao solo, utilizando resistência de ponta, de fuste, ou ambas. Essas estruturas, como estacas e tubulões, são dimensionadas para se estenderem em profundidades superiores a oito vezes a menor dimensão em planta ou a no mínimo 3,0 metros, garantindo estabilidade e eficiência estrutural em projetos de engenharia civil.

Velloso e Lopes (2010) exploram as características das bases profundas, classificando-as em estacas, tubulões e caixões, que são caracterizados tanto pela técnica de execução quanto pela geometria. Os elementos estruturais verticais, por exemplo, são instalados sem a necessidade de operários no interior durante o processo, enquanto os tubulões e caixões, com formas cilíndricas e prismáticas, respectivamente, requerem acesso interno em algumas fases. A classificação dessas estruturas de fundação considera o material utilizado — como madeira, concreto ou aço — e o método de execução, que pode deslocar ou substituir o solo, dependendo do impacto na geostática da estrutura.

De acordo com Velloso e Lopes (2010) o comportamento de estacas cravadas se difere nos diversos tipos de solo. Em camadas granulares pouco compactadas, a cravação provoca densificação, pois o volume da estaca reduz o índice de vazios, aumentando a capacidade de carga e reduzindo recalques. Entretanto, em terrenos granulares muito compactos, o efeito é de deslocamento, o que pode danificar estruturas próximas. Já em depósitos argilosos saturados, a baixa permeabilidade causa um deslocamento inicial e aumento nas poropressões, seguido por um processo de adensamento radial e recuperação da resistência do terreno. Dependendo da sensibilidade da argila, a cravação pode melhorar ou enfraquecer o material ao redor da estaca, mostrando diferentes efeitos conforme o tipo e condição do substrato envolvido.

No contexto da engenharia civil, estacas escavadas geram uma descompressão do solo que pode variar de intensidade conforme o tipo de suporte utilizado. Em situações onde não há suporte, como em solos com algum percentual de partículas finas e acima do nível d'água, a descompressão tende a ser mais acentuada. Por outro lado, estacas escavadas com uso de camisas metálicas oferecem menor alívio de tensão devido ao suporte contínuo durante a escavação. No intervalo entre esses extremos, o uso de fluidos estabilizantes contribui para uma descompressão intermediária. É relevante observar que o alívio de tensões no solo não ocorre de maneira instantânea, pois envolve processos de migração de água e fenômenos de fluência (creep). Dessa forma, a concretagem rápida após a escavação minimiza tanto a descompressão quanto a deterioração das propriedades do solo (VELLOSO; LOPES, 2010).

A utilização de ponteiros especiais em estacas, que facilitam a penetração em camadas mais compactas ou materiais resistentes, sendo compostas por segmentos de tubos ou perfis de aço fixados a anéis robustos são incorporados na concretagem. Quanto às emendas de estacas pré-moldadas, estas devem ser projetadas para suportar as tensões aplicadas tanto durante a cravação quanto em serviço. No Brasil, as emendas geralmente são feitas por meio de luvas ou anéis de aço soldados ao concreto, permitindo a transmissão de compressão,

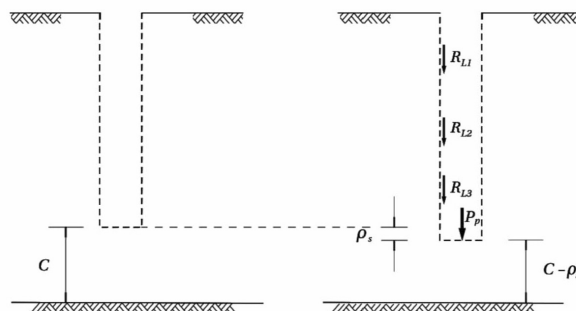
tração e flexão. Em casos onde apenas a compressão é prevista e o solo é firme, uma emenda por luva de encaixe pode ser suficiente (DANZIGER; LOPES, 2021).

### Recalque

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), os recalques em fundações são críticos que afetam diretamente a estabilidade das estruturas de engenharia civil. Esses fenômenos correspondem ao afundamento das fundações de uma edificação devido às mudanças nas condições do solo subjacente. Esses assentamentos são classificados em duas categorias principais: totais e diferenciais.

Os diferenciais representam a diferença de deformação entre dois apoios em relação à sua distância. Esse fenômeno ocorre devido à ruptura do contato entre a fundação e o solo, provocando um deslocamento além do previsto. Em projetos de fundações, estabelecer valores admissíveis de deslocamento vertical é fundamental para garantir a segurança e desempenho estrutural, com recalques totais impactando toda a fundação e diferenciais afetando apenas uma seção. Os danos causados por esses fenômenos podem variar, incluindo impactos estéticos, comprometimento da funcionalidade da edificação ou riscos estruturais severos. As normas, como o Eurocode 7, estipulam limites para rotações relativas e valores admissíveis para assentamentos totais e diferenciais, visando evitar que os deslocamentos ultrapassem o limite de segurança. Em situações de deformações acentuadas, surgem fissuras com padrões específicos que podem variar em função de fatores construtivos e estruturais, sendo necessária a monitoração contínua para análise precisa do comportamento real das fundações (CALISTO; KOSWOSKI, 2015).

Em condições de mesma carga, o recalque de um grupo de estacas supera o de uma estaca isolada. Esse comportamento é descrito por um fator  $\alpha$ , que relaciona o assentamento do grupo  $p_g$  com o fenômeno da estaca isolada  $p_i$ , com valores de  $\alpha$  variando entre 1,6 e 4,0 em solos arenosos medianamente compactos. A confiabilidade de fórmulas que utilizam apenas parâmetros geométricos do grupo é questionada, pois desconsideram fatores cruciais, como a deformabilidade e a espessura do estrato de solo. O método de Aoki e Lopes (1975) é destacado por considerar a interação entre elementos da fundação, proporcionando uma estimativa mais precisa. Em projetos práticos, os valores de assentamento admissíveis sugeridos por Meyerhof (1976) são 25 mm para areia e 50 mm para argila em grupos de estacas, com um fator de segurança aplicado a estacas isoladas para evitar afundamentos excessivos (CINTRA; AOKI, 2014).



