

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JOÃO KLEBER DORETTO DE ANDRADE

**ESTABILIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO POR MEIO DE
ESTAQUEAMENTO A MONTANTE: UMA ANÁLISE PARAMÉTRICA POR MEIO
DA MODELAGEM NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO O RS3**

**Alegrete
2025**

JOÃO KLEBER DORETTO DE ANDRADE

**ESTABILIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO POR MEIO DE
ESTAQUEAMENTO A MONTANTE: UMA ANÁLISE PARAMÉTRICA POR MEIO
DA MODELAGEM NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO O RS3**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur Hartmann

Coorientadora: Raquel Mariano Linhares

**Alegrete
2025**

JOAO KLEBER DORETTO DE ANDRADE

**ESTABILIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO POR MEIO DE
ESTAQUEAMENTO A MONTANTE: UMA ANÁLISE PARAMÉTRICA POR MEIO DA
MODELAGEM NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO O RS3**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador
Profa. Dra. RAQUEL MARIANO LINHARES - UNIPAMPA - Coorientadora
Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA
Eng. Me. FABIANO GARCIA OLIVEIRA - Membro Externo



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 06:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Fabiano Garcia Oliveira, Usuário Externo**, em 11/12/2025, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 08:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL MARIANO LINHARES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1922824** e o código CRC **FBC40FCE**.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me cuidar e proteger, ter me dado força, saúde e competência para vencer os desafios ao longo do percurso.

Aos meus pais João Cleber e Edilene por sempre me darem amor, apoio constante e incentivo.

A minha irmã Beatriz por torcer pela minha felicidade e me apoiar sempre.

A minha namorada Kailine, agradeço por estar comigo em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins, por ter vivido essa trajetória comigo e ter me apoiado e motivado nos momentos mais difíceis.

A minha sogra Silvia e meu sogro Daniel, agradeço por sempre estarem mesmo que de longe cuidando de mim, sou muito grato por isso.

Aos meus orientadores Diego Arthur Hartmann e Raquel Mariano Linhares, agradeço o total apoio em todos os momentos dessa jornada, agradeço pelas risadas, paciência e pelos puxões de orelha, sem vocês o desenvolvimento deste trabalho não seria possível.

A Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Agradeço por proporcionar uma formação completa de qualidade e por todos os momentos vivenciados.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo de determinar a estabilidade de um encontro de ponte através da modelagem numérica tridimensional utilizando o software Rocscience 3 RS3, utilizando microestacas como mecanismo de reforço. A pesquisa fundamenta-se na crescente necessidade de entender o comportamento do conjunto solo e estrutura. O modelo numérico tridimensional foi desenvolvido com base no método dos elementos finitos, incorporando condições de contorno, restrições, análise de comprimento e largura do modelo, mantendo a profundidade fixa em 10 metros, baseado na condição da estaca estar ancorada na rocha e diferentes tipos de malhas a fim de determinar as condições que não gerassem inconsistências numéricas nem influencia no modelo. A análise numérica permitiu estimar os deslocamentos e tensões máximas, identificar zonas críticas de concentração de tensões, fornecendo fomento técnico para o projeto e dimensionamento de soluções de estabilização. Com base nos resultados obtidos, foi possível quantificar os deslocamentos e tensões horizontais gerados diante de cada combinação dos parâmetros analisados e elaborar análises gráficas. Através da análise de variância (ANOVA) foi possível observar as variáveis que mais influenciavam no modelo. As tensões horizontais analisadas apresentaram pouca sensibilidade às mudanças dos parâmetros avaliados no trabalho, quanto aos deslocamentos horizontais, observou-se maior influência das variáveis geométricas. Deseja-se que os resultados obtidos contribuam para a aplicação prática de métodos numéricos em estudos de estabilidade, promovendo maior confiabilidade, durabilidade às obras.

Palavras-Chave: Estabilidade de taludes, modelagem numérica, RS3.

ABSTRACT

This study aimed to determine the stability of a bridge abutment through three-dimensional numerical modeling using the Rocscience RS3 software, employing micropiles as a reinforcement mechanism. The research is grounded in the growing need to understand the behavior of soil-structure interaction. The three-dimensional numerical model was developed based on the Finite Element Method (FEM), incorporating boundary conditions, constraints, and an analysis of the model's length and width, while maintaining a fixed depth of 10 meters based on the condition of the pile being anchored into the rock and utilizing different mesh types to determine conditions that would neither generate numerical inconsistencies nor bias the model.

The numerical analysis allowed for the estimation of displacements and maximum stresses, as well as the identification of critical stress concentration zones, providing a technical basis for the design and sizing of stabilization solutions. Based on the obtained results, it was possible to quantify the horizontal displacements and stresses generated under each combination of the analyzed parameters and to produce graphical analyses. Through Analysis of Variance (ANOVA), it was possible to observe the variables that most influenced the model. The analyzed horizontal stresses showed low sensitivity to changes in the evaluated parameters; regarding horizontal displacements, however, a greater influence of geometric variables was observed. It is expected that the obtained results contribute to the practical application of numerical methods in stability studies, promoting greater reliability and durability for construction structures.

Keywords: Slope stability, numerical modeling, RS3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Muro em concreto de gravidade.	12
Figura 2 - Processo de introdução de estaca em talude.	14
Figura 3 - Perfil do talude, superfície de ruptura e retroanálise pelo método de Spencer.....	18
Figura 4 - Situação inicial do Talude.	19
Figura 5 - Projeto de estacas.	20
Figura 6 - Modelo simplificado.....	21
Figura 7 - Fluxograma estrutural da metodologia.....	22
Figura 8 - Representação das cargas.	24
Figura 9 - Representação da malha do modelo final.....	26
Figura 10 - Modelo numérico final.....	26
Figura 11 – Parâmetros analisados e localização das queries.	28
Figura 12 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações das tensões horizontais; <i>query 1</i> conforme variações de a, b, c e d.	33
Figura 13 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações das tensões horizontais; <i>query 2</i> conforme variações de a, b, c e d.	34
Figura 14 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações dos deslocamentos horizontais, <i>query 1</i> conforme variações de a, b, c e d.	35
Figura 15 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações dos deslocamentos horizontais, <i>query 2</i> conforme variações de a, b, c e d.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetros nominais e diâmetros dos revestimentos.	15
Tabela 2 - Parâmetros de resistência dos materiais.	23
Tabela 3 - Análise paramétrica.....	27
Tabela 4 - Porcentagem das tensões e deslocamentos das simulações comparados com o modelo referência.	31
Tabela 5 – ANOVA 1, <i>Query</i> 1, Tensão Horizontal.	37
Tabela 6 – ANOVA 2, <i>Query</i> 2, Tensão Horizontal.	38
Tabela 7 – ANOVA 3, <i>Query</i> 1, deslocamento horizontal.	38
Tabela 8 – ANOVA 4, <i>Query</i> 2, deslocamento horizontal.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo geral	10
1.2. Objetivos específicos	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. Estrutura de Contenção.....	11
2.2. Estabilização de taludes e estruturas de contenção.....	11
3. METODOLOGIA	21
3.1. Visão geral da pesquisa	21
3.2. Solo e estacas	23
3.3. Cargas	23
3.4. Geometria do modelo numérico	24
3.5. Análise de malha	25
3.6. Modelo Final.....	26
3.7. Análise paramétrica	27
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
4.1. Simulações numéricas	30
4.2. Análise de variância (ANOVA)	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40

1. INTRODUÇÃO

Os projetos desenvolvidos por engenheiros civis, especificamente aqueles voltados à estabilização de maciços e consolidação de aterros, podem ser de grande complexibilidade para serem concebidos e executados. Com o avanço da tecnologia, essas obras passaram a apresentar maior sofisticação e segurança.

As estruturas de contenção são elementos estruturais cuja concepção, dimensionamento e execução tem como principal função sustentar maciços e aterros. Exerce também funções de suma importância, como evitar deslizamentos, erosões e o colapso do conjunto estrutural (Amâncio, 2022).

A estabilidade de estruturas de contenção de aterros de acesso ou em cabeceiras de pontes influencia a durabilidade das infraestruturas viárias e o conforto do usuário, uma vez que o deslocamento destes aterros pode gerar recalques diferenciais, fissuras e desmoronamentos, impactando o desempenho da obra de arte. Dessa forma, a análise da estabilidade desses elementos estruturais é de suma importância para a segurança das obras e para prevenir tragédias decorrentes de eventos climáticos.

Ações externas, como cargas de tráfego, precipitações, falhas na execução e condições geológicas são algumas causas que geram movimentações em estruturas (Muñoz, 2014). Como consequência, a estrutura de contenção também pode se deslocar, acompanhando essas movimentações induzidas pelos agentes externos. Diante do aumento da frequência e intensidade de chuvas que vem sendo observado hodiernamente, tem-se percebido também um aumento na instabilidade de taludes e em estruturas de contenção (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2016).

Durante muito tempo, os cálculos de estabilidade das estruturas de contenção eram executados de maneira manual. Devido ao avanço da tecnologia e dos softwares, tornou-se possível avaliar com eficácia e maior precisão a interação entre solo e estrutura por meio de modelagens numéricas tridimensionais, permitindo simular diversas situações hipotéticas para melhor compreender a situação real.

Esta pesquisa busca contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos de movimentação nos encontros de pontes e aterros, favorecendo obras mais seguras e eficientes, além de reduzir falhas estruturais ao longo do tempo.

A metodologia abrange a confecção de uma modelo numérico no software Rs3 baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), para realizar as modelagens de malha, da geometria, e as análises das condições de estabilidade do conjunto solo-estrutura em três dimensões, levando-se em consideração características geométricas, geotécnicas e estruturais do conjunto. Após foram feitas simulações variando parâmetros espaciais e geométricos. Com as simulações foi possível verificar a influência e a combinação desses parâmetros, a fim de analisar se a solução proposta é vantajosa e qual combinação entre os parâmetros é a mais benéfica.

1.1. Objetivo geral

Avaliar a estabilidade de uma estrutura de contenção a partir da adição de estacas em um talude de acesso de ponte à montante.

1.2. Objetivos específicos

Avaliar a ocorrência de deslocamentos estruturais na interface entre o encontro da ponte e o aterro.

Analisar o comportamento do conjunto sob diferentes configurações de espaçamento transversal e longitudinal entre estacas.

Verificar os valores de deslocamento e tensão no conjunto solo-estrutura variando a distância do grupo de estacas até a interface da estrutura de contenção.

Quantificar o impacto da variação do diâmetro das estacas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico necessário para compreender os conceitos, características, fundamentos, métodos relacionados à estabilidade de taludes e estruturas de contenção. Serão apresentados conceitos de estrutura de contenção, tipos de elementos estruturais com ênfase no uso de estacas como solução de estabilização, além das metodologias analíticas e exemplo de casos que utilizaram estacas para estabilização de estruturas de contenção e taludes.

