

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

AMANDA TELESSE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS: UM ESTUDO
DE CASO UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA.

Joinville
2023

AMANDA TELESSE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS: UM ESTUDO
DE CASO UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA.

Trabalho apresentado como requisito
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil de Infraestrutura do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Julian Asdrubal Buritica Garcia

Joinville
2023

AMANDA TELESSE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS: UM ESTUDO
DE CASO UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 06 de Dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Orientador: Dr. Julian Asdrubal Buritica Garcia
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Michael Enrique Vega-Leon Seijas
Membro(a)
ABMS

Dedico este trabalho à minha mãe, Jane Telesse.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a importância de Deus e o apoio de todas as pessoas que contribuíram para o sucesso da conclusão do meu trabalho acadêmico. A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) proporcionou um ambiente de desafio constante, permitindo o desenvolvimento deste estudo com êxito. Sinto-me orgulhosa em ver a profissional que me tornei.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu professor orientador, Julian Asdrubal Buritica Garcia. Suas orientações sábias e sua paciência incansável foram fundamentais para o sucesso deste estudo. Ele não apenas compartilhou seu conhecimento e experiência, mas também investiu seu tempo e energia para me ajudar a superar os desafios que surgiram ao longo do caminho.

Agradeço também à empresa Azimute, disponibilizando os materiais essenciais para a pesquisa, contribuindo significativamente para a qualidade e abrangência do meu estudo.

Não posso deixar de mencionar os integrantes da minha família, agradeço profundamente à minha irmã, Juliana Telesse, de quem tenho tanto orgulho, e também à minha tia, Lucia Telesse, que sempre me apoiou, sendo uma segunda mãe para mim.

Além disso, estendo meus agradecimentos especiais aos meus amigos Armando e Gyovana, mesmo estando distantes, sempre me apoiaram e vibraram com todas as minhas conquistas.

Um agradecimento especial ao meu companheiro da vida, Angelo Gastaldi, e à minha mãe, Jane Telesse, pelo apoio emocional que me deram nos momentos de desafio. Sua compreensão e incentivo foram inestimáveis para mim, impulsionando-me a persistir e acreditar em meu potencial.

Assim, reconheço que cada contribuição, apoio e incentivo foram cruciais para a conclusão bem-sucedida deste trabalho acadêmico. Sinto-me verdadeiramente abençoada por contar com pessoas tão importantes em minha jornada acadêmica.

Quando a mulher negra se movimenta, toda a estrutura da sociedade se movimenta com ela (Angela Davis).

RESUMO

Este estudo concentra-se na modelagem numérica de aterros com estacas, utilizando o método dos elementos finitos para investigar o comportamento geotécnico do solo. O software Plaxis foi empregado para compreender a interação entre o solo e a estrutura. Foram aplicados os modelos constitutivos Mohr-Coulomb e Hardening Soil Model (HSM). Enquanto o primeiro destaca as tensões normais e de cisalhamento, o segundo é fundamental para simulações realistas em diferentes tipos de carregamento. A calibração dos modelos fundamentou-se em dados de ensaios triaxiais, ajustando parâmetros para representar com precisão o comportamento do solo no software Plaxis. Aspectos como altura do aterro, espaçamento entre estacas, peso específico e sobrecarga atuante foram considerados. Essa análise permitiu a compreensão do comportamento geotécnico do solo em diversos cenários de carregamento, sendo a análise e calibração dos modelos aspectos essenciais para o desenvolvimento de infraestruturas seguras. Tais processos minimizam os riscos de falhas e otimizam a estabilidade das estruturas civis.

Palavras-chave: Modelagem numérica. Método dos Elementos Finito. Mohr-Coulomb. Hardening Soil Model. Geotecnia.

ABSTRACT

This study focuses on the numerical modeling of embankments with piles, using the finite element method to investigate the geotechnical behavior of the soil. The software Plaxis was employed to understand the interaction between soil and structure. The Mohr-Coulomb and Hardening Soil Model (HSM) constitutive models were applied. While the former emphasizes normal and shear stresses, the latter is essential for realistic simulations under different types of loading. Model calibration relied on triaxial test data, adjusting parameters to accurately represent soil behavior in the Plaxis software. Aspects such as embankment height, spacing between piles, specific weight, and acting overburden were considered. This analysis allowed for an understanding of the geotechnical behavior of the soil in various loading scenarios, with the analysis and calibration of the models being essential aspects for the development of secure infrastructures. These processes minimize the risks of failure and optimize the stability of civil structures.