Fonte: Cintra e Aoki (2014)

**Figura 1** – Recalque do solo.

## *Investigação Geotécnica*

A NBR 6122:2022 define que deve ser feita uma investigação geotécnica preliminar, incluindo no mínimo um ensaio por sondagens a percussão (com SPT), podendo ser realizada quaisquer outros testes complementares se necessário. A investigação do subsolo é uma etapa indispensável em projetos de fundações, exigindo a participação ativa do projetista desde o início para garantir segurança e qualidade. Esse processo divide-se em três fases principais: preliminar, complementar e de execução. A etapa preliminar tem como finalidade oferecer uma visão geral das características do subsolo, permitindo uma avaliação inicial das condições locais. Já a fase complementar aprofunda os estudos, avaliando propriedades específicas dos solos por meio de amostras indeformadas e ensaios adicionais. Por fim, a avaliação de execução assegura a conformidade entre as condições reais do subsolo e as previsões do projeto, sendo essencial para ajustes necessários durante a obra. Além disso, é responsabilidade do projetista elaborar o programa de verificação com base em normas técnicas, como a NBR 8036 e a NBR 6484, e supervisionar todas as etapas do processo. Essa supervisão torna-se ainda mais relevante na seleção da empresa responsável, garantindo que os serviços sejam realizados com precisão e qualidade (DANZIGER; LOPES, 2021).

As diferenças fundamentais entre o Ensaio de Penetração Padrão (SPT) e o Ensaio de Penetração Cônica (CPT) encontram-se em suas precisões e aplicações específicas no campo da engenharia civil e geotecnia. O CPT destaca-se por sua alta precisão em solos arenosos, pois realiza medições contínuas e controladas da resistência à penetração, sendo amplamente utilizado em estudos que exigem maior detalhamento. Por outro lado, o SPT é valorizado pela simplicidade operacional e pelo baixo custo, o que o torna ideal para projetos com restrições orçamentárias. Ademais, o CPT proporciona maior resolução espacial, permitindo uma definição mais precisa das camadas, enquanto o SPT é considerado satisfatório para caracterizações gerais, sobretudo em solos com estratificação grossa (CGI, 2024).

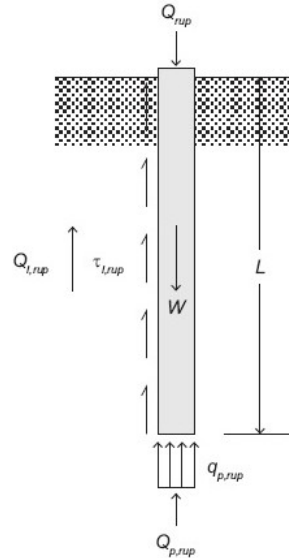
## *Capacidade de carga*

Conforme a NBR 6122, a capacidade de carga é definida como a força máxima que uma fundação pode suportar sem apresentar ruptura nítida, ou seja, quando ocorre uma deformação contínua mesmo sem o aumento adicional de tensão. Em situações em que a estaca não atinge uma ruptura evidente, a curva esforço-descendente pode ser extrapolada para estimar a força de ruptura, permitindo uma análise mais precisa, em conformidade com os critérios da engenharia geotécnica.

A determinação da capacidade portante de uma estaca considera o menor valor entre a resistência estrutural da estaca e a resistência oferecida pelo solo de suporte. Métodos de cálculo, como os de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, são amplamente recomendados para avaliar a resistência do solo. Contudo, em casos onde a compressão média supera 5 MPa, a utilização de armadura na estaca é imprescindível até a profundidade em que a tensão média seja reduzida (ALONSO, 2019).

Os elementos geotécnicos que influenciam a capacidade de carga em fundações profundas, especialmente em estacas instaladas em solo argiloso, incluem fatores como a resistência lateral e a resistência de ponta. A resistência lateral, representada por  $r_L$ , refere-se

à adesão entre o solo e o fuste da estaca, sendo calculada com base na coesão não drenada do solo. A resistência lateral total, RL, é obtida pelo somatório das forças de adesão ao longo do comprimento da estaca. Já a resistência de ponta rP, está relacionada à força suportada diretamente na base da fundação e pode ser calculada pela equação de Skempton (1951), considerando a coesão média e a sobrecarga aplicada na base da estaca. Esses fatores são fundamentais para o cálculo da resistência global da fundação (CINTRA; AOKI, 2014).



Fonte: Danziger e Lopes (2021)

**Figura 2** – Ações e resistências mobilizadas na ruptura.

O Método Décourt-Quaresma para estimativa da capacidade de carga de fundações profundas é um modelo amplamente aplicado em engenharia geotécnica, especialmente em solos tropicais. Esse método, desenvolvido por Décourt e Quaresma, considera as condições específicas de resistência dos solos a partir de dados obtidos em ensaios de penetração estática e dinâmica, como o SPT (Standard Penetration Test). Se destaca por ser adaptável a diferentes tipos de fundações e perfis de solo, oferecendo um cálculo robusto da resistência lateral e de ponta de estacas, essencial para a estabilidade e segurança das estruturas suportadas (PAGNUSSATTI; SANTOS, 2011).

$$Q_{rup} = \alpha * C * N_p * A_b + \beta \left( \frac{\bar{N}}{3} + 1 \right) U * L \quad (1.1)$$

Onde:

$\alpha$  = fator de correção

C = coeficiente característico do solo

$N_p$  = área de ponta da estaca

$A_b$  =  $N_{SPT}$  médio na ponta da estaca

$\beta$  = fator de correção

N = médio no fuste da estaca

U = perímetro da estaca

L = comprimento da estaca



Resistência lateral:

$$R_L = \beta * \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) U * L \quad (1.2)$$

Resistência de ponta:

$$R_p = \alpha * C * N_p * A_p \quad (1.3)$$

$$r_l = \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) \rightarrow tf/m^2 \quad (1.4)$$

Segundo Velloso e Lopes (2010), Aoki e Velloso em 1975 desenvolveram um método baseado em uma análise comparativa entre os resultados de provas de carga em estacas e os testes de sondagem, possibilitando sua aplicação com dados tanto do SPT quanto do ensaio CPT. Esse método apresenta uma expressão inicial para a capacidade de carga das estacas, que correlaciona a resistência de ponta e o atrito lateral com os resultados obtidos no CPT.

$$Q_{ult} = A * \frac{K * N}{F1} + U \sum \frac{\alpha * K * N}{F2} * \Delta L \quad (2.1)$$

Onde:

A = área de ponta

K = coeficiente

$\alpha$  = razão de atrito

F1 e F2 = fatores de correção

U = perímetro da estaca

$\Delta L$  = comprimento da estaca

N = número de golpes  $N_{SPT}$  da camada de solo analisada

Resistência lateral:

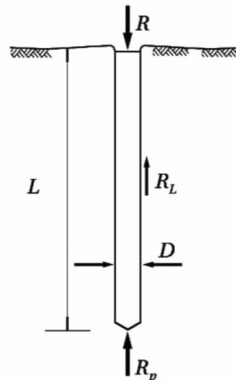
$$R_L = U \sum \frac{\alpha * K * N}{F2} * \Delta L \quad (2.2)$$

Resistência de ponta:

$$R_p = A * \frac{K * N}{F1} \quad (2.3)$$

A partir de uma análise de resultados de provas de carga em cerca de cem estacas, foram obtidos os valores dos fatores F1 e F2 para o cálculo da capacidade de carga, baseando-se na retroanálise. Por não haver provas instrumentadas para diferenciar a capacidade do fuste e da ponta, optou-se por estabelecer  $F2 = 2F1$ , com valores apresentados. Para estacas escavadas, os valores foram adaptados do trabalho de Velloso et al. (1978). Durante os anos 1970, com a introdução das estacas tipo raiz, foram realizadas avaliações adicionais por estudantes da UFRJ para incluir estacas raiz, hélice e ômega, resultando em valores de  $F1 = 2$  e  $F2 = 4$ , os quais proporcionaram uma estimativa conservadora de resistência. Para calcular a resistência de ponta, recomendam a média de três valores de N no nível da ponta, 1 metro

acima e abaixo, com um valor limite de  $N = 50$  sendo adotado para restrição. (VELLOSO; LOPES, 2010).



Fonte: Cintra e Aoki (2014)

**Figura 3** – Parcelas de resistência que constituem a capacidade de carga.

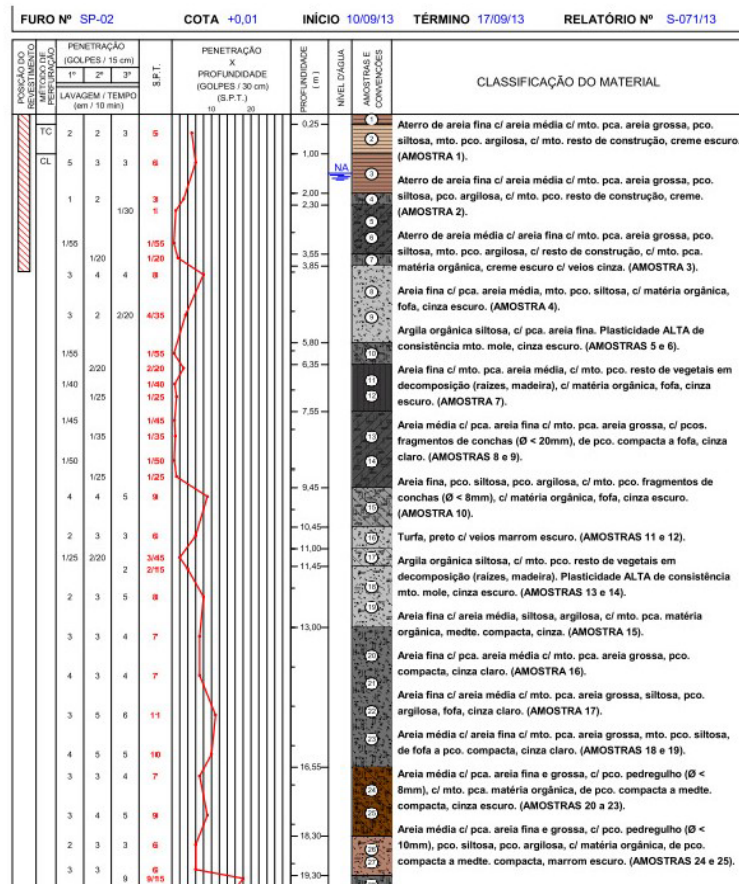
## Materiais e Métodos

Para analisar a quantificação do atrito negativo em projetos de fundações com estacas, foi conduzido um estudo com base no caso de Batista et al. (2018), que investigaram o comportamento de uma estaca mista instalada em um solo localizado no bairro de Boa Vista, em Recife-PE. No estudo, foram utilizadas 82 estacas de concreto pré-fabricadas, divididas em quatro seções distintas, com comprimentos médios entre 17,00 e 18,00 metros e capacidades admissíveis variando de 143 a 949 kN. Além disso, foram utilizadas 86 estacas mistas. A estaca mista testada, denominada E05, possui 32,50 metros de comprimento e 500 mm de diâmetro. A seção em concreto pré-moldado apresenta resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 35 MPa e módulo de elasticidade de  $E = 21.000.000 \text{ tf/m}^2$ .

O ensaio de prova de carga estática realizado na estaca mista (metálica + concreto) atingiu um carregamento máximo de aproximadamente 176 tf, com um recalque médio de 5,49 mm. A investigação incluiu cinco ensaios de SPT no local de estudo, que identificaram uma camada inicial de aterro entre 2 e 3 metros, seguida por outras camadas, detalhadas no relatório. Esses dados proporcionam uma análise aprofundada das condições do solo e do comportamento estrutural das estacas, contribuindo para a validação dos métodos aplicados.

As sondagens realizadas no local identificaram camadas alternadas de areia com compactação variável, além de argila e silte em diferentes concentrações. Em todas as sondagens, o nível d'água foi encontrado próximo ou abaixo de 1,80 metros de profundidade. Com base nesses dados, estimou-se o atrito negativo, visando à comparação entre diferentes métodos de cálculo. As análises concentraram-se exclusivamente na parcela de concreto da estaca, utilizando dados do ensaio de sondagem SP-02 e tabelas de diversos autores para embasar os resultados.

Para o estudo de caso, empregou-se o método de Aoki e Velloso (1975), obtendo-se os seguintes valores: a resistência ao atrito lateral da estaca foi de 236 tf, a resistência de ponta alcançou 172 tf, e o atrito negativo atingiu 39 tf. Com um Fator de Segurança de 2 para o somatório das resistências de ponta e atrito lateral, e de 1,5 para o atrito negativo, calculou-se uma carga admissível à compressão de 145 tf, conforme demonstrado na Equação 1.1. A carga total estimada para a execução da Prova de Carga Estática foi de 290 tf.