2.1. Estrutura de Contenção

As estruturas de contenção são elementos de suma importância nos projetos de engenharia civil, especialmente em obras localizadas em terrenos inclinados e/ou sujeitos a movimentações. São geralmente utilizadas em encostas, cortes de rodovias, aterros, obras de contenção urbana e encontro de pontes, atuando como sustentação essencial para a segurança da infraestrutura adjacentes (Neiva et al., 2014), tendo como principal função impedir deslocamentos advindos de pressões laterais ou forças externas.

De acordo com Barros (2008), as estruturas de contenção do tipo gravidade (Figura 1) garantem sua estabilidade por meio do próprio peso e, em alguns casos, fazem a utilização da massa do solo incorporado a sua estrutura. Geralmente empregam-se materiais e formatos diversificados, podendo ser compostos com concreto ciclópico, pedras argamassadas, solo reforçado e gabiões. O autor também afirma que sua principal vantagem é a facilidade em ser executado

2.2. Estabilização de taludes e estruturas de contenção

O aumento das obras de infraestrutura em regiões de solos instáveis torna rigorosa a adoção de técnicas eficazes para garantir a segurança de taludes e estruturas de contenção. Segundo Campos et Al. (2016), os taludes são superfícies com uma certa inclinação resultante de escavações ou do terreno natural. Tanto taludes quanto estruturas de contenção estão sujeitos a escorregamentos e rupturas, sendo necessário realizar uma estabilização adequada e eficiente a fim de conter a estrutura e manter o seu pleno funcionamento.

Figura 1 - Muro em concreto de gravidade.



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2010).

Esta estabilização pode ser realizada utilizando-se ancoragens, pregagens, colunas de britas, enrocamento, estacas etc. (Nunes, 2013). De acordo com Filho e Virgile (1998) taludes naturais ou taludes de corte são compostos de planos inclinados de formação terrosa, rochosa ou mista, tendo origem através de etapas geológicas e geomorfológicas, que podem sofrer alterações geradas por ações humanas, como retirada de vegetação, sobrecargas, cortes.

Segundo Neiva (2014), estruturas de contenção estão presentes em projetos de pontes, estradas, canalizações, saneamento e estabilização de encostas, e são inicialmente realizadas pela adição de armadura ou elementos estruturais, que garantem rigidez diferente do terreno que sustentará.

A instabilidade de taludes representa um risco significativo à segurança dos usuários e à durabilidade dessas obras. De acordo com isso, a utilização de medidas de estabilização adequadas desempenha papel imprescindível para garantir o funcionamento contínuo da estrutura e prevenir falhas que venham causar acidentes ou inviabilidade de utilização (Nunes, 2013). Também como afirmam Filho e Virgile (1998), taludes podem ser afetados por intervenções humanas, o que reforça a necessidade de um estudo prévio bem-feito.

Conforme estabelece a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), a estabilização de encostas ou taludes consiste na adesão de medidas

capazes de aumentar a resistência do maciço e modificar as condições que favorecem a instabilidade, abrangendo fatores relacionados à morfologia, geologia e hidrogeologia do terreno. Dessa forma, a ABGE enfatiza que o primeiro passo para qualquer projeto de estabilização eficiente é uma caracterização detalhada desses condicionantes, permitindo compreender os mecanismos de ruptura, os materiais envolvidos e os agentes deflagradores, de modo a orientar a seleção da solução mais adequada. É importante salientar que o uso de elementos estruturais com maior rigidez, como estacas, contribui para reforçar áreas com baixa resistência geotécnica (Neiva, 2014).

2.2.1. Principais elementos estruturais empregados

Diante dos diversos métodos disponíveis para realizar a estabilização de taludes, a utilização de estacas se destaca como uma solução eficiente na engenharia geotécnica. As estacas são empregadas em situações onde há deslocamentos na estrutura de contenção e quando existem agravamentos como limitação de espaço. D'Appoloina (1977) e Hassiotis (1997) defendem que uma das vantagens da utilização de estacas escavadas é a instalação, realizada sem perturbação significativa do equilíbrio do talude; um benefício essencial para evitar o agravamento da instabilidade (Figura 2).

Na visão de Chow (1966) as estacas atuam como elementos de contenção passivos, onde os movimentos do solo instável induzem nelas forças laterais que resistem a esses movimentos e aumentam o fator de segurança do talude. Porém Chow (1966) também afirma que um dos principais problemas de projeto dessas estacas é a determinação dos momentos de flexão e forças de cisalhamento nelas gerados, causados pelo movimento do talude.

Dentre os tipos mais utilizados podem ser citadas as estacas escavadas, raiz, microestacas e Strauss. A escolha dependerá das características do terreno, geometria, carregamento solicitante, (Hassotis, Chameau, Gunaratne, 1997).

Figura 2 - Processo de introdução de estaca em talude.



Fonte: Brandner (2010).

Segundo Velloso (2010) estacas escavadas são denominadas estacas executadas por uma escavação ou perfuração no solo, que posteriormente é preenchida com concreto e podem apresentar base alargada realizadas com instrumentos especiais. Velloso (2010) também afirma que as superfícies escavadas podem apresentar suporte por meio de revestimento recuperável ou fluido estabilizante, tendo em vista que a escavação sem suporte em terrenos argilosos só é indicada acima do lençol freático deprimido ou natural. As estacas podem ser realizadas em inúmeras condições de terreno, podendo ter comprimentos maiores que 50 m e seção transversal retangular ou circular de até 2,5 m de diâmetro. As vantagens da utilização dessas estacas segundo o autor são, admissão de cargas elevadas, boa adaptação á diferentes tipos de terrenos, compreensão das condições do subsolo ao longo da escavação.

De acordo com a NBR 6122 (2019), estaca-raiz trata-se de uma estrutura moldada no local, onde na perfuração é utilizado um revestimento integral no solo por meio de tubos metálicos fragmentados de 1,0 a 1,5 m de comprimento. Após a perfuração, é adicionada argamassa composta de cimento e areia e introduzida a armadura em todo o comprimento da estaca. Os diâmetros usuais dessas estacas podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Diâmetros nominais e diâmetros dos revestimentos.

Diâmetro nominal da estaca	mm	150	160	200	250	310	400	450
Diâmetro mínimo externo do tubo de revestimento	mm	127	141	168	220	273	355	406

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 6122 (2019).

No ponto de vista de Velloso (2010) esse tipo de estaca possui características que viabilizam sua aplicação onde outras soluções não se adequam, como a ausência de vibrações e impactos, possibilidade de serem instaladas com equipamentos de pequeno porte e utilizar ferramentas que são capazes de atravessar obstáculos como estruturas de concreto e rochas.

Conforme afirma Nunes (2013), classificadas como uma solução de fundação profunda as microestacas são elementos delgados estruturais que transferem as cargas aplicadas majoritariamente por atrito lateral desenvolvido entre a calda de cimento e o solo, levando em consideração que a resistência de ponta é geralmente reduzida. Podem desempenhar diferentes funções dependendo da sua tipologia, sendo, no geral, utilizadas para reforçar blocos de solo ou transferir cargas até camadas mais profundas. As microestacas possuem diâmetro reduzido, geralmente igual ou inferior a 300 mm, apresentando comprimentos que variam entre 15 e 30 m. Sua execução pode ocorrer por moldagem *in loco*, por meio de injeção de calda de cimento, sendo armadas com barras ou tubos de aço e perfis metálicos tipo H. Há também a possibilidade de serem cravadas mecanicamente.

A execução da estaca moldada *in loco* necessita de equipamentos simples, como tripé com guincho, piteira, tubos de revestimento e um pilão pequeno (Danziger, 2021). O autor afirma que a qualidade da estaca depende da equipe de trabalho, também confirma que essa estaca pode ser armada com ferragem longitudinal e estribos.

A fim de tratar a complexidade da interação solo-estaca, várias metodologias analíticas foram desenvolvidas. Primeiramente surgiram abordagens teóricas como o método de Ito e Matsui (1975), onde se estimam as forças laterais sobre uma fileira de estacas modelando o fluxo plástico do solo através delas e não se consideram as características das estacas. Posteriormente este método foi estendido para estacas

flexíveis. Paralelamente modelos numéricos como o proposto por Chow (1966), utilizam elementos de viga finita para a modelagem das estacas.

O método de Chow (1966) simula a reação do solo em estacas individuais através do módulo de reação do subleito e considera a interação solo-estaca utilizando a teoria da elasticidade. Uma observação importante é que o efeito de grupo entre as estacas é benéfico, resultando na redução dos momentos de flexão e forças de cisalhamento. O dimensionamento envolve a escolha do fator de segurança desejado para o talude (geralmente de 1,2 a 1,5). O cálculo da força lateral de projeto que cada estaca deve resistir leva em consideração características da estaca, como, por exemplo, o diâmetro da estaca, o espaçamento entre elas e a localização da fileira de estacas no talude. A escolha de cabeças de estacas restritas é recomendada para diminuir as forças de cisalhamento e momentos de flexão atuantes. Por fim, prefere-se a utilização de estacas perfuradas por não causarem vibrações excessivas e permitirem confirmação da profundidade de inserção, (Chow, 1966).

2.2.2. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) teve seu desenvolvimento consolidado a partir da década de 1960 e, com o avanço das tecnologias computacionais, tornou-se amplamente empregado na análise de estruturas com geometrias variadas, compostas por diferentes materiais e submetidas aos mais diversos tipos de carregamento. A evolução dos recursos de modelagem foi tão expressiva que muitos métodos tradicionais passaram a ser pouco utilizados, dado que o MEF oferece maior precisão, flexibilidade e capacidade de representação de sistemas complexos, (Duarte, 2016).

No Método dos Elementos Finitos (MEF), o domínio físico é discretizado em um conjunto de elementos com comportamento matematicamente definido a partir de suas propriedades mecânicas e características geométricas. Esses elementos são interligados por nós, nos quais ocorrem as interações e transmissões de esforços. Como essas ligações podem ser feitas em qualquer formato, o método apresenta-se muito eficiente para a análise de geometrias complexas. Além disso, cada elemento pode receber propriedades diferentes, o que possibilita representar com precisão maciços heterogêneos ou com variações de materiais, (Velloso e Lopes, 2010).

Matematicamente, a essência do MEF reside na transformação das equações diferenciais que regem o comportamento do contínuo em um sistema de equações algébricas lineares, governado pela relação fundamental $[K]x\{u\} = \{F\}$ onde $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{u\}$ o vetor de deslocamentos e $\{F\}$ o vetor de forças. Para obter os resultados no interior dos elementos, utilizam-se funções de interpolação que aproximam o campo de deslocamentos contínuo a partir dos valores discretos nos nós (Bathe, 2014).