Keywords: Numerical modeling. Finite Element Method. Mohr-Coulomb. Hardening Soil Model. Geotechnics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Métodos construtivos de aterros sobre solos moles	21
Figura 2 – (a) Seção Transversal Típica de Aterro sobre Substituição Parcial de Solo Mole e (b) Seção Transversal Típica de Aterro sobre Substituição Total de Solo Mole	22
Figura 3 – Comparação de recalque com e sem utilização de drenos	23
Figura 4 – (a) Malha de geodreno em planta e (b) Geodreno	24
Figura 5 – Representação do aterro sobre estaca	24
Figura 6 – A distribuição da carga vertical ocorre em três partes: A efeito do arco, B reforço geotêxtil e C subsolo/solo mole.	26
Figura 7 – (A) Arqueamento total ou completo e (B) arqueamento parcial ou incompleto	27
Figura 8 – (a) Geogrelha e (b) Aplicação da geogrelha	27
Figura 9 – Detalhamento Capitel	28
Figura 10 – Estado de limite último	29
Figura 11 – Tipos de fundações: a) fundação superficial, b) grupo de estacas, c) radier estaqueado e d) inclusões rígidas	30
Figura 12 – a) Aterros reforçados na base em solos moles, b) Aterros reforçados na base sobre estacas: Aproximações à ponte Wat Nakorn-In, Bangkok, Tailândia. c) Aterros reforçados na base sobre estacas: Autoestrada A1/N1 de Dundalk a Newry, Irlanda.	32
Figura 13 – Determinação das tensões atuantes em um plano do interior do elemento de solo, que é inclinado com um ângulo (alfa) com a horizontal	33
Figura 14 – Mapemaento dos ponto de sondagem	35
Figura 15 – Relação entre a geometria modelada e o projeto: a) planta baixa b) corte horizontal c) corte vertical d) corte vertical da geometria modelada	36
Figura 16 – Execução da obra de aterro estaqueado	37
Figura 17 – Perfil geotécnico	38
Figura 18 – Su x Profundidade	39
Figura 19 – Resistência de ponta x profundidade	40
Figura 20 – Perfil geotécnico - SPT02	41
Figura 21 – Representação simplificada das camadas solo	42
Figura 22 – Calibração dos Parâmetros Geotécnicos	44
Figura 23 – Calibração com base no triaxial	45

Figura 24 – Fase construtiva: a) Fase inicial b) Fase primária c) Fase secundária d) Fase terciária	46
Figura 25 – Modelo da geometria	47
Figura 26 – Representação da primeiro modelo	49
Figura 27 – Sem estacas: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas . .	50
Figura 28 – Espaçamento de 2,25 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas c) Tensão principal	51
Figura 29 – Espaçamento de 3 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	51
Figura 30 – Espaçamento de 4m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	52
Figura 31 – Espaçamento de 6m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	52
Figura 32 – Sem estacas: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas . .	53
Figura 33 – Espaçamento de 2,25 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	54
Figura 34 – Espaçamento de 3 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	55
Figura 35 – Espaçamento de 4 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	55
Figura 36 – Espaçamento de 6 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagem e Desvantagem das soluções	21
Quadro 2 – Parâmetros HSM	43
Quadro 3 – Resultado simulação 2D - PLAXIS	48
Quadro 4 – Resultado simulação 3D - PLAXIS	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do modelo Hardening Soil	34
Tabela 2 – Parâmetros de entrada	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas	Definição
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
PLAXIS	Plaxis é um software que realiza análises de elementos finitos no âmbito da engenharia geotécnica, incluindo deformação, estabilidade e fluxo de água.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BS 8006	British Standard 8006 – Método Britânico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CPT-u	Ensaio Piezo Cone Penetration Test
Nspt	Número de golpes do ensaio de SPT
SPT	Standard penetration test
PTC	Plataformas de transferência de carga