Fonte: Batista et al (2018)

**Figura 4** – Sondagem SP-02

Para o ângulo de atrito interno, foi adotada uma abordagem distinta, utilizando os valores do coeficiente  $\beta$  conforme encontrados na literatura. Esses valores são representados pela seguinte expressão:

$$\beta = K * \tan \phi' \quad (3)$$

Pereira Filho (2017), por meio de retroanálise, determinou o valor do coeficiente  $\beta$  específico para cada tipo de solo, analisando o atrito negativo registrado na instrumentação de estacas. Baseando-se em estudos de autores que investigaram condições semelhantes, optou-se, neste trabalho, pela aplicação dessa constante, considerando sua adequação a situações equivalentes às abordadas, em vez de utilizar correlações entre o ângulo de atrito interno e os valores de NSPT. Long e Healy (1974) apresentam, em uma tabela resumida, os principais valores encontrados para o coeficiente  $\beta$ , oferecendo suporte teórico para a escolha adotada.

Sendo assim, ao adotar a referência de Brons et al. (1969) para estacas de concreto e o coeficiente  $\beta$  com valor de 0,19, determinou-se um ângulo de atrito interno de 15°, utilizado em todos os métodos de cálculo empregados no estudo. Para a determinação do peso específico do solo, em  $\text{tf/m}^3$ , foram utilizadas as tabelas de Godoy (1972, apud PEREIRA FILHO, 2017), que relacionam os valores ao número de golpes do ensaio SPT e à capacidade apresentada pelo solo.



TABLE I  
Empirical Values of  $\beta$

REFERENCE	PILE TYPE	SOIL CONDITIONS	$\beta$
Bjerrum & Johannessen & Elde (1969)	Steel Pipe	Silty Clay	.25
	Steel Pipe	Silty Clay	.26
	w/ Bitumen	Silty Clay	.02
	Steel Pipe	Clay	.18
	Steel Pipe	Clay	.23
	w/ Bitumen	Clay	.01
Bjerrum & Johannessen (1965)	Krupp KP24	Marine Clay	.20
Bozozuk & Labrecque (1969)	Steel Pipe	Sand & Silty Clay (N.C. & O.C.)	.20
Brons et al (1969)	Concrete	Cohesive Soil	.24
	w/ Bitumen	Cohesive Soil	.01
	w/ Bentonite	Cohesive Soil	.03
	Concrete	Clay & Sand	.19
Bozozuk (1970)	Steel Pipe	Compacted Sand Fill	.77
	Steel Pipe	Silty Sand	.33
Endo et al (1969)	Steel Pipe (closed end)	Sandy Silt	.35
	Steel Pipe (open end)	Sandy Silt	.20
	" " (battered)	Sandy Silt	.33
	Steel Pipe (closed end friction)	Sandy Silt	.30
Fellenius (1971)	Precast Concrete	Marine Clay	.09
Walker & Darval (1972)	Steel Pipe	Sand	.52
	Steel Pipe	Silty Clay	.23
Gant et al (1958)	Monotube Pile	Clayey Silt & Sand	.33

c.f. Garlanger (7)

Fonte: Long e Healy (1974) apud Pereira Filho (2017)

Figura 5 – Valores de  $\beta$  encontrados nos estudos notáveis

TABELA 1 – Peso específico de solos arenosos

N (golpes)	Compacidade da areia	Peso específico (tf/m <sup>3</sup> )		
		Seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa	1,6	1,8	1,9
5 – 8	Pouco compacta	1,6	1,8	1,9
9 – 18	Medianamente compacta	1,7	1,9	2,0
19- 40	Compacta	1,8	2,0	2,1
> 40	Muito compacta	1,8	2,0	2,1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

TABELA 2 – Peso específico de solos argilosos

N (golpes)	Compacidade da argila	Peso específico (tf/m <sup>3</sup> )
≤ 2	Muito mole	1,3
3 – 5	Mole	1,5
6 – 10	Média	1,7
11 – 19	Rija	1,9
≥ 20	Dura	2,1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

*Método Teórico de Alonso*



Alonso (2019) apresenta dois métodos para o cálculo do atrito negativo: o método convencional e o método teórico. O método convencional baseia-se na ocorrência do fenômeno devido ao efeito de cravação das estacas, que não deve exceder o peso do solo amolgado. A extensão desse efeito é influenciada pela sensibilidade da argila e pelas características das estacas. No entanto, o atrito negativo pode ser desconsiderado em situações em que a argila se recupera rapidamente. Por outro lado, em casos onde não ocorre cicatrização, torna-se desafiador avaliar a região amolgada responsável pelo atrito negativo. Algumas propostas sugerem considerar um raio ao redor da estaca equivalente a 1,5 vezes seu diâmetro, ou uma extensão de 30 a 50 centímetros. Para estacas isoladas, o atrito negativo é calculado da seguinte forma:

$$AN = U \sum \Delta l * f_{si} \quad (4.1)$$

em que:

U = perímetro da estaca

$\Delta l$  = trechos de solo com  $r_l$  constante

$f_{si}$  = constante = adesão entre a estaca e o solo da camada  $i$ . Para argilas moles, é possível adotar o valor equivalente à coesão dessas argilas. Na ausência desse dado, ou em situações em que a estaca atravessa aterros, o valor de  $f_{si}$  pode ser assumido como igual, em módulo, ao atrito lateral determinado pelos métodos semiempíricos de transferência de carga em estacas, tais como os métodos de Aoki-Velloso, Décourt, e Quaresma, entre outros.

No método teórico, a adesão  $f_{si}$  entre o solo e a estaca, que gera o atrito negativo em uma profundidade específica  $z$ , é calculada da seguinte forma:

$$f_{si} = K_0 * \tan \phi * \sigma_{\theta f} \quad (4.2)$$

Sendo:

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \quad (4.3)$$

$$\phi' = \frac{2}{3} \phi \quad (4.4)$$

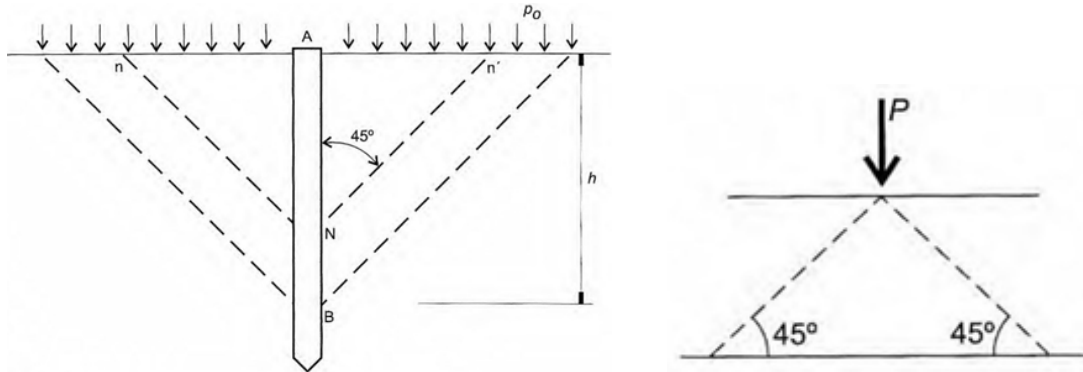
$$\phi_{\theta f} = \sigma_{inicial} + \Delta \sigma \quad (4.5)$$