A aplicação prática do método estrutura-se nas etapas de pré-processamento (modelagem e malha), solução (cálculo matricial) e pós-processamento (análise de resultados). Um aspecto crítico nesta sequência é a convergência da malha: como o método fornece uma solução aproximada, o refinamento da malha em regiões de gradientes elevados é vital para garantir que os resultados numéricos convirjam para a solução física real (Soriano, 2003)."

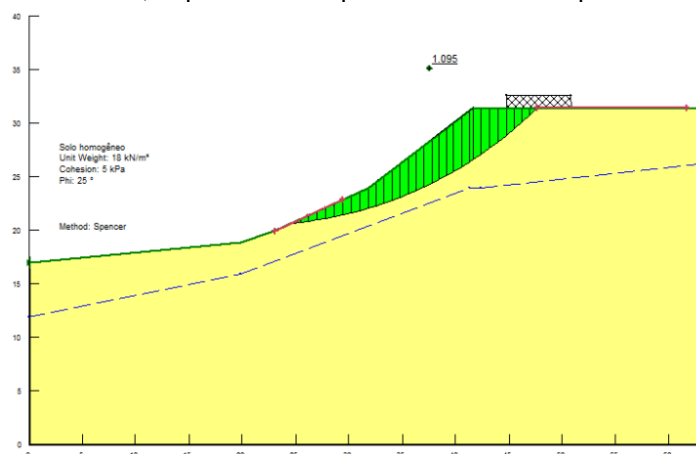
2.2.3. Exemplos práticos de aplicação de estudos geotécnicos

a) Estabilização de talude às margens de rodovia federal: implantação de cortina de estacas (Silva, 2013)

O caso refere-se a um talude localizado às margens de uma Rodovia Federal na região da Serra Fluminense, onde foram identificados vestígios de instabilidade à jusante da encosta (surgimento de trincas ao longo do pavimento). O talude apresentou superfície de ruptura com geometria circular e o valor do raio foi determinado fazendo o uso do software SLOPE/W. Por meio de retroanálise foram obtidos dados para realizar a determinação do fator de segurança pelo método de Spencer no valor o FS de 1,095 (Figura 3).

Propôs-se a adição de uma cortina de estacas escavadas junto ao acostamento da pista com diâmetros e espaçamentos entre as estacas de, respectivamente, 41 cm e 80 cm. Após a finalização do estaqueamento forma adicionadas duas ancoragens ligadas à cortina de estacas através de vigas metálicas. Utilizando-se a metodologia de NAVFAC (1986), foi obtido um novo fator de segurança de 1,58. Além disso pelo método de Brinch Hansene& Lundegren (1960) foi obtido o fator de segurança de 1,40 levando em consideração o esforço cisalhante da estaca.

Figura 3 - Perfil do talude, superfície de ruptura e retroanálise pelo método de Spencer.



Fonte: Silva (2013).

b) Solução geotécnica para estabilização de encosta em região alpina, (Brandner, 2010)

Este estudo de caso realizado por Brandner (2010) tratou de uma instabilização ocorrida em uma estação de teleférico localizado na Áustria, onde a construção da estrutura foi realizada em uma encosta alpina que apresentava condições climáticas severas. Em 1990 foi realizada uma fundação para a construção do teleférico. Contudo, nove anos após, a região sofreu um inverno rigoroso e chuvas intensas, ocasionando em um deslizamento de massa que comprometeu a estabilidade estrutural do teleférico. Diante disso foi proposta a reparação com a adição de mais microestacas e fundação de concreto.

A encosta manteve-se monitorada após o incidente e os registros apontaram que ainda ocorriam deslocamentos na ordem de 30 mm por ano. Em outubro de 2005, foram realizados outros monitoramentos dos, onde não foi observado aumento significativo no deslocamento. Porém, em outubro de 2006, uma verificação aferiu que o movimento havia aumentado para 300 mm na horizontal e 180 mm na vertical, sendo assim foi solicitado um projeto de estabilização pelas autoridades austríacas.

A análise de estabilidade resultou em um fator de segurança de 1 (instabilidade iminente), diante da qual foram propostas as soluções para atingir um fator de segurança mínimo de 1,4. Propôs-se a utilização de cinco muros de microestacas (cerca de 5.200 metros) perfuradas até 15 m de profundidade conectadas a lajes de concreto. Também foi considerado um sistema de drenagem, muros de contenção, barreiras de proteção com telas metálicas e grampos.

A obra de estabilização começou em julho de 2007 e enfrentou problemas logísticos devido ao difícil acesso e ao terreno íngreme. Após sua conclusão, a movimentação foi cessada e o teleférico manteve-se em operação evitando prejuízos financeiros.

c) Consolidação de deslizamento avançado em São Bernardo do Campo – SP, (Sousa et al., 2019)

Na cidade de São Bernardo do Campo, SP, um talude com estágio avançado de deslizamento (Figura 4), apresentava riscos imediatos às edificações vizinhas e aos moradores dessas edificações. Com a chegada do período de altas precipitações e a falha no sistema de drenagem existente, a situação se agravou e tornou a intervenção ainda mais urgente, pois a água se acumulava no interior do maciço, elevando a poropressão e, conseqüentemente, a instabilidade

Figura 4 - Situação inicial do Talude.



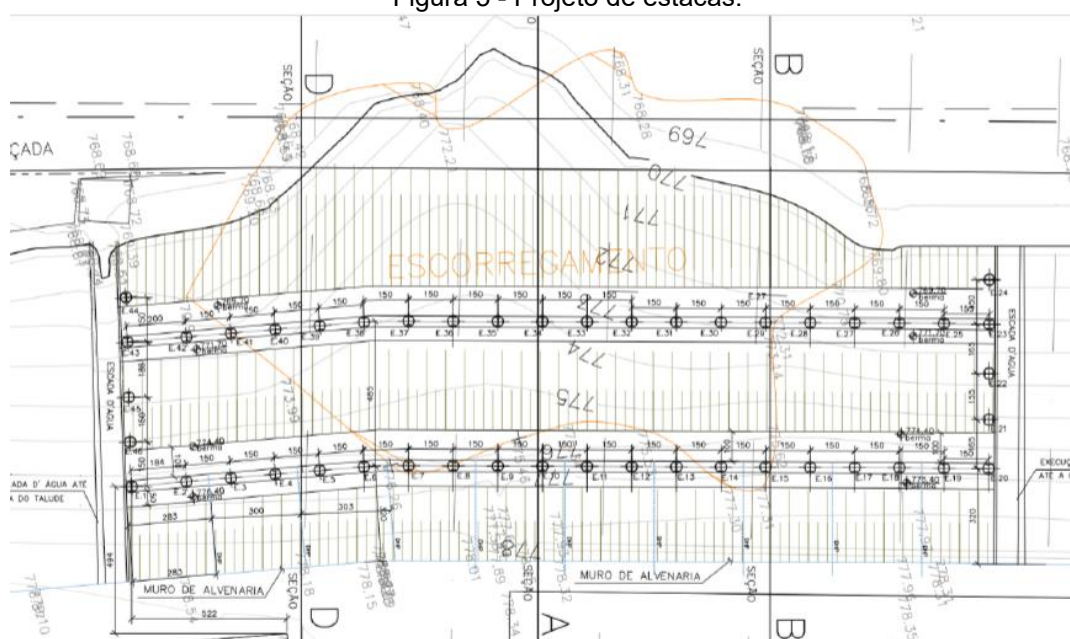
Fonte: Sousa et al. (2019).

A solução escolhida envolveu a execução de estacas Strauss, substituindo a armadura convencional por perfis metálicos, e a construção de um muro de alvenaria interligado nos perfis. A escolha da estaca estava relacionada com a inviabilidade de utilização de equipamentos maiores, devido à debilidade do terreno. O projeto de intervenção levou em consideração que as estacas trabalhassem predominantemente à flexão, resistindo a esforços horizontais, o que demandou um consumo de aço elevado. O projeto foi composto por 46 estacas dispostas em duas linhas, em cotas

distintas, com diâmetro de 38 cm (Figura 5), porém posteriormente esses diâmetros foram aumentados a fim de facilitar o encaixe dos perfis metálicos dentro das estacas, os autores não apresentam o diâmetro final utilizado.

Essa obra apresentou grande grau de dificuldade devido à insuficiência de espaço de trabalho. Como o maciço apresentava movimentações, as intervenções realizadas foram mínimas possíveis.

Figura 5 - Projeto de estacas.



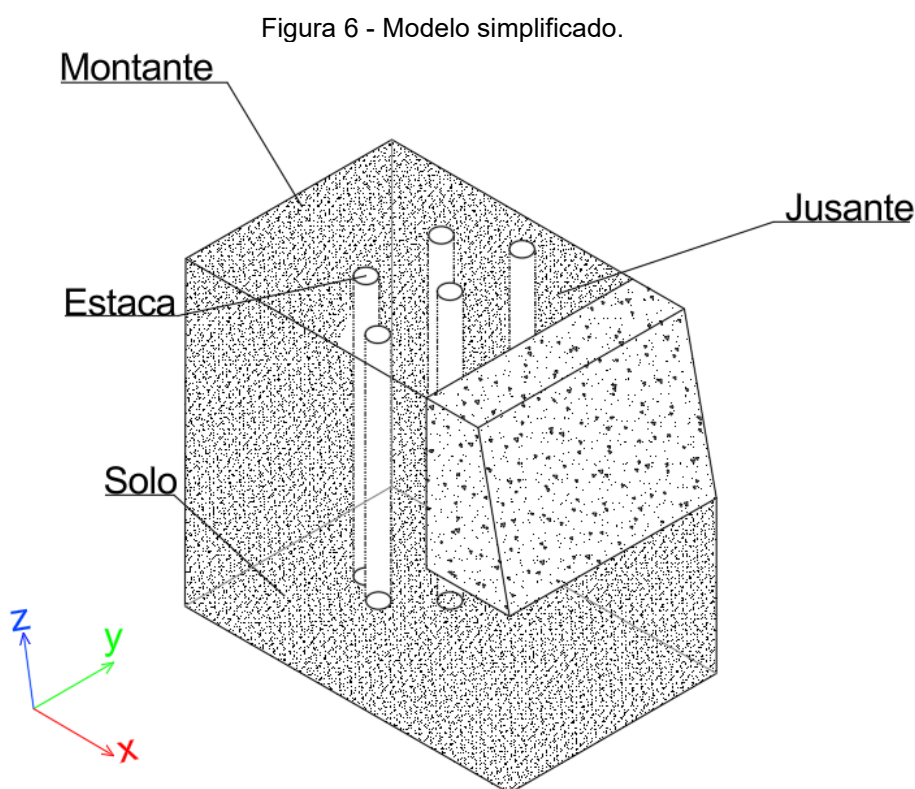
Fonte: Sousa et. Al. (2019).