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
OCR	Razão de sobre adensamento - "Over Consolidation Ratio"
C_r	Índice de recompressão
C_c	Índice de compressão
$c'(kPa)$	Intercepto coesivo
$E_{50_{ref}}$	Módulo de rigidez secante de referência
$E_{oed_{ref}}$	Módulo de rigidez tangente em ensaios oedométricos
$E_{ur_{ref}}$	Rigidez de carregamento e descarregamento
ν	Coeficiente de Poisson para condição de carregamento - descarregamento
e	Índice de vazio
φ'	Ângulo de atrito efetivo
$\sigma_{1'}$	Tensão principal maior efetiva
$\sigma_{3'}$	Tensão principal menor efetiva
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
POP	Pressão de pré-sobrecarga
g/m^2	Gramas por metro quadrado (unidade de gramatura dos geotêxteis)
E_{crown}	Eficiência do arqueamento na coroa do arco
E_{piel}	Eficiência do arqueamento no capitel
φ'	Ângulo de atrito efetivo característico
γ	Peso específico do material de aterro

$\gamma \cdot H$	Tensão vertical média na base do aterro devida ao peso próprio do material de aterro
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
γ_{dmin}	Peso específico aparente seco mínimo
A	Parcela de carga vertical transferida diretamente ao capitel
B	Parcela de carga vertical sobre o reforço geossintético
C	Parcela de carga vertical transferida ao solo de fundação
C_c	Coefficiente de arqueamento
c_c	Coefficiente de curvatura
d	Diâmetro da estaca
H	Altura de aterro
H_c	Altura crítica do aterro
J	Módulo de rigidez à tração do geossintético
Km	Quilômetro
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
μ	Média aritmética
m	Metro
min	Minuto
n	Número de valores calculados
N	Número de amostra
p	Sobrecarga na superfície do aterro
p'_c	Parcela de tensão vertical transferida diretamente ao capitel
p'_{tubo}	Parcela de tensão vertical transferida diretamente ao tubo
p'_r	Parcela de tensão vertical transferida ao reforço geossintético
S	Espaçamento centro a centro de capitéis adjacentes, em planta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Característica e propriedade dos solos moles	19
2.2	Métodos construtivos de aterros sobre solos moles	20
2.2.1	Substituição de solos moles	22
2.2.2	Geodreno	23
2.3	Aterro sobre estacas	24
2.3.1	Mecanismo de transferência de carga	25
2.3.2	Aterro, Geossintético, Capitel e Fundação	27
2.4	Aplicações	31
2.5	Modelo constitutivo: Mohr-Coulomb	33
2.6	Modelo constitutivo: Hardening Soil	33
3	MÉTODO	35
3.1	Estudo de caso	35
3.2	Análise do Perfil Geotécnico	38
3.3	Modelagem	41
3.3.1	Calibração	42
3.3.2	Modelos da geometria	46
4	ANÁLISE E RESULTADOS	48
4.1	Geometria Teste	48
4.2	Modelagem 2D	49
4.3	Modelagem 3D	53
5	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o aumento do número de veículos e a ocupação de áreas nas cidades modernas constituem desafios complexos, demandando soluções eficazes e sustentáveis. Atualmente, o Brasil abriga cerca de 211,8 milhões de habitantes, com um incremento de 0,77% em relação a 2019 (IBGE, 2021) Dados da Fenabreve revelam um notável aumento nas vendas de veículos leves no setor automotivo em 2021, registrando um crescimento de 10,5% em comparação ao ano anterior. No mês de dezembro, todos os segmentos automotivos apresentaram elevação em relação ao mês anterior, totalizando 337.623 emplacamentos de veículos e um aumento de 13,99% (BRASIL, 2023).

Diante desse contexto de expansão populacional e aumento da frota de veículos, as cidades modernas encaram desafios significativos quanto à adaptação urbana. O estabelecimento de um sistema de transporte eficiente e infraestrutura adequada é essencial para atender às demandas da população em contínuo crescimento nas áreas urbanas.