Nos casos em que a estaca atravessa diversas camadas com características distintas do solo é necessário realizar o cálculo para cada uma respectivamente e achar a adesão média para utilizar na equação final de estimativa do atrito negativo. Com isso, foi separado em duas faixas a primeira constituindo o aterro arenoso até 2 metros de profundidade e a segunda é a camada compressível até 9,45 metros, onde foi considerado o ponto neutro. Leva-se em consideração também que depois de 1,80 metros o solo é completamente submerso, alterando seu peso específico.

### *Método de De Beer-Wallays*

Segundo Velloso e Lopes (2010), De Beer-Wallays (1972) desenvolveram um método alternativo ao de Zeevaert (1983), simplificando o cálculo da pressão vertical aplicada sobre a área  $A(P_{v,z})$ . Segundo essa abordagem, a influência de uma sobrecarga é limitada ao interior

de um cone imaginário com ângulo de  $90^\circ$  no vértice, situado no ponto de aplicação da carga. Com isso, separa-se o efeito da sobrecarga  $P_0$  sobre uma camada específica do solo e o peso próprio dessa camada, facilitando a análise das pressões em profundidades específicas dentro do cone projetado. O método desenvolvido por De Beer-Wallays é uma abordagem numérica que se diferencia dos convencionais ao fornecer resultados significativamente maiores.



Fonte: Velloso e Lopes (2011)

**Figura 6** – Hipóteses da influência da sobrecarga de De Beer-Wallays.

Para estimar o atrito negativo total, é necessário dividir duas parcelas distintas, nas quais serão somadas ao final. Portanto, a influência da sobrecarga  $P_0$  sobre a camada mole e o peso próprio dessa camada são considerados separadamente.

$$P_{an} = P_{an,0} + P_{an,y} \quad (5.1)$$

As parcelas podem ser calculadas por:

$$P_{an,0} = A_0 * P_0 * (1 - e^{-M_0}) \quad (5.2)$$

$$P_{an,y} = A_y * \gamma' * H * \left(1 - \frac{1 - e^{-M_y}}{M_y}\right) \quad (5.3)$$

Onde:

$$M_0 = \frac{U * H * K * \tan \phi'}{A_0} \quad (5.4)$$

$$M_y = \frac{U * H * K * \tan \phi'}{A_y} \quad (5.5)$$

para:

$M_0$  e  $M_y$  = variáveis para facilitar interpretação do cálculo

$U$  = perímetro da estaca;

$H$  = espessura da camada compressível;

$K$  = coeficiente de empuxo. Para tal, pode-se adotar o valor no repouso ( $K_0$ ) para solos normalmente adensados:  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ ;

$\gamma'$  = peso específico efetivo da camada compressível;

$P_0$  = sobrecarga no topo da camada compressível.

$e$  = constante de Euler, aproximadamente igual a 2,71828

A variável  $A_0$  representa a área de influência em cima da camada adensável, onde o atrito negativo começa a se desenvolver. Assim, considera-se, de forma aproximada, que o valor a ser usado no cálculo de  $P_{an,0}$  para uma estaca isolada, é:

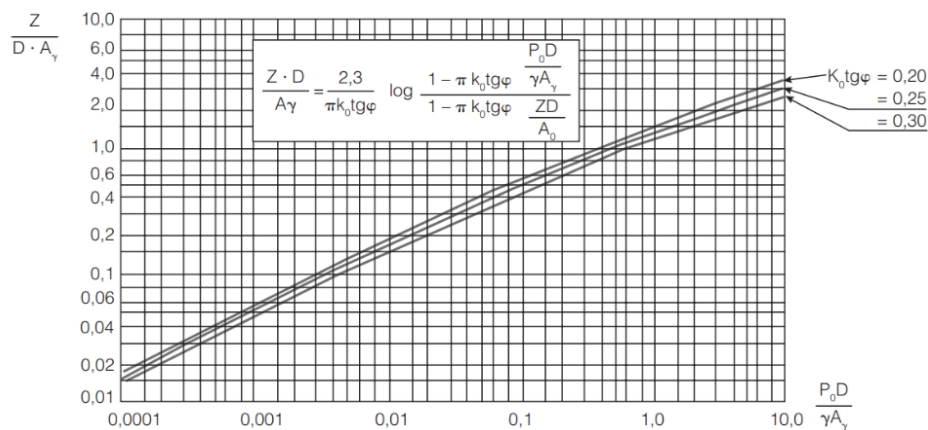
$$A_0 = \frac{\pi * h^2}{4} \quad (5.6)$$

Já para o cálculo para a área  $A_y$  apresentada na parcela  $P_{an,y}$ , o diâmetro de influência é igual a  $H/2$ . Assim:

$$A_y = \frac{\pi * h^2}{16} \quad (5.7)$$

A partir da equação 5.8 e da figura 8, utiliza o diâmetro da estaca e o valor de  $A_y$  para obter a profundidade  $z$  que retrata até onde se deve considerar a força do atrito negativo:

$$\frac{P_0 * D}{\gamma' * A_y} \quad (5.8)$$



Fonte: Alonso (2019)

**Figura 8** – Cálculo da espessura que contribuiu no atrito negativo

### Método de Bowles

Bowles (1997) explica que o atrito negativo ocorre quando o solo ao redor se desloca verticalmente em relação à estaca, devido à consolidação de camadas compressíveis. Esse fenômeno aumenta a carga axial no elemento estrutural, especialmente em solos expansivos. O autor apresenta um método de análise de atrito negativo em estacas que foca na identificação e mitigação das forças descendentes exercidas pelo solo em movimento de consolidação ao redor da estaca. Esse efeito de "downdrag" ocorre quando camadas de solo compressível se movem para baixo, impondo uma carga adicional sobre a estaca.

Bowles (1997) enfatiza a importância do ponto neutro, onde as forças de atrito positivo e negativo se equilibram e sugere técnicas para reduzir o impacto dessas cargas, como o uso de revestimentos de baixa adesão ao longo da estaca para minimizar a resistência e reduzir o atrito descendente.