3. METODOLOGIA

3.1. Visão geral da pesquisa

Neste trabalho, foi estudada a utilização de estacas para estabilização de estruturas de contenção por meio de software de integração numérica. O modelo simplificado em análise pode ser observado na Figura 6. Na

Figura 7 é possível observar o fluxograma de trabalho da pesquisa.



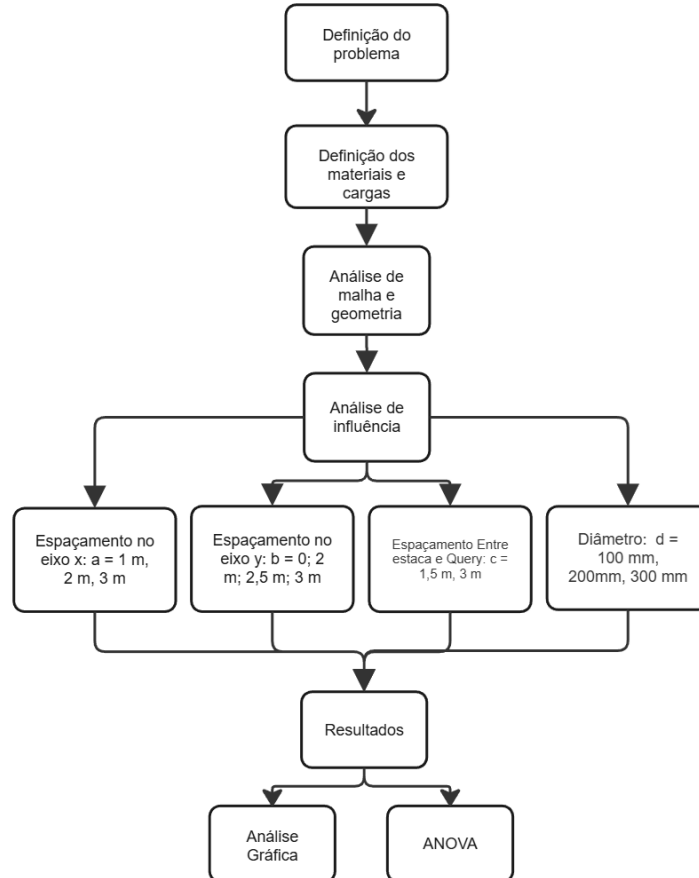
Fonte: Do autor (2025).

As análises numéricas foram realizadas no software Rocscience 3 (Rs3), desenvolvido pela Rocscience. Trata-se de uma ferramenta para modelagem tridimensional de problemas geotécnicos, apresentando versatilidade em consideração a geometria, materiais e cargas. O software utiliza o Método dos Elementos Finitos para simular tensões e deslocamentos/deformações, assim permitindo relacionar o comportamento do solo com estruturas associadas.

Na etapa inicial, foi realizada a determinação dos parâmetros do solo, das estacas e das cargas aplicadas no modelo. Após, foi executado um estudo

geométrico, onde foram definidas as dimensões do modelo, de forma que não houvesse efeito de borda, evitando distorções nos resultados das simulações. Para isso, foram testadas diferentes dimensões na longitudinal, transversal e profundidade.

Figura 7 - Fluxograma estrutural da metodologia.



Fonte: Do autor (2025).

Em seguida, foi realizado um estudo de malha de forma a minimizar possíveis inconsistências numéricas. Utilizou-se a malha (gradded) e elementos tetraédricos de 4 nós, refinada até a obtenção da convergência numérica dos deslocamentos e tensões.

Definiram-se, assim, as condições de contorno, restringindo a movimentação das faces laterais do modelo em x e y e da base do modelo em x, y e z. As determinações das dimensões do modelo e malha foram consideradas satisfatórias quando a diferença dos valores de tensão e deslocamentos horizontais pela profundidade foram menores que 5% entre uma alteração e outra.

O modelo não compreende uma estrutura de contenção física. Ao invés disso, foram utilizados sensores de medição posicionados exatamente na região correspondente à interface entre a estrutura de contenção e o maciço de solo, de modo a captar as tensões e deslocamentos que ocorreriam nesse contato. As queries foram configuradas com 11 pontos de monitoramento, distribuídos a intervalos de 1 m, com o objetivo de registrar de forma contínua as variações de tensões e os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade analisada.

3.2. Solo e estacas

Para o solo, foi utilizado modelo constitutivo Mohr-Coulomb referentes a uma Areia Siltosa. Já para as estacas, utilizou-se o modelo constitutivo linear-elástico. Os parâmetros de resistência do solo e do concreto foram obtidos por meio da literatura (Tabela 2). Como os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) não interferem nas análises tensão-deformação, foram inseridos parâmetros usuais (35 graus e 10,5 kPa).

Tabela 2 - Parâmetros de resistência dos materiais.

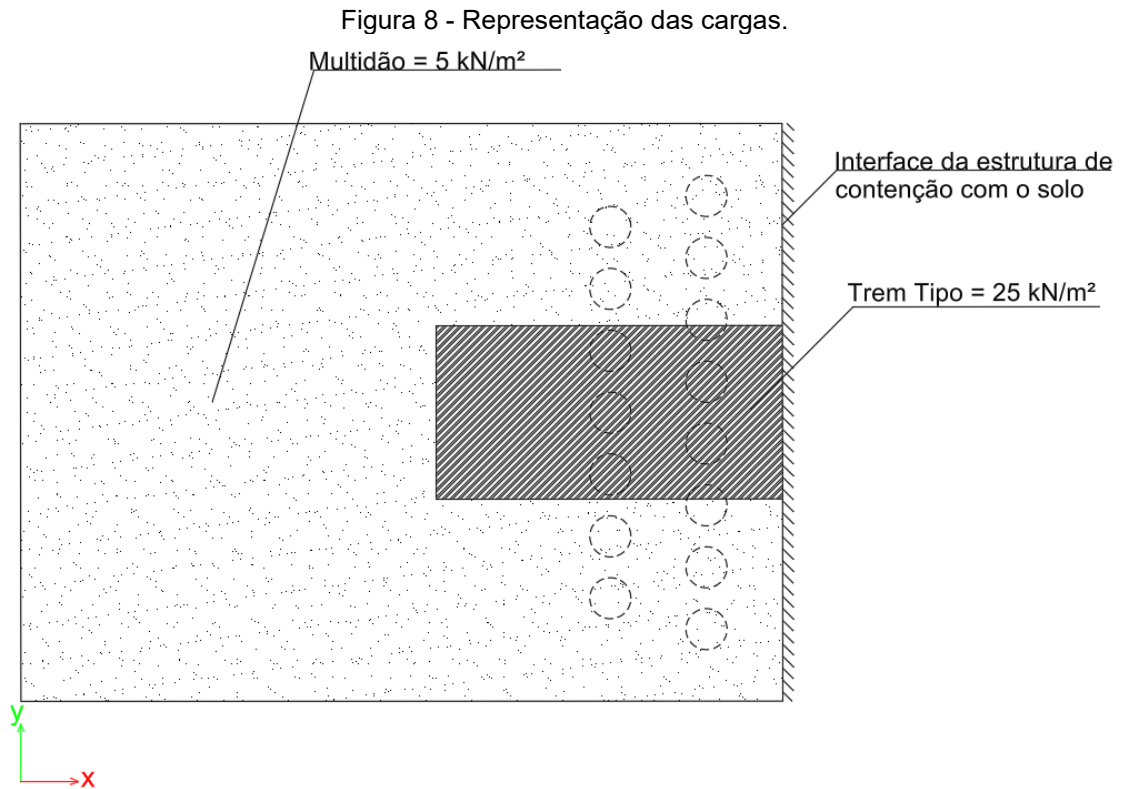
Material	Peso Específico (kN/m ³)	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade (kPa)
Areia Siltosa	17 ¹	0,3 ¹	5.000 ¹
Concreto	23 ^{2,3}	0,2 ^{2,3}	3.800.000.000 ^{2,3}

Fonte: ¹Bowles (1997), ²Nunes (2013), ³Federal Highway Administration (2005).

3.3. Cargas

Para a determinação do carregamento utilizou-se a NBR 7188/2013 – “Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas”, (ABNT, 2013). Dessa maneira foram utilizados dois carregamentos. O primeiro carregamento era referente a um veículo tipo (TB-450) de 450 kN, com 6 m de comprimento e 3 m de largura (totalizando assim uma área de 18 m²), seis rodas, onde cada roda tem uma carga concentrada de 75 kN. Fez-se uma simplificação da aplicação da carga, onde as cargas concentradas das 6 rodas foram distribuídas na área referente ao veículo tipo, resultando, assim, num carregamento distribuído de 25 kN/m². Este carregamento foi aplicado na posição mais desfavorável do modelo (trem

tipo encostado na interface da estrutura de contenção). O segundo carregamento trata-se da carga de multidão com valor de 5 kN/m^2 uniformemente distribuída em torno da carga do veículo tipo (Figura 8).



Fonte: Do autor (2025).

3.4. Geometria do modelo numérico

Foi avaliada a influência das dimensões em x (comprimento) e y (largura) do modelo. A dimensão em z (profundidade) foi fixada em 10 metros considerando que as bases das estacas estão ancoradas em rocha. Para isso, foi feita a restrição dos alicerces das estacas em x, y e z.

Devido a inconsistências numéricas geradas com a inserção das estacas no modelo, foi realizada a análise das dimensões inicialmente, sem as estacas. Constatou-se que a dimensão na direção do eixo montante das estacas que melhor se encaixou no modelo foi de 10 m e a dimensão na direção do eixo x à jusante foi 30 m, totalizando 40 m de comprimento. Após, foi feita a análise no eixo y que resultou na largura de 40 m.

Posteriormente adicionaram-se as estacas e assim testaram-se as dimensões de 10 e 20 m na direção do eixo x à montante e de 30 e 40 m na direção do eixo x à

jusante. Observou-se que as dimensões de 10 m à montante e 30 m à jusante foram suficientes para evitar interferências nos resultados, da mesma maneira a dimensão de 40 m no eixo y foi escolhida.

3.5. Análise de malha

A avaliação da malha também foi inicialmente realizada em um modelo sem estacas. Foram testadas diversas configurações de malha graded: (i) elementos variando entre 0,05 m e 0,3 m; (ii) de 0,1 m a 0,6 m; (iii) de 0,2 m a 1,2 m e, por fim, (iv) de 0,3 m a 0,5 m. A última configuração foi selecionada, por apresentar comportamento semelhante às malhas mais finas, porém com menor custo computacional.