Como resposta a esses desafios, a construção de novas rotas, como túneis, pontes e viadutos, surge como uma solução crucial. Essas estruturas permitem a ampliação das vias já existentes, promovendo uma melhoria no fluxo do tráfego e reduzindo a pressão sobre as vias congestionadas. Além dos benefícios em termos de mobilidade, a construção dessas infraestruturas pode impulsionar a geração de empregos e contribuir para o desenvolvimento econômico da região (Senado Federal, 2023).

Nesse contexto de investimentos em infraestrutura, torna-se imperativo aprimorar o conhecimento em obras de arte e entender métodos que viabilizem uma execução eficiente, segura e econômica.

No âmbito da compreensão das características geotécnicas dos solos moles, particularmente os solos argilosos sedimentares frequentemente encontrados em áreas litorâneas, que apresentam alta compressibilidade e baixa capacidade de suporte, é fundamental explorar abordagens que melhorem sua aptidão. Isso se deve ao fato de que esses solos não têm a capacidade de suportar cargas elevadas de aterros.

Grando (2019), destaca várias regiões no estado de Santa Catarina que exibem baixa resistência mecânica.

O estado de Santa Catarina possui diversas regiões, como parte integrante desta zona, onde a malha rodoviária sobrepõe solos de granulometria fina (argilosos), saturados, de baixa resistência mecânica, alto grau de compressibilidade e baixa permeabilidade, que constituem as principais características dos solos moles (GRANDO, 2019, p.16).

Soluções convencionais para a construção de aterros sobre solos moles nem sempre atendem aos requisitos de tempo e confiabilidade exigidos pela obra, além de algumas vezes, serem inviáveis do ponto de vista ambiental. (SALES, 2002, p.15).

Fernández (2006), observa um aumento no emprego de aterros suportados por estacas como meio de reforçar a capacidade de suporte do solo mole. As vantagens incluem a adaptabilidade a terrenos desafiadores e a limitação de espaço, além de facilitar a execução das obras.

Considerando-se que é um método eficaz, há uma série de estudos técnicos na literatura científica dedicados a aterros suportados por estacas desde a década de 1970. Formulações teóricas foram desenvolvidas com o propósito de estabelecer dimensionamentos precisos para essa técnica específica. Contribuições significativas, como as de Hewlett & Randolph (1988), Low et al. (1994), Ehrlich (2001) - mencionado por Sales (2002) - e van Eekelen (2015), têm enriquecido as abordagens dimensionais.

O desenvolvimento de abordagens de dimensionamento, que integram reforços geossintéticos entre estacas e o aterro, tem sido uma linha de pesquisa explorada por diversos especialistas, como John (1987), Jones et al. (1990), BS 8006 (2010) e EBGeo (2011). Paralelamente, o campo viu o surgimento de análises comparativas entre métodos distintos, utilizando simulações numéricas, lideradas por pesquisadores como Horgan & Sarsby (2002), Sales (2002) e Naughton & Kempton (2005).

Em contrapartida aos estudos teóricos, exemplos práticos de aterros suportados por estacas em escala real têm sido meticulosamente monitorados e discutidos em obras como Bergado et al. (2002), Almeida et al. (2007, 2008), Chen et al. (2010) e Briançon & Simon (2012). Essas investigações não apenas fornecem casos de aplicação, mas também enriquecem a compreensão do fenômeno de arqueamento do solo em aterros com estacas reforçadas por geossintéticos. Pesquisas detalhadas conduzidas por Le Hello & Villard (2009), Ellis & Aslam (2009a e b), Eskisar et al. (2012) e outros contribuíram substancialmente para o avanço nesse domínio de estudo.

Os avanços contínuos na engenharia geotécnica têm sido impulsionados por um corpo diversificado de estudiosos que se dedicam ao refinamento e à otimização dos projetos de aterros estaqueado. Esses esforços têm sido fortemente influenciados pelos progressos na análise numérica, um campo que tem desempenhado um papel vital na evolução da eficiência desses projetos.

Dentre os métodos computacionais mais notáveis, destaca-se o método de elementos finitos. Essa técnica altamente versátil e difundida tem sido um pilar na resolução de desafios complexos em engenharia e física. Ao fragmentar o domínio do problema em elementos finitos, este método aproxima de forma eficaz as equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema em cada componente,

permitindo soluções aproximadas para uma vasta gama de análises, desde estruturais até questões relacionadas à transferência de calor e dinâmica de fluidos.