Sendo assim, ele explora fórmulas distintas para o cálculo da sobrecarga em aterros, considerando se o material é coesivo ou granular. No caso de aterros granulares, conforme a figura 6, a sobrecarga devido ao atrito negativo em uma estaca isolada é obtida por:

$$P_{AN} = K_0 * \alpha' * U * \left( P_0 * L_1 + \frac{\gamma' * L_1^2}{2} \right) \quad (6.1)$$

Onde:

$K_0$  = coeficiente de empuxo lateral em repouso;

$\alpha'$  = coeficiente de adesão;

$U$  = perímetro da estaca;

$P_0$  = sobrecarga no topo da camada compressível;

$L_1$  = determinação do ponto neutro;

$\gamma'$  = peso específico efetivo da camada compressível.

Sendo que o coeficiente de empuxo lateral, o coeficiente de adesão, a sobrecarga e a determinação do ponto neutro são obtidos, respectivamente, por:

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (6.2)$$

$$\alpha' = \tan \phi \quad (6.3)$$

$$P_0 = \gamma * H \quad (6.4)$$

$$L_1 = \frac{L}{L_1} * \left( \frac{L}{2} + \frac{P_0}{\gamma'} \right) - \frac{2P_0}{\gamma'} \quad (6.5)$$

Onde:

$\phi$  = ângulo de atrito interno do solo;

$H$  = altura total do solo que exerce peso sobre a camada compressível;

$L$  = altura total da estaca.

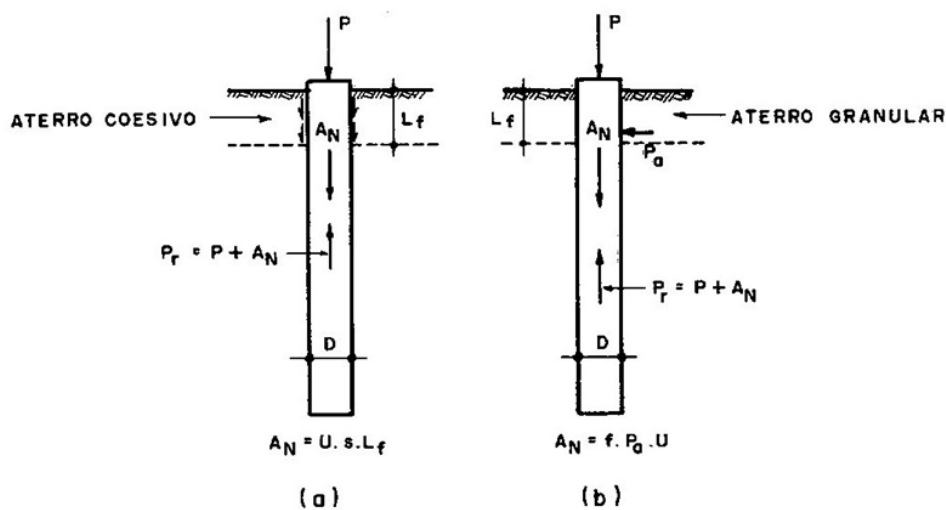


FIG. A VIII.1 – Atrito negativo em estacas causado por : (a) aterro coesivo , (b) aterro granular (apud Bowles,1968).

Fonte: Santos Neto (1981)

Figura 9 – Atrito negativo em estacas causado por: (a) aterro coesivo, (b) aterro granular

## Resultados e Discussões

As análises realizadas para estacas com 12 metros de comprimento e 500 mm de diâmetro revelam discrepâncias relevantes entre os métodos avaliados na estimativa do atrito negativo e da redução na capacidade de carga.

Esses resultados mostraram-se alinhados com as abordagens propostas por cada autor estudados, conforme apresentado na Tabela 3, o método de De Beer-Wallays gerou os maiores valores de atrito negativo, alcançando 26,91 tf para um ângulo de atrito interno do solo de 15° e 10,32 tf para o menor ângulo de 6°. Essa tendência é explicada pela abordagem adotada pelo método, que considera a mobilização total das forças de atrito ao longo de toda a camada compressível, sem levar em conta o conceito de ponto neutro. Esse comportamento proporciona valores mais elevados, conferindo maior segurança estrutural em cenários de solos de alta compressibilidade ou compactação variável.

**TABELA 3** – Resultados obtidos pelo método De Beer-Wallays

Coeficiente	Símbolo	Valor		Unidade
		Mínimo	Máximo	
Altura da camada	H	9,45	9,45	m
Peso específico	$\gamma$	1,9	1,9	tf/m <sup>3</sup>
Ângulo de atrito interno efetivo	$\phi'$	4	10	°
Empuxo lateral em repouso	$K_0$	0,93	0,826	-
Área de influência do aterro	$A_0$	70,14	70,14	m <sup>2</sup>
Área de influência do solo adensável	$A_\gamma$	17,53	17,53	m <sup>2</sup>
Atrito negativo do aterro	$P_{an,0}$	5,94	17,63	tf
Atrito negativo do solo adensável	$P_{an,\gamma}$	4,38	9,28	tf
Atrito negativo total	$P_{an}$	10,32	26,91	tf

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Já o método teórico, apresentado na Tabela 4, produziu valores intermediários, variando de 12,17 tf para o ângulo máximo e 5,79 tf para o mínimo estabelecidos. Essa abordagem, que utiliza uma adesão média estimada de 0,82 tf/m<sup>2</sup> entre o solo e a estaca, reflete um equilíbrio entre conservadorismo e praticidade. O método teórico é particularmente indicado para solos compostos por aterros arenosos sobre camadas adensáveis. Além disso, considera o ponto neutro, resultando em valores moderados que garantem segurança sem implicar custos excessivos para mitigar efeitos de recalque.

**TABELA 4** – Resultados obtidos pelo método teórico

Coeficiente	Símbolo	Aterro		Camada compressível		Unidade
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Altura da camada	H	2,00	2,00	7,45	7,45	m
Peso específico	$\gamma$	1,60	1,60	1,9	1,9	tf/m <sup>3</sup>
Ângulo de atrito interno efetivo	$\phi'$	4	10	4	10	°
Empuxo lateral em repouso	$K_0$	0,93	0,826	0,93	0,826	-
Tensão efetiva	$\tau_{ef}$	1,60	1,60	6,55	6,55	tf/m <sup>2</sup>
Adesão estaca-solo	$f_{si}$	0,112	0,24	0,46	0,98	tf/m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O método de Bowles, conforme a Tabela 5, apresentou os menores valores de atrito negativo, com 11,99 tf para um ângulo de 15° e 5,68 tf para 6°. Esses valores resultam da abordagem adotada, que considera o atrito negativo desenvolvido apenas até a profundidade neutra. Embora tais estimativas favoreçam a economia de recursos no projeto, elas podem ser insuficientes em solos altamente compressíveis, como os encontrados na região de Recife. Por isso, o uso dessa metodologia exige cuidado, especialmente em locais com elevada variabilidade de solo.