Após essa definição preliminar, as estacas foram inseridas no modelo e novas malhas foram analisadas: (i) elementos de 0,1 m a 0,4 m, com as quatro faces laterais refinadas para um tamanho máximo de 1,5 m e extend de 2 metros, de modo a manter malha grosseira nos limites e detalhada na região central; (ii) elementos de 0,2 metros a 0,8 metros, adotando o mesmo refinamento lateral (iii) elementos de 0,1 metros a 0,4 metros, incluindo uma zona de refinamento no centro do modelo e (iv) elementos de 0,2 m a 0,7 m, mantendo o padrão de refinamento lateral (Figura 9). Esta última apresentou desempenho compatível com a malha de 0,3 m a 0,5 m, mas com menor demanda computacional, sendo, portanto, a escolhida para as análises com estacas.

Figura 9 - Representação da malha do modelo final.

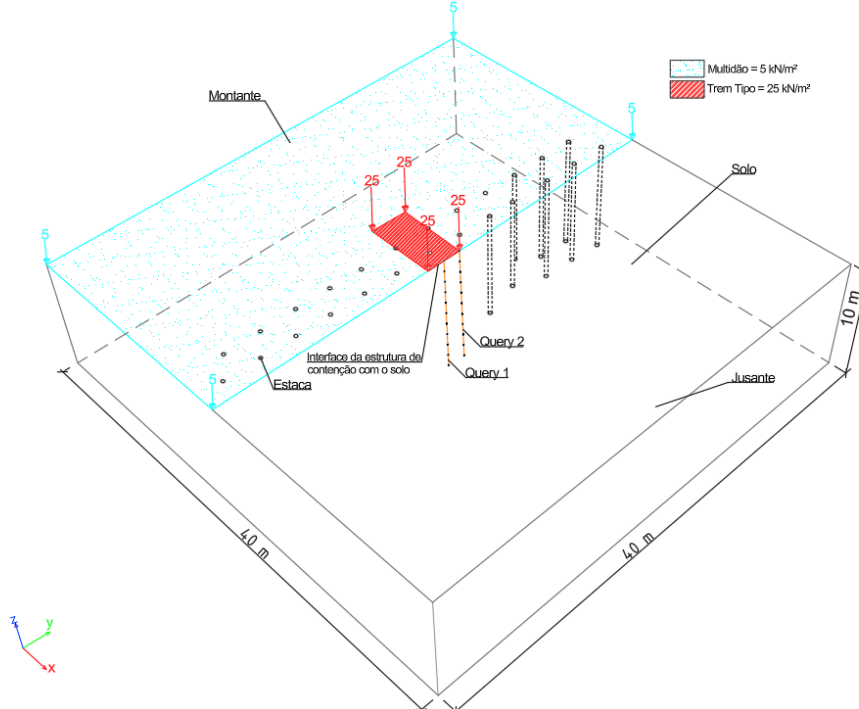


Fonte: Do autor (2025).

3.6. Modelo Final

O modelo final é apresentado na Figura 13, onde é possível observar os carregamentos, as queries e as estacas.

Figura 10 - Modelo numérico final.



Fonte: Do autor (2025).

3.7. Análise paramétrica

As simulações foram realizadas alterando os seguintes parâmetros, explicitados na Tabela 3 e representados na Figura 11a:

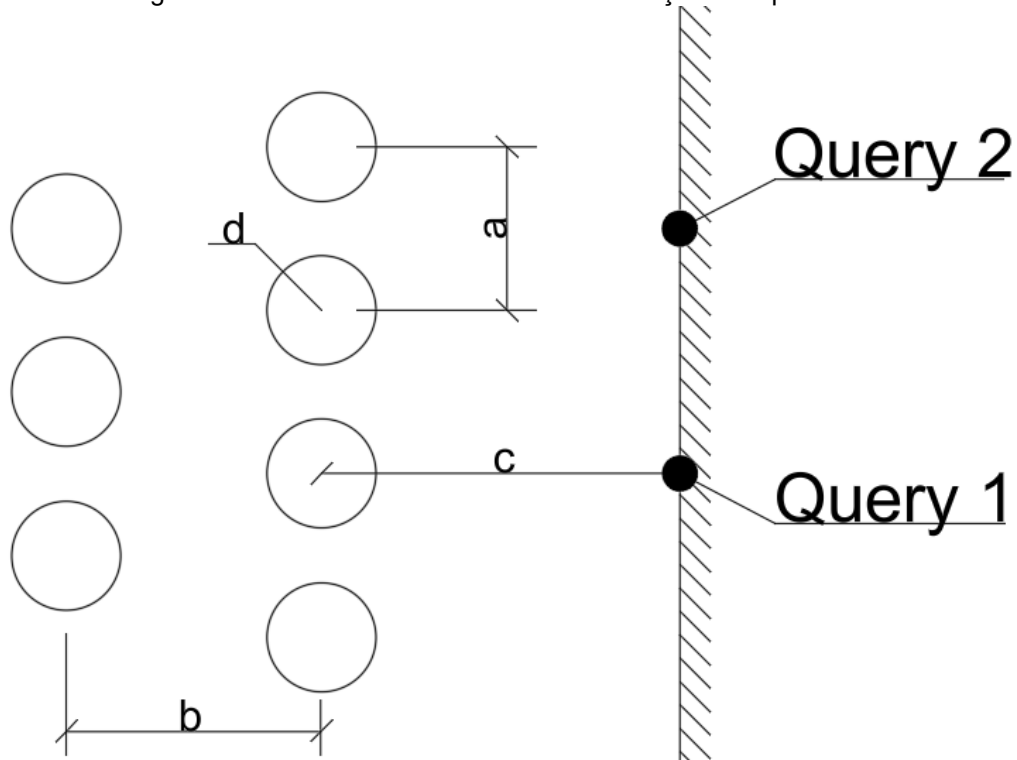
Tabela 3 - Análise paramétrica.

Parâmetro	Valores
Espaçamento transversal entre estacas (a)	1 m, 2 m, 3 m
Espaçamento longitudinal entre estacas (b)	0 m, 2m, 2,5m, 3m
Distância entre o eixo das estacas e <i>queries</i> (c)	1,5 m, 3 m
Diâmetro das estacas (d)	100 mm, 200 mm, 300 mm

Fonte: Do autor (2025).

A combinação de todos os parâmetros analisados resultou em 64 simulações, além de uma simulação adicional sem a presença das estacas, permitindo a realização de um estudo paramétrico sobre o desempenho dessas estruturas em diferentes configurações geométricas. Para cada simulação, foram extraídos os valores de tensões e deformações horizontais, obtidos por meio de duas queries de coleta: a primeira localizada atrás da estaca central (query 1) e a segunda a 1,5 metros em y da primeira query, (query 2) (Figura 11).

Figura 11 – Parâmetros analisados e localização das queries.



Fonte: Do autor (2025).

Os dados foram organizados e tratados em uma planilha no Excel, servindo de base para a análise comparativa dos resultados, esses dados referentes a tensões e deslocamentos horizontais foram normalizados tomando-se como referência os dados do modelo sem a presença de estacas, considerado o modelo-referência. Essa normalização permite quantificar de forma mais clara, a redução das tensões e deslocamentos diante da inserção das estacas no sistema e da variação dos parâmetros. Para isso, os valores obtidos nas simulações com estacas foram divididos pelos correspondentes valores do modelo de referência. Foram construídos gráficos de barras com os quatro parâmetros e o respectivo valor dos resultados gerados. Também foi realizada através do *software* Statistica uma análise de variância (ANOVA), afim de se identificar quais parâmetros apresentam maior impacto sobre o valor das tensões e deslocamentos horizontais.

Optou-se por analisar os dados apenas na profundidade de 5 m, correspondente à região intermediária do fuste, pois os resultados de tensão e

deslocamento horizontal obtidos junto ao topo da estaca e próximos a base apresentaram maior variabilidade e inconsistências em relação ao comportamento esperado. No trecho superficial essa variabilidade pode estar associada a questão de confinamento; já nas proximidades da ponta das estacas, ocorre concentrações de tensões.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Simulações numéricas

O conjunto de dados inicial contou com 72 simulações. Deste montante, 64 obtiveram convergência numérica satisfatória. As 8 simulações restantes foram desconsideradas por apresentarem inconsistências nos dados de saída. A seguir são apresentados os comparativos entre as tensões e os deslocamentos horizontais das queries 1 e 2 com a variação dos parâmetros: espaçamento Vertical entre estacas (a), espaçamento Horizontal entre estacas (b), distância entre o eixo das estacas e queries (c) e diâmetro das estacas (d) (Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15). Tanto os valores de tensões quanto de deformações foram plotados em relação ao modelo referência sem estacas.

Os valores observados de tensões e deslocamentos entre os sensores de medição resultaram em valores muito próximos.

A variação dos parâmetros diante das tensões horizontais na profundidade de 5 metros nas duas *queries* resultou em pequenas variações entre as simulações realizadas, ao observar os gráficos dados Figura 12 e Figura 13 nota-se que o valor das relações entre a simulação ref. e as simulações permanece praticamente constante entre os valores de (a), a variação de (b) também se demonstrou não ser um fator significativo para a redução nas tensões horizontais. O parâmetro (c) e (d) seguem a mesma lógica das anteriores, variações de $c = 1,5 \text{ m}$, $c = 3,0 \text{ m}$ ou $d = 100 \text{ mm}$, $d = 200 \text{ mm}$, $d = 300 \text{ mm}$, não alteram expressivamente os valores de tensão, em todos os gráficos permanecem na faixa de 0,92, 0,94.

Na Figura 14 e Figura 15 é possível observar os valores de deslocamentos horizontais resultantes pelas combinações dos parâmetros, onde quanto menor o espaçamento entre estacas na transversal (a), menor a relação do modelo referência com as simulações, ou seja os deslocamentos reduzem com um valor de (a) menor, isso é confirmado observado a primeira linha de gráficos da Figura 14. O espaçamento longitudinal das estacas (b), quando $b = 0$ (apenas uma fileira de estacas) é menos eficaz na diminuição dos deslocamentos horizontais quando o espaçamento entre estacas na transversal (a) é igual a 3 m, devido ao menor número de estacas inseridas e por não apresentar a composição de estacas, que pode ser observada com $b = 2,5 \text{ m}$ por exemplo. Valores de $b = 2 \text{ m}$, $2,5 \text{ m}$ apresentam em média melhor desempenho

na diminuição dos deslocamentos horizontais. Para diâmetros de 200 mm ou 300 mm a diferença nos valores entre $b = 0$ e $b = 2$ m; 2,5 m; 3 m é muito pequena.