Inicialmente aplicado predominantemente na área da mecânica, o método de elementos finitos tem gradualmente adentrado no campo da geotecnia. Para adaptar e integrar essa poderosa ferramenta de análise numérica à geotecnia, o software Plaxis emergiu como uma escolha predominante entre os engenheiros geotécnicos globalmente. O Plaxis 3D oferece uma interface que se assemelha ao CAD, proporcionando recursos robustos para a análise de ambientes subterrâneos em projetos de geoengenharia.

Do escopo de escavações à mecânica de rochas, passando por aterros, fundações, construção de túneis e até a geomecânica de reservatórios, os profissionais agora têm a capacidade de determinar com precisão deformações e estabilidade em estruturas geotécnicas. Essas análises detalhadas são cruciais para avaliar os riscos inerentes a cada projeto, contribuindo significativamente para o aprimoramento contínuo da engenharia geotécnica.

Aterros estaqueados representam estruturas híbridas que integram uma abordagem tradicional de terraplanagem, compreendendo o aterro em si, com uma solução característica de fundação profunda, as estacas. Nesse contexto, busca-se não apenas a elevação da carga sobre as estacas, mas também a redistribuição eficiente das cargas que não são diretamente suportadas por esses elementos estruturais. Uma estratégia para atingir esse objetivo consiste na introdução de material geossintético na base do aterro, conforme indicado por (MACHADO, 2007, p.9). Essa adição estratégica visa otimizar a resposta da estrutura, melhorando a eficácia do sistema de suporte e contribuindo para uma abordagem mais integrada na concepção de aterros estaqueados.

Realizando a análise e coleta dos parâmetros geotécnicos obtidos na obra de arte especial sobre a Rua Dona Francisca, em Joinville, SC, o objetivo é criar um perfil estratigráfico representativo da região de estudo e definir as propriedades geotécnicas com precisão.

Calibrando os parâmetros geotécnicos através do modelo constitutivo Hardening Soil, busca-se compreender detalhadamente o comportamento do solo, oferecendo insights valiosos sobre suas características e respostas em diferentes cenários.

Além disso, está sendo realizada a análise paramétrica considerando variações no espaçamento entre estacas por meio do software Plaxis, com o intuito de avaliar os efeitos dessas mudanças nos parâmetros geotécnicos e aprimorar o projeto.

No geral, esses processos têm como objetivo aprofundar a compreensão do comportamento geotécnico da área estudada, definir as propriedades do solo com precisão, calibrar parâmetros para melhor modelagem e análise, além de considerar

variações estruturais para aprimorar a eficiência e segurança de projetos futuros em locais semelhantes.

1.1 OBJETIVO

A seguir apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise comparativa utilizando o software Plaxis, considerando diferentes espaçamentos (s) entre estacas, com o intuito de avaliar os recalques.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar e coletar os parâmetros geotécnicos obtidos através da obra de arte especial executada sobre a Rua Dona Francisca, em Joinville, SC;
- Criar o perfil estratigráfico representativo da região de estudo e definir as propriedades geotécnicas;
- Criar geometria que presente a obra referente ao estudo de caso;
- Realizar calibração dos parâmetros geotécnicos através do modelo constitutivo Hardening Soil;
- Realizar uma análise comparativa da variação no espaçamento entre estacas, com o propósito de avaliar os recalques, utilizando o software Plaxis;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, abordaremos os princípios essenciais para analisar e comparar métodos analíticos no dimensionamento de aterros estaqueados. Apresentaremos um estudo de caso que utiliza modelagem numérica, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do tema.

2.1 CARACTERÍSTICA E PROPRIEDADE DOS SOLOS MOLES

O solo dá suporte à vida e, em consequência, é a base de todos os sistemas de produção vegetal e pecuária para fornecimento à sociedade de alimentos, medicamentos, fibras, madeira e combustíveis. Mas, as funções do solo e seus serviços vão além desses produtos. Precisamos nos aproximar e observar melhor para compreender esses serviços essenciais que o solo fornece à sociedade: os serviços ecossistêmicos.