**TABELA 5** – Resultados obtidos pelo método de Bowles

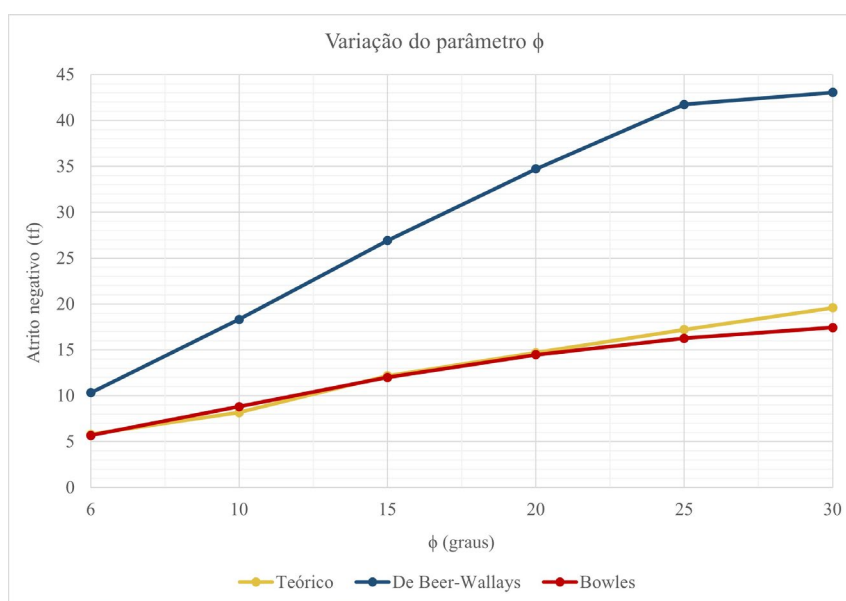
Coeficiente	Símbolo	Valor		Unidade
		Mínimo	Máximo	
Altura do aterro	H	2,00	2,00	m
Peso específico do solo compressível	$\gamma$	1,9	1,9	tf/m <sup>3</sup>
Ângulo de atrito interno efetivo	$\phi'$	6	15	°
Coefficiente de adesão	$\alpha'$	0,11	0,27	-
Empuxo lateral em repouso	$K_0$	0,90	0,74	-
Coefficiente $\beta$	$\beta$	0,09	0,20	-
Determinação do ponto neutro	$L_1$	6,35	6,35	m
Atrito negativo total	$P_{an}$	5,68	11,99	tf

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**TABELA 6** – Comparação dos resultados obtidos

Método	Atrito Negativo	
	Mínimo ( $\phi = 6^\circ$ )	Máximo ( $\phi = 15^\circ$ )
Teórico de Alonso	5,79 tf	12,17 tf
De Beer-Wallays	10,32 tf	26,91 tf
Bowles	5,68 tf	11,99 tf

Fonte: Elaborado pelo próprio autor



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

**Figura 10** – Gráfico de variação do atrito negativo em função do ângulo de atrito interno



**CREA**  
Conselho Regional de  
Engenharia e Agronomia



O atrito negativo afeta significativamente a capacidade de carga das estacas, reduzindo sua eficiência e exigindo consideração cuidadosa no dimensionamento. Para uma carga admissível inicial de 208,4 tf, o impacto do atrito negativo foi avaliado utilizando os métodos De Beer-Wallays, Bowles e o teórico, com um fator de segurança de 2, conforme recomendado pela NBR 6122. Os resultados mostram que o método De Beer-Wallays apresentou a maior redução, com uma carga reduzida de 154,58 tf e uma diminuição percentual de 25,82%. Já os métodos Bowles e Convencional indicaram reduções semelhantes, com cargas reduzidas de 184,42 tf e 184,06 tf, correspondendo a 11,51% e 11,68%, respectivamente. Esses valores refletem diferenças nas abordagens de cálculo, sendo o método De Beer-Wallays mais conservador. A análise evidencia a relevância de considerar o atrito negativo nas estimativas de capacidade de carga, uma vez que ele pode impactar de forma significativa a segurança e a economia das fundações.

O método de De Beer-Wallays é amplamente reconhecido por sua abordagem conservadora, caracterizada pela mobilização integral das forças de atrito na camada compressível, independentemente do ponto neutro. Essa estratégia é considerada ideal em cenários de alta incerteza quanto aos parâmetros do solo, justificando o custo adicional devido ao incremento na segurança estrutural e à redução de recalques excessivos. Em contrapartida, o método teórico prioriza o equilíbrio entre segurança e praticidade, demonstrando eficiência em solos de propriedades intermediárias, com ajustes que mantêm a segurança sem comprometer significativamente os resultados.

Por outro lado, o método de Bowles, apesar de apresentar uma vantagem inicial de custo, pode subestimar o efeito do atrito negativo em solos moles, como os característicos da região de Recife, onde a alta compressibilidade e a drenagem lenta intensificam o risco de recalques diferenciais.

Os métodos analisados enfrentaram limitações significativas, principalmente devido à variabilidade dos tipos de estacas e perfis de solo, evidenciando desafios em solos heterogêneos. Tais limitações ressaltam a importância de aprofundar pesquisas, especialmente sobre o desempenho comparativo dos métodos e a influência do ponto neutro, além do impacto do adensamento secundário, que permanecem pouco explorados. Esses estudos podem aprimorar práticas de dimensionamento e prever com maior precisão os efeitos do atrito negativo.

## **Conclusões**

Este estudo investigou as implicações do atrito negativo em fundações profundas e comparou cálculos de estimativa. Observou-se que os valores obtidos variam significativamente entre os métodos, refletindo as diferentes abordagens e premissas adotadas em cada um. Os resultados apontam que o método de Bowles, que incorpora técnicas mitigadoras, apresenta valores mais baixos de atrito negativo, sendo adequado para solos de alta compressibilidade onde a redução do impacto das forças descendentes é essencial. Em contrapartida, o método De Beer-Wallays tende a fornecer estimativas mais conservadoras, destacando-se como uma escolha prudente em projetos com alta exigência de segurança estrutural.