A variável (c) apresenta a menor influencia, analisando os gráficos onde $a = 1$ m; $c = 1,5$ m e $a = 1$ m; $c = 3$ m nota-se a pequena diferença entre os valores de deslocamento.

O diâmetro (d) é a variável que mais influencia na redução do deslocamento horizontal, observado qualquer um dos gráficos individualmente, é possível observar queda nos valores de deslocamento ao analisar o eixo X (de 100 mm para 200 mm e depois 300 mm)

A Tabela 4 apresenta a taxa de variação percentual entre o modelo referencia e as simulações.

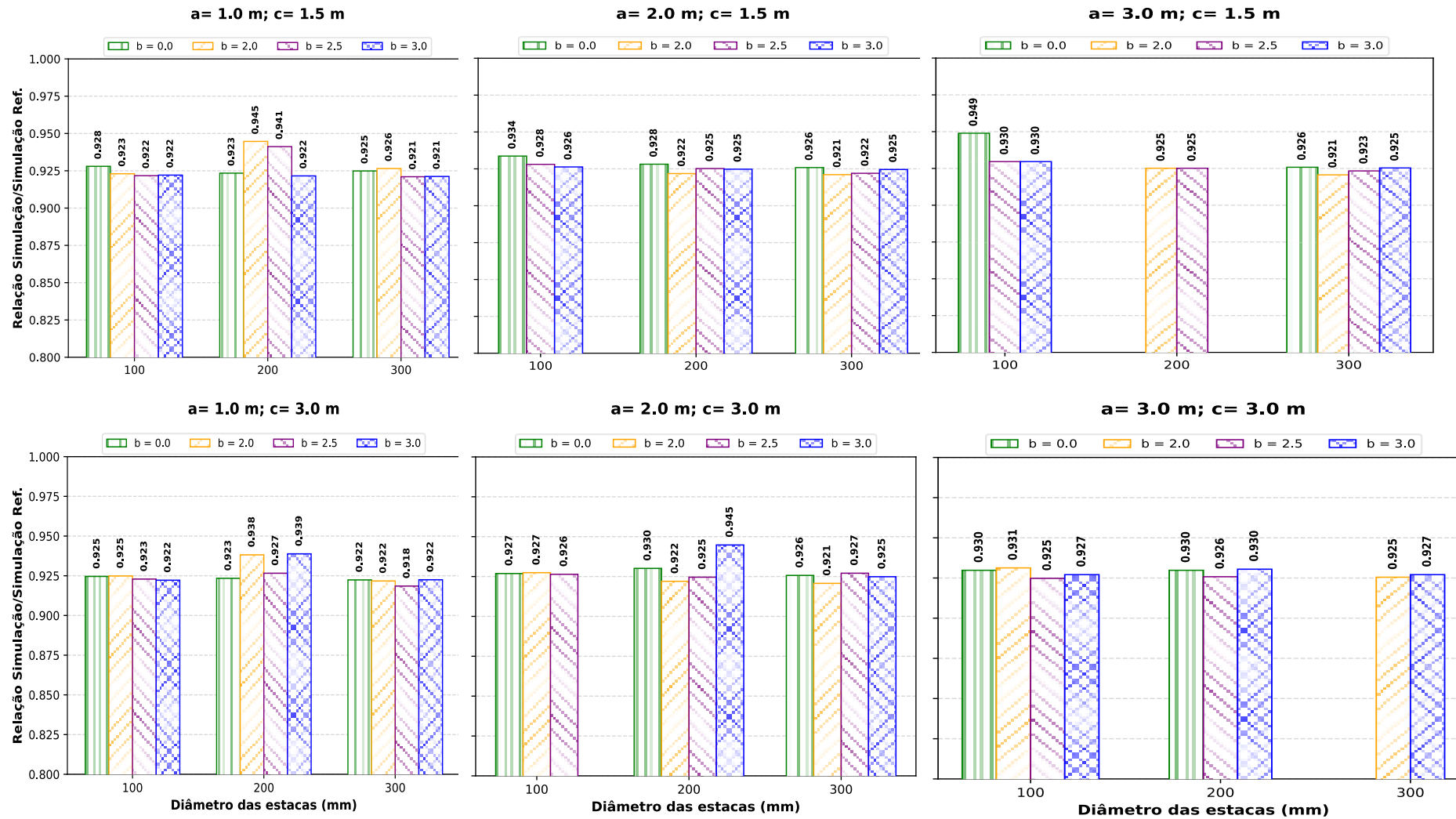
Tabela 4 - Porcentagem das tensões e deslocamentos das simulações comparados com o modelo referência.

a	b	c	d	Tensões		Deslocamentos	
				Query 1 (%)	Query 2 (%)	Query 1 (%)	Query 2 (%)
0	0	0	0	100	100	100	100
1	2	1,5	100	7,70	6,60	81,30	80,71
1	2	1,5	200	5,53	4,93	82,50	81,91
1	2	1,5	300	7,35	6,49	94,74	94,63
1	2	3	100	7,51	6,51	73,87	73,74
1	2	3	200	6,18	5,45	83,10	81,58
1	2	3	300	7,83	6,49	83,62	83,81
1	2,5	1,5	100	7,83	6,72	82,10	81,66
1	2,5	1,5	200	5,88	5,12	82,45	81,89
1	2,5	1,5	300	7,90	7,00	94,68	94,56
1	2,5	3	100	7,71	6,59	75,35	75,07
1	2,5	3	200	7,34	6,29	75,67	75,67
1	2,5	3	300	8,15	6,65	80,73	81,17
1	3	1,5	100	7,79	6,51	81,40	81,00
1	3	1,5	200	7,84	6,74	85,33	85,90
1	3	1,5	300	7,88	6,96	93,92	93,84
1	3	3	100	7,78	6,81	63,90	64,44
1	3	3	200	6,12	5,19	6,55	6,05
1	3	3	300	7,75	7,04	82,59	82,87
2	2	1,5	200	7,82	6,51	81,33	81,23
2	2	1,5	300	7,89	6,80	87,83	97,32
2	2	3	100	7,26	6,27	63,14	63,26
2	2	3	200	7,80	6,88	70,09	70,33
2	2	3	300	7,93	6,75	74,52	75,08
2	2,5	1,5	100	7,19	6,33	70,35	70,15
2	2,5	1,5	200	7,48	6,87	80,09	80,03

2	2,5	1,5	300	7,80	6,64	56,30	54,54
2	2,5	3	100	7,36	6,89	62,14	62,23
2	2,5	3	200	7,54	6,57	71,98	72,17
2	2,5	3	300	7,29	6,54	25,97	23,40
2	3	1,5	100	7,37	6,35	69,24	69,05
2	3	1,5	200	7,52	6,58	80,43	80,34
2	3	1,5	300	7,54	6,86	85,54	85,66
2	3	3	200	5,52	4,61	46,27	43,33
2	3	3	300	7,51	6,96	75,59	75,98
3	2	1,5	200	7,49	6,67	70,78	69,37
3	2	1,5	300	7,94	6,31	80,05	78,74
3	2	3	100	6,87	6,62	57,49	57,22
3	2	3	300	7,45	6,39	67,28	67,66
3	2,5	1,5	100	7,04	6,12	58,29	56,91
3	2,5	1,5	200	7,49	6,67	70,77	69,36
3	2,5	1,5	300	7,67	6,48	80,64	79,18
3	2,5	3	100	7,52	6,08	56,55	56,46
3	2,5	3	200	7,42	6,56	64,13	64,24
3	3	1,5	100	7,04	6,08	57,62	56,42
3	3	1,5	300	7,47	6,64	79,43	77,90
3	3	3	100	7,29	6,09	37,81	38,75
3	3	3	200	6,95	6,35	62,86	62,86
3	3	3	300	7,29	6,35	68,31	68,50
1	0	1,5	100	7,20	6,03	65,97	65,29
1	0	1,5	200	7,66	7,13	28,49	26,25
1	0	1,5	300	7,51	6,73	90,91	90,78
1	0	3	100	7,54	6,48	63,09	63,02
1	0	3	200	7,66	7,13	28,49	26,25
1	0	3	300	7,76	6,64	79,18	79,63
2	0	1,5	100	6,63	5,90	48,66	47,80
2	0	1,5	200	7,18	6,57	66,51	66,14
2	0	1,5	300	7,41	6,50	77,33	76,94
2	0	3	100	7,31	5,55	50,19	50,08
2	0	3	200	6,99	6,32	60,69	60,87
2	0	3	300	7,43	6,34	67,92	68,33
3	0	1,5	100	5,11	3,98	91,99	92,41
3	0	1,5	300	7,42	5,79	66,34	62,22
3	0	3	100	7,02	5,64	40,70	40,33
3	0	3	200	7,02	5,56	50,52	50,31