“Primeiro é necessário reconhecer que o solo é um sistema complexo, formado por minerais, matéria orgânica, ar, água, micro e macrorganismos,” revela a pesquisadora Elaine Fidalgo, da Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ) E esse sistema está em processo constante de formação, um processo lento e essencial para a sua manutenção e renovação.

No contexto do litoral brasileiro, encontramos depósitos de solos moles de granulometria fina, cuja formação remonta ao período Quaternário. Esses depósitos se desenvolveram em dois ciclos distintos de sedimentação, como observado por Massad (1988). Esses ciclos estão intrinsecamente relacionados às variações do nível do mar ao longo do tempo. Durante o Pleistoceno, ocorreu um aumento de 8 metros no nível do mar, levando ao surgimento da Formação Cananéia.

Subsequentemente, na era glacial, testemunha-se que uma redução drástica de 130 metros no nível do mar, resultando na erosão desses depósitos. O período Holoceno, por sua vez, trouxe uma transgressão marinha de 4 metros, culminando nos depósitos de solos moles que existem hoje.

Após o Holoceno, houve uma regressão marinha lenta, interrompida por oscilações negativas que tiveram impactos significativos na geotecnia da região. Quanto às características do solo, é notável a ampla variação no tamanho das partículas, com grãos de areia variando de 1mm a 2mm e partículas de argila incrivelmente diminutas, com cerca de 0,000001mm, como observado por Pinto (2006). Os solos moles, predominantes no litoral brasileiro, são heterogêneos e caracterizados por uma alta umidade devido à baixa permeabilidade, resultando em baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade. Essas propriedades demandam intervenções

de engenharia, especialmente em áreas predominantemente argilosas, conforme destacado por Marangon (2009).

Os solos moles exibem características distintas que demandam uma análise cuidadosa na engenharia geotécnica. A compreensão dessas peculiaridades é fundamental para garantir o sucesso de qualquer empreendimento. Esses solos são classificados como siltes ou argilas finas e saturadas, frequentemente contendo matéria orgânica em sua composição. Suas principais propriedades incluem elevada compressibilidade, praticamente impermeabilidade, baixa resistência ao cisalhamento não drenado e capacidade limitada de suporte de cargas. Esses solos são frequentemente encontrados em áreas próximas a ambientes marinhos, fluviais, lagunas e baías, o que representa desafios significativos para projetos de construção nessas regiões, segundo Grandó (2019).

A caracterização adequada do solo mole tem início com um processo de análise granulométrica, que avalia a distribuição e tamanhos das partículas presentes. Essa etapa inicial proporciona informações cruciais sobre as propriedades físicas do solo, como textura e permeabilidade, fundamentais para um entendimento abrangente das características do terreno. Esse procedimento envolve o peneiramento de partículas com tamanho de até 0,075mm e a utilização da técnica de sedimentação com base na Lei de Stokes para a fração mais fina do solo. Essa abordagem permite a avaliação do tamanho das partículas que compõem o solo. De acordo com a norma NBR 7181 (2016), grãos com diâmetro inferior a 0,005mm são classificados como argila. Esses solos finos são tão diminutos que, quando em contato com a água, se transformam em uma pasta, tornando as partículas individuais praticamente imperceptíveis. Esse comportamento é uma das razões fundamentais para a designação desses solos como "solos moles".

2.2 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

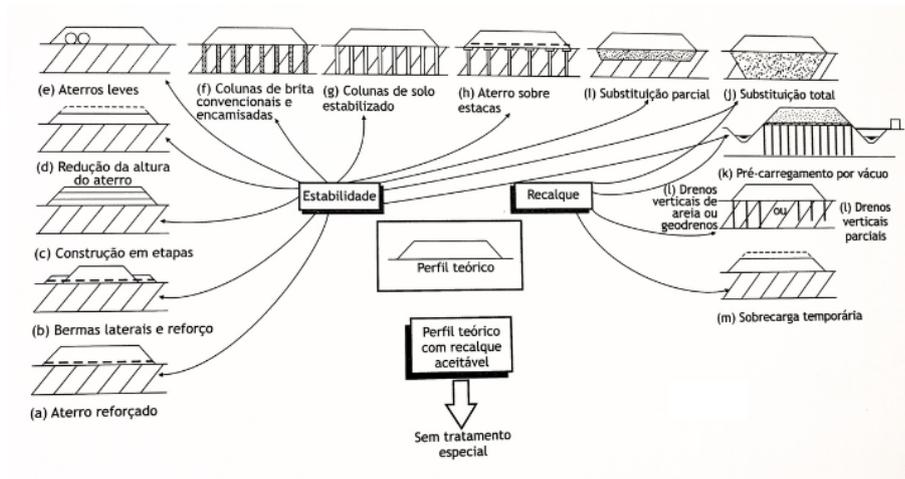
Alinhando-se à metodologia proposta por Almeida e Marques (2010) no que diz respeito ao método construtivo.