Os estudos confirmaram a importância de estratégias que assegurem tanto a viabilidade econômica quanto a segurança estrutural em projetos geotécnicos, especialmente em solos moles de alta compressibilidade. Dentre os métodos analisados, o ponto neutro se destacou como um elemento fundamental para o dimensionamento eficiente, sendo uma ferramenta prática para equilibrar segurança e economia. Sua determinação, embora desafiadora, pode ser aprimorada com base na interseção entre camadas compressíveis e resistentes, em conformidade com as orientações da NBR 6122:2022.

Assim, este trabalho reforça a importância de adotar metodologias precisas e adequadas ao tipo de solo envolvido, pois o fenômeno do atrito negativo impacta diretamente a segurança e a estabilidade das estruturas. A escolha do método de cálculo deve, portanto, ser pautada nas características geotécnicas locais, nas limitações do projeto e na disponibilidade de dados específicos sobre o solo.

A NBR 6122:2022, ao apresentar critérios mais conservadores como o uso do fator de segurança de 2, reforça a necessidade de medidas mitigadoras, como revestimentos, provas de carga ou pintura betuminosa, para garantir a estabilidade estrutural e minimizar os efeitos do atrito negativo. Contudo, essa solução enfrenta desafios significativos devido à ausência de especificações claras e orientações práticas para seu uso. A falta de características técnicas precisas e de procedimentos adequados eleva o risco de erros no processo de mitigação. Por isso, é essencial promover estudos e análises detalhadas para aperfeiçoar esses métodos, garantindo maior segurança.

Para aprimorar a aplicabilidade prática, sugere-se a integração de simulações numéricas e instrumentação avançada, o que pode reduzir incertezas associadas ao posicionamento do ponto neutro e aos efeitos do atrito negativo ao longo do tempo. Essas estratégias, associadas a adaptações regionais, podem ser aplicadas em diversas condições geotécnicas, desde que respeitadas as peculiaridades locais.

Por fim, recomenda-se um foco contínuo em estudos que investiguem a variabilidade temporal do atrito negativo e suas interações com o adensamento secundário, promovendo avanços técnicos que consolidem práticas mais seguras e econômicas.

## **Agradecimentos**

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos que contribuíram para a realização deste estudo. Agradecemos, em primeiro lugar, ao professor orientador Ricardo Simões, por seu constante apoio, orientação técnica e dedicação ao longo de todas as etapas do trabalho. Sua experiência e paciência foram fundamentais para a evolução e finalização deste artigo.

Agradecemos também à Universidade São Francisco, que nos proporcionou o acesso às instalações e aos recursos necessários para a condução desta pesquisa. Nossa gratidão se estende aos colegas e professores do curso de Engenharia Civil, cujas valiosas discussões e sugestões enriqueceram a qualidade de nossa análise.

Por fim, reconhecemos o apoio de nossas famílias e amigos, que nos deram suporte e motivação para superar os desafios enfrentados durante a realização deste trabalho. A todos, o nosso sincero agradecimento.

## Referências Bibliográficas

ABNT. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, RJ, 2022.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de Fundações Profundas**. 3.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2019. 164 p. E-book. ISBN 9788521213871.

APL ENGENHARIA. Veja o que mudou na NBR 6122:2019 - Norma de Fundações. Disponível em <<https://blog.apl.eng.br/veja-o-que-mudou-na-nbr-6122-2019-norma-de-fundacoes/>>. Acesso em: 15 ago. 2024

BATISTA, I. B. S. et al. **Análise do Comportamento de Prova de Carga Estática em Estaca Mista (metálica e concreto) Executada em Recife**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. 2018, Salvador.

BOWLES, Joseph E. **Foundation analysis and design**. 5.ed. McGraw-Hill, 1996.

CALISTO, A.; KOSWOSKI, R. **Efeito do Recalque Diferencial de Fundações em Estruturas de Concreto Armado e Alvenaria de Vedação**. Repositorio, UTFPR, 2015. Disponível em <[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8323/2/CT\\_EPC\\_2014\\_2\\_03.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8323/2/CT_EPC_2014_2_03.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2024.

CGI, Centro Geotécnico Internacional. **Diferenças Chaves entre o Ensaio SPT vs. CPT: Uma Análise Exaustiva e Controversa para Aplicações em Engenharia Civil e Geotecnia**. LinkedIn, 2024. Disponível em <<https://www.linkedin.com/pulse/diferen%C3%A7as-chaves-entre-o-ensaio-spt-wpjge/>> Acesso em: 12 out. 2024.

CINTRA, J. C.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DANZIGER, B. R.; LOPES, F. de R. **Fundações em Estacas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Arte & Ideia, 2021.

FSP, Faculdade Sudoeste Paulista. **Parâmetros dos Solos para Cálculo de Fundações**. 2013. Disponível em <<https://engenhariacivilfsp.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/11/parc3a2metros-dos-solos-cc3a1lculo-de-fundac3a7c3b5es.pdf>>. Acesso em: 23 de out. 2024

LONG, R. P.; HEALY, K. A. **Negative Skin Friction on Piles: Final Report**. University of Connecticut, School of Engineering, 1974.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, C. **Patologia das Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2ª edição, 2015. ISBN 9788579751820.

PAGNUSSATTI, H.; SANTOS, A. A. **Análise Comparativa dos Métodos de Estimativa de Capacidade de Carga de Fundações Profundas**: Estudo de Caso. Repositório Institucional da Unesc, 2011. Disponível em <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/1260/1/Heriberto%20Pagnussatti.pdf>. Acesso em: 12 out. 2024.

PEREIRA FILHO, André Luiz Delmondes. **Atrito Negativo no Projeto de Fundações Profundas**: Estudo de Caso. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2017. Disponível em <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/10140>. Acesso em: 02 de out. 2024.

SANTOS NETO, Pedro Murieta. **Métodos de Cálculo de Atrito Negativo em Estacas**: Estudo e Discussão. Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 1981. Disponível em <http://hdl.handle.net/11422/3219>. Acesso em: 23 de out. 2024

TAVARES, A. P. de S.; TABOZA, H. P.; PIRES, R. C. S. **A Influência do Atrito Negativo em Fundações Profundas**: Sobrecargas em Estacas. In: Geotecnia: Análise dos Solos. Rio de Janeiro, RJ: Epitaya, v.1, n.15, p.196-213. 2022. Disponível em <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/issue/view/63>. Acesso em: 25 ago. 2024.

VELLOSO, D. de A.; LOPES F. de R. **Fundações**: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.