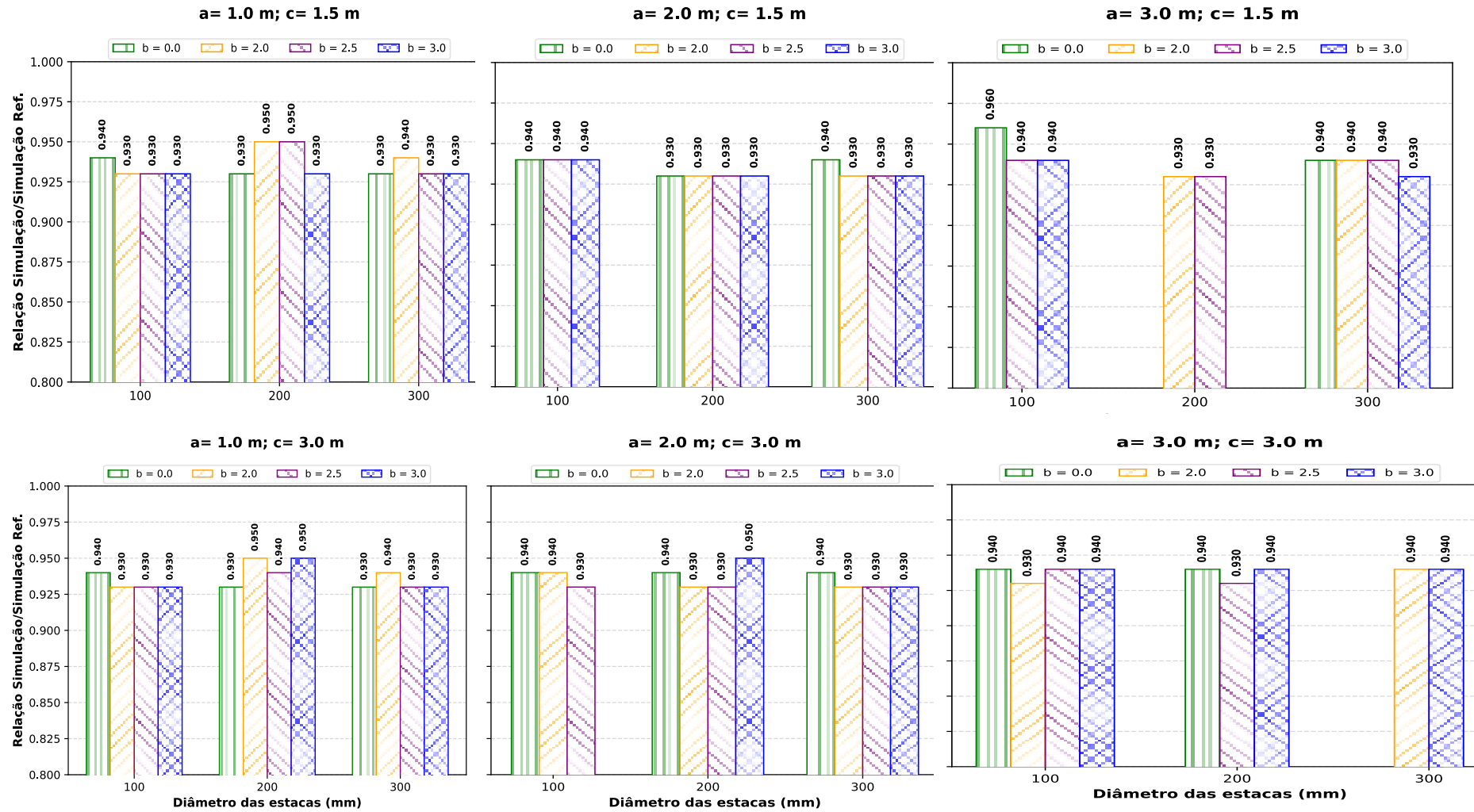
Fonte: Do autor (2025).

Figura 12 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações das tensões horizontais; query 1 conforme variações de a, b, c e d.



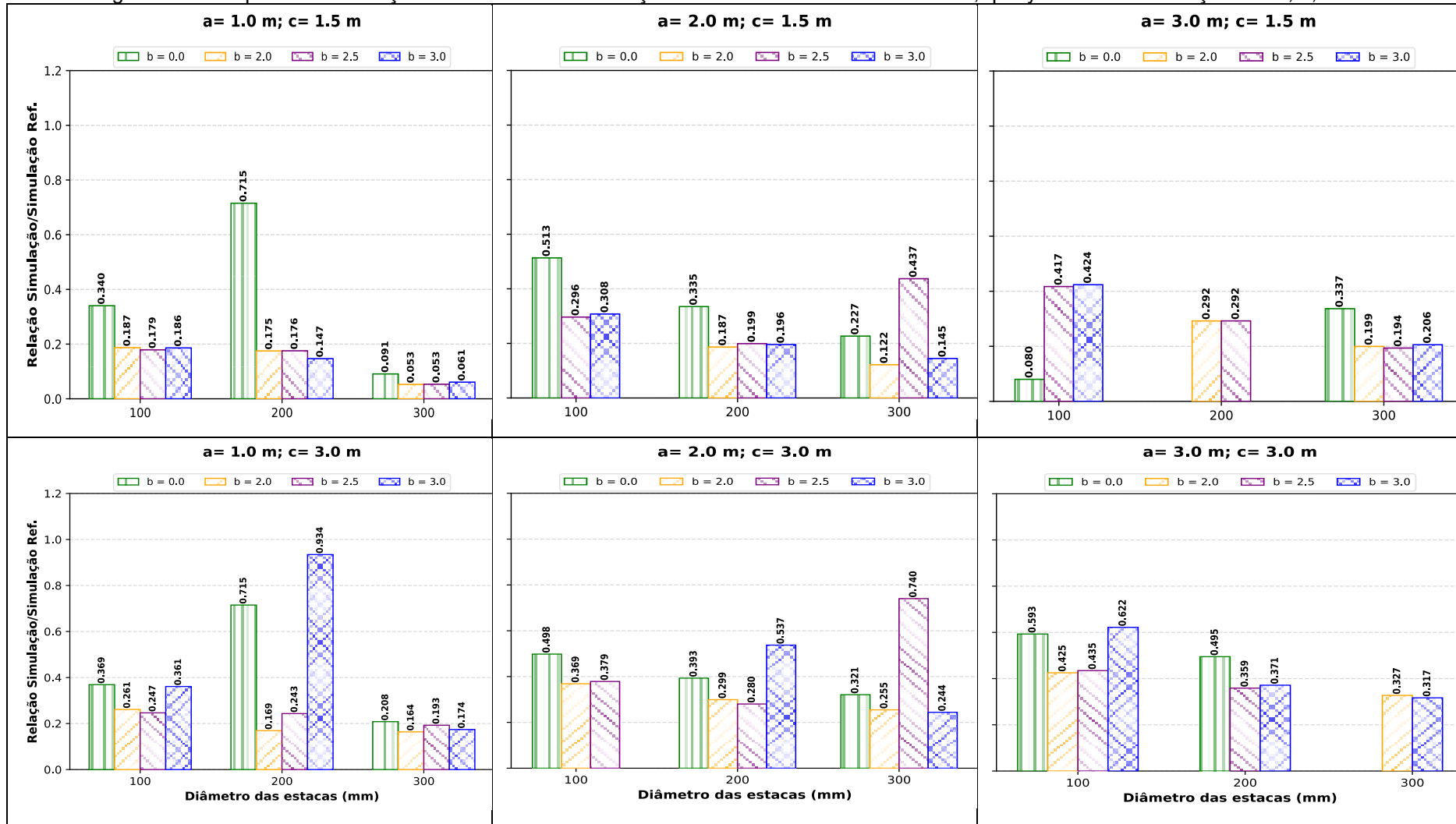
Fonte: Do autor (2025).

Figura 13 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações das tensões horizontais; *query 2* conforme variações de a, b, c e d.



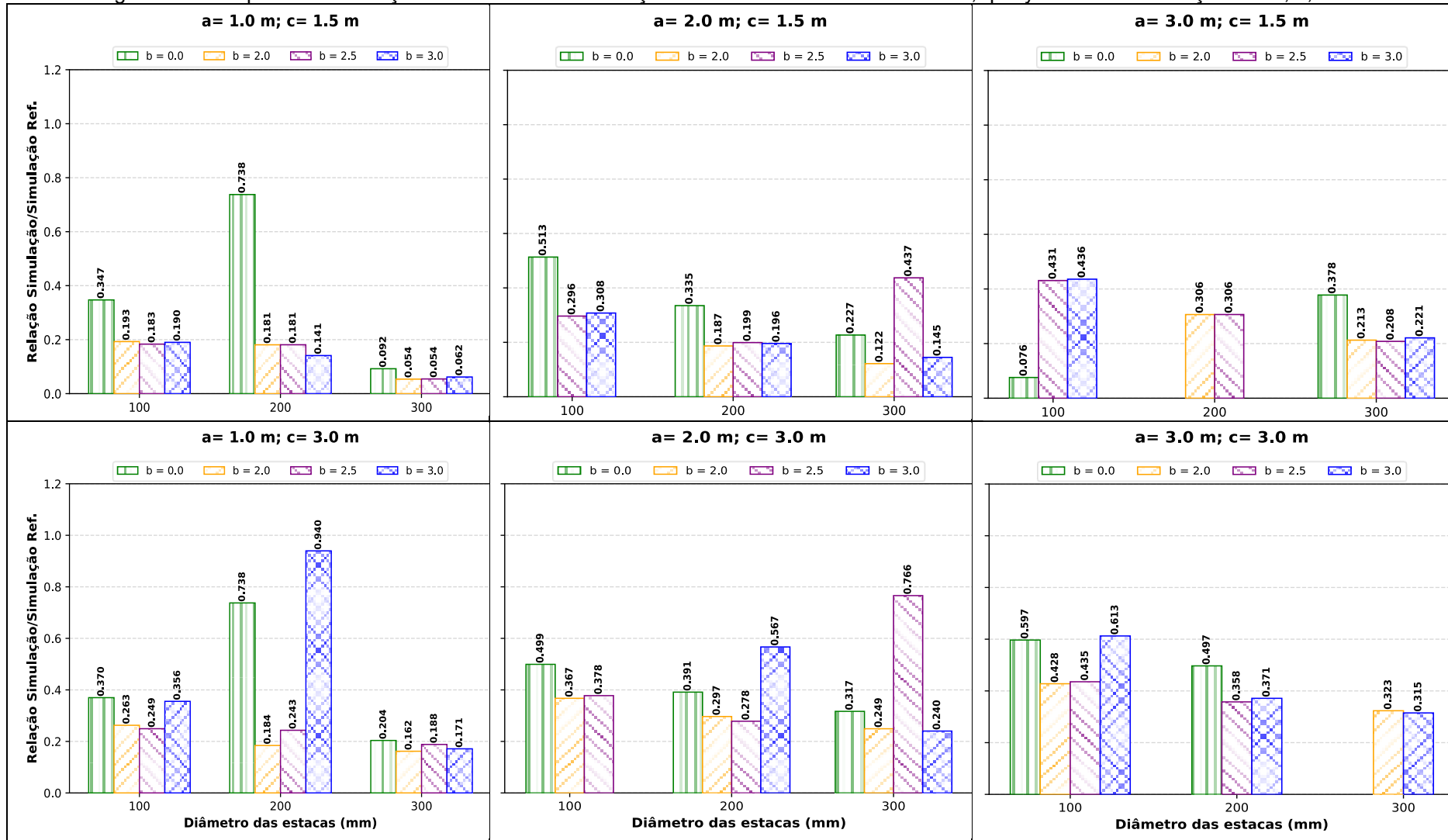
Fonte: Do autor (2025).

Figura 14 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações dos deslocamentos horizontais, query 1 conforme variações de a, b, c e d.



Fonte: Do autor (2025).

Figura 15 - Comparativo da relação do modelo ref. / simulações dos deslocamentos horizontais, query 2 conforme variações de a, b, c e d



Fonte: Do autor (2025).

4.2. Análise de variância (ANOVA)

Para a análise de influência, os parâmetros juntamente com os respectivos dados de tensão e deslocamentos horizontais foram inseridos no *software* Statistica. As medidas que foram analisadas para verificar qual parâmetro foi o mais influente são o Eta ao Quadrado (η^2) e o valor-p. A medida do Eta ao Quadrado evidencia a importância de cada variável, é calculado entre a razão da soma dos quadrados do efeito (SS) e a soma dos quadrados de todos os efeitos (inclusive o erro), quanto maior o valor de Eta ao quadrado, maior o efeito que ele gera. Já o valor-p refere-se à probabilidade de obter um resultado tão extremo quanto o observado, se o valor de p for menor que 0,05 o fator tem efeito significativo, caso $p > 0,05$ o fator não tem efeito significativo.