Em solos extremamente moles, é comum empregar reforço geossintético em conjunto com diversas alternativas de construção. Restrições de tempo podem tornar técnicas convencionais de aterro impraticáveis, tornando métodos como aterros sobre estacas ou aterros leves mais viáveis, apesar dos custos mais elevados. A remoção de solo mole é aplicada quando a camada é fina e as distâncias de transporte são curtas. No entanto, em áreas urbanas, a disposição do material escavado pode ser complexa devido a limitações ambientais e de espaço.

Como apresentado na Figura 1 e no Quadro 1, que oferece uma síntese dos métodos construtivos de aterros sobre solos, nos próximos tópicos, nos aprofundaremos

em diferentes abordagens.

Exploraremos um enfoque que considera problemas de estabilidade, conforme Figura 1 – Métodos construtivos de aterros sobre solos moles



Fonte: Almeida e Marques (2010)

descrito na seção 2.1.2.1, abordaremos questões relacionadas a recalques no tópico 2.1.2.2 e, por fim, examinaremos a técnica de aterro sobre estacas, detalhada na seção 2.1.2.3, abordando a problemática central deste trabalho.

Quadro 1 – Vantagem e Desvantagem das soluções

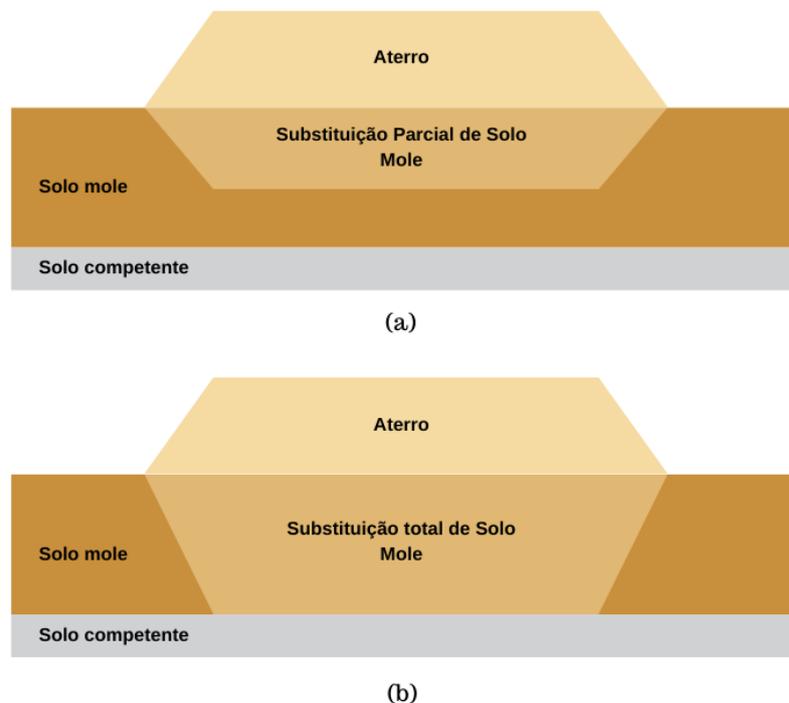
Solução	Vantagem	Desvantagem
Substituição Total	Controle dos recalques	Camadas pequenas de solo mole
Substituição Parcial	Diminui o tempo do recalque	Camadas pequenas de solo mole
Bermas	Diminui os recalques	Quantidade de material e quantidade de área lateral
Aterros por etapas	Reduzir os recalque	Execução em longo prazo
Drenos Verticais	Execução em curto prazo / Melhor custo-benefício	Camadas granulares próximas diminuem o efeito.
Estaqueamento + Geogrelha	Execução em curto prazo	Custos elevados / Custo de equipamento elevados
Colunas de Brita	Execução em curto prazo	Custos elevados
Aterro Leve (EPS)	Execução em curto prazo	Custos elevados do EPS

Fonte: Almeida (2014).