Tabela 5 – ANOVA 1, Query 1, Tensão Horizontal.

Parâmetros	SS	η^2	p - value
a	0,2	1,223	0,578004
b	0,6	3,379	0,393712
c	0,0	0,000	0,992978
d	2,9	15,468	0,002902
a*b	2,5	13,316	0,091303
a*c	0,3	1,787	0,451686
b*c	1,5	7,941	0,084830
a*d	2,6	13,824	0,027194
b*d	1,1	5,809	0,518727
c*d	0,4	2,156	0,385326
Erro	6,5	35,097	
Σ	18,6	100	

Fonte: Do autor (2025).

Pode-se observar através da Tabela 5 a variável mais influente foi o diâmetro (d) das estacas resultando em um Eta ao quadrado de 15,468 % e um valor p de 0,002902, dessa maneira mostrando que o diâmetro das estacas causa um efeito significativo. Também é importante ressaltar que a combinação do espaçamento entre as estacas na transversal (a) e o diâmetro das estacas (d) apresenta grande efeito e é estatisticamente significativo $p = 0,027194$ e $\eta^2 = 13,824$ %.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância feita para a *query* 2 com os dados de tensão horizontal, diferente da primeira ANOVA agora combinação (a*b) foi a mais influente, apresentando Eta ao quadrado de 19,776 % (grande efeito) e valor-p = 0,013805 menor que o valor de 0,05, dessa maneira sendo estatisticamente significativo. A variável (d) também apresentou valor p < 0,05, também podendo ser considerado um parâmetro influente.

Tabela 6 – ANOVA 2, *Query* 2, Tensão Horizontal.

Parâmetros	SS	η^2	valor - p
a	0,7	4,121	0,150417
b	1,0	5,574	0,164584
c	0,0	0,191	0,668455
d	1,2	7,152	0,042560
a*b	3,4	19,776	0,013805
a*c	0,2	1,266	0,545395
b*c	0,6	3,652	0,329819
a*d	1,8	10,086	0,065228
b*d	2,3	13,327	0,072460
c*d	0,4	2,065	0,376382
Erro	5,7	32,790	
Σ	17,4	100	

Fonte: Do autor (2025).

Os resultados de ANOVA 3 para a *query* 1 referente aos deslocamentos horizontais resultou no parâmetro (c) como variável independente mais influente, contendo um $\eta^2 = 13,136$ e valor-p = 0,00893, sendo assim estatisticamente significativa e gerando grandes efeitos com a sua alteração. Também o diâmetro das estacas e a combinação (a*d) resultaram em valores de p < 0,05.

Tabela 7 – ANOVA 3, *Query* 1, deslocamento horizontal.

Parâmetros	SS	η^2	valor-p
a	0,00000053	5,178	0,086512
b	0,00000071	6,886	0,091475
c	0,00000135	13,136	0,000893
d	0,00000100	9,775	0,012967
a*b	0,00000068	6,661	0,365332
a*c	0,00000000	0,041	0,979122
b*c	0,00000033	3,176	0,370846
a*d	0,00000118	11,504	0,035526

b*d	0,00000125	12,246	0,082749
c*d	0,00000001	0,070	0,964754
Erro	0,00000321	31,326	
Σ	0,000010	100	

Fonte: Do autor (2025).

Por fim a análise de variância para a *query 2* resultou também na variável (d) gerando grandes efeitos e sendo significativa, porem também a variável (c) apresentou-se de acordo com os resultados um parâmetro que apresenta grande influencia nos deslocamentos horizontais.

Tabela 8 – ANOVA 4, *Query 2*, deslocamento horizontal.

Parâmetros	SS	η^2	p
a	0,00000051	5,025	0,103448
b	0,00000077	7,487	0,084126
c	0,00000124	12,155	0,001665
d	0,00000099	9,650	0,016480
a*b	0,00000068	6,652	0,397652
a*c	0,00000001	0,118	0,944616
b*c	0,00000029	2,881	0,436743
a*d	0,00000111	10,812	0,053049
b*d	0,00000124	12,163	0,100076
c*d	0,00000001	0,068	0,967429
Erro	0,00000337	32,989	
Σ	0,000010	100	

Fonte: Do autor (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar a avaliação de parâmetros geométricos na estabilização de uma estrutura de contenção de um talude de acesso em uma ponte, através da modelagem numérica e análises gráficas e estatísticas. A metodologia englobou a realização de 64 simulações utilizando o software Rocsience (RS3). O modelo foi carregado com um carregamento de 25 kN/m² aplicado em uma área de 18 m², complementado por um carregamento de 5 kN/m² distribuído ao redor da carga principal. Foi variado a distância transversal e horizontal das estacas (a,b), a distância entre sensor de medição que representa a interface do muro e as estacas (c) e o diâmetro das estacas. Para quantificar o comportamento das tensões e deslocamentos horizontais na interface da estrutura de contenção, foram utilizadas as queries.

De forma geral, a metodologia mostrou-se eficiente por ser o mecanismo para a realização das avaliações parametrizadas dos efeitos gerados pelas variáveis do trabalho, a abordagem numérica forneceu dados para a interpretação do problema.

Ao fim deste trabalho, foi possível constatar que as variáveis que mais influenciaram os valores deslocamentos são; o diâmetro e o espaçamento entre as estacas na transversal, espaçamentos pequenos entre as estacas fazem com que elas trabalhem de forma mais solidária, aumentando a rigidez do sistema e conseqüentemente diminuindo os valores de deslocamento, junto disso o diâmetro desenvolve a mesma função. Também foi possível concluir que uma pequena variação nas tensões horizontais pode causar uma variação significativa nos deslocamentos horizontais. A inserção das estacas reduz os valores de tensões e deslocamentos horizontais atuantes na interface de um muro de contenção de uma ponte.

A análise de variância foi de suma importância para a identificação dos parâmetros e combinações que mais influenciam no modelo, foi constatado que em muitos casos as combinações dos parâmetros influenciavam mais que os parâmetros isolados.

REFERÊNCIAS

AMÂNCIO, Yane Nunes. **Manifestações patológicas em estruturas de contenção**. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, 2022.

American Society for Testing and Materials. **D3080 - 04** - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188/2013**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. 590p.

BARROS, Pérsio Leister de Almeida. **Manual técnico de obras de contenção**. 1. ed. São Paulo: Maccaferri do Brasil, 2008. 223p.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite element procedures**. 2. ed. Watertown, MA: K.J. Bathe, 2014.

BOWLES, Joseph E. **Foundation Analysis and Design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. P. 1167.

BRANDNER, Andreas. (2010). “**Successful slope stabilization under severe conditions**”. Technische Akademie Esslingen. 10th ISM Workshop, Washington, DC, 2010.

BRINCH HANSEN, Jorgen. & LUNDGREN, Helge., 1960, “Hauptprobleme der Bodenmechanik”, Spring Verlag. APUD: MASON, J., 1981, **Obras Portuárias**, Rio de Janeiro, Brasil, Editora Campus Ltda.

BRINCH HANSEN, Jorgen. 1961, “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”, The Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin Nº12..

CHOW, Yean. Khow. **Analysis of piles used for slope stabilization**. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, v. 20, n. 9, p. 635-646, 1996.

DANZIGER, Bernadete Ragoni; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações em estacas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021.

D'APPOLONIA, Elio; ALPERSTEIN, Robert; D'APPOLONIA, David. **Behavior of a colluvial slope**. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v. 93, n. SM4, p. 447–473, 1967.

DOMINGUES, Paulo. César. **Indicações para projetos de muros de arrimo em concreto armado**. 1997. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 1997.

DUARTE, Écio Naves. Método dos elementos finitos. **Mecânica do Contato entre Corpos Revestidos**, p. 37-44, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Micropile design and construction: reference manual**. (FHWA-NHI-05-039). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation,

FILHO, Oswaldo Augusto; VIRGILI, José Carlos. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, Antônio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

GERSCOVICH, Denise Maria Soares. **Estruturas de Contenção: Muros de Arrimo**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações, 2010.

GERSCOVICH, Denise. Maria Soares.; DANZIGER, Bernadete Ragoni.; SARAMAGO, Robson. **Contenções: teoria e aplicação em obras**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

GOMES, Denise Cristina de Lima. **Muros de contenção**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

HACHICH, Waldemar; FALCONI, Frederico F.; SAES, José Luiz; FROTA, Régis G. Q.; CARVALHO, Celso S.; NIYAMA, Sussumu. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. 751 p. ISBN 85-7266-098-4.

HASSIOTIS, Sophia.; CHAMEAU, Jean. Lou.; GUNARATNE, Manjriker. **Design method for stabilization of slopes with piles**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, n. 4, p. 314–323, abr. 1997. American Society of Civil Engineers (ASCE).

ITO, Tomio.; MATSUI, Tamotsu. **Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles**. *Soils and Foundations*, v. 15, n. 4, p. 43–59, Dec. 1975. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

ITO, Tomio.; MATSUI, Tamotsu; HONG, Won Pyo. **Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles**. *Soils and Foundations*, v. 21, n. 1, p. 21–37, Mar. 1981. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

ITO, Tomio.; MATSUI, Tamotsu; HONG, Won Pyo. **Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide**. *Soils and Foundations*, v. 22, n. 1, p. 59–79, Mar. 1982. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

MUÑOZ HOYOS, Estefanía. **Influência dos parâmetros hidrológicos e geotécnicos na estabilidade de taludes**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2014.

NAVFAC, 1986, **NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND**, *Soil Mechanics Design Manual 7.01 United States Navy*. Alexandria, Virginia, USA.

NEIVA, Eduardo Santo et al. **Estruturas de contenção, escavações e escoramentos**. Belo Horizonte. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2014.

NUNES, Sara Cristina Oliveira. **Métodos de dimensionamento de reforço e estabilização de taludes com microestacas**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra (Portugal).

PBMC (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas). **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas**: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Editado por José A. Marengo e Fábio R. Scarano. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ, 2016. 184 p.

SILVA, Vanessa Coutinho. **Métodos analíticos para avaliar a contribuição de estacas para o fator de segurança de taludes**. 2013. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, Augusto Estevão Soares de et al. **Utilização de Estaca Strauss em Fundações, Contensões e Pinagem de Taludes**. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, 2019.

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

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações profundas**. v. 2. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 352 p. ISBN 978-85-86238-98-7.