2.2.1 Substituição de solos moles

O método de substituição de solos moles, conforme descrito por Almeida e Marques (2010), consiste na remoção total ou parcial desses solos, por meio de dragagem e escavação, como mostrado na Figura 2, seguido imediatamente pela colocação de aterro no local onde o solo foi retirado. Esse método é comumente utilizado em depósitos que possuem camadas de solo compressível com espessura de até 4 metros. Uma das vantagens desse método é a redução ou eliminação de recalques, além do aumento da estabilidade contra rupturas.

Figura 2 – (a) Seção Transversal Típica de Aterro sobre Substituição Parcial de Solo Mole e (b) Seção Transversal Típica de Aterro sobre Substituição Total de Solo Mole



Fonte: SANTOS (2015)

Devido à capacidade limitada das camadas superficiais, a execução desse método requer atenção especial e o uso de equipamentos leves. A técnica de escavação por nichos é viável, embora mais demorada, exigindo um planejamento minucioso da construção, incluindo a eficiente gestão da movimentação de materiais no canteiro de obra visto em Geosensori (2019).

A execução desse método demanda atenção especial e a utilização de equipamentos leves devido à baixa capacidade de suporte das camadas superficiais. A escavação por nichos é uma técnica viável, ainda que mais demorada, exigindo um planejamento minucioso da construção, incluindo o gerenciamento eficaz da movimentação de materiais no canteiro de obras. Em solos muito moles, durante a execução, é comum observar recalques contínuos nas pistas de acesso devido à

carga excessiva de tráfego de equipamentos e à colocação de aterro para correção de desníveis.

Após a remoção do solo mole, o espaço deixado é preenchido com material de aterro, seguido por sondagens para avaliar a espessura das camadas de argila restantes no solo. O propósito desse método é estabelecer uma base sólida para a construção, considerando os desafios apresentados pelas camadas de solo mole.

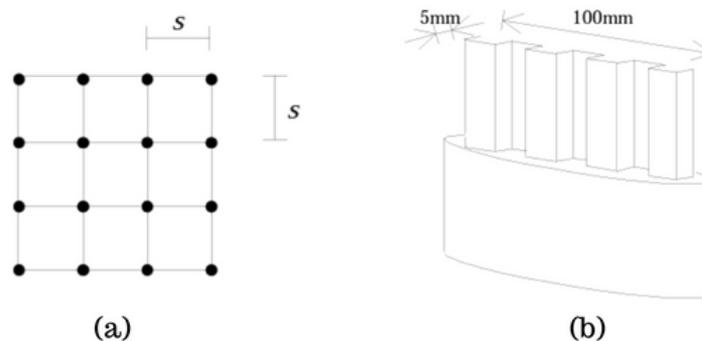
Embora Almeida e Marques (2010) mencionem a possibilidade de remover até 4 metros de solo mole, parcial ou totalmente, a NORMA DNIT 381/2022 – PRO (JUNHO 2022) é mais rígida, permitindo a remoção total apenas em áreas com menos de 200 metros de extensão e 3 metros de espessura, não recomendando a remoção parcial.

2.2.2 Geodreno

Almeida e Marques (2010) descrevem que durante a construção de um aterro, a utilização de geodrenos como solução pode trazer diversos benefícios, incluindo o aumento da resistência da camada de fundação. Conforme delineado na NORMA DNIT 381/2022 – PRO (JUNHO 2022), os geodrenos são elementos drenantes fabricados a partir de materiais sintéticos.

Eles se caracterizam por possuir uma largura de 100 mm, uma espessura variando entre 3 e 5 mm, e uma extensão considerável, como ilustrado na Figura 3b. Esses componentes são inseridos verticalmente no solo e organizados em uma configuração de malha, visando facilitar o processo de drenagem e otimizar os recalques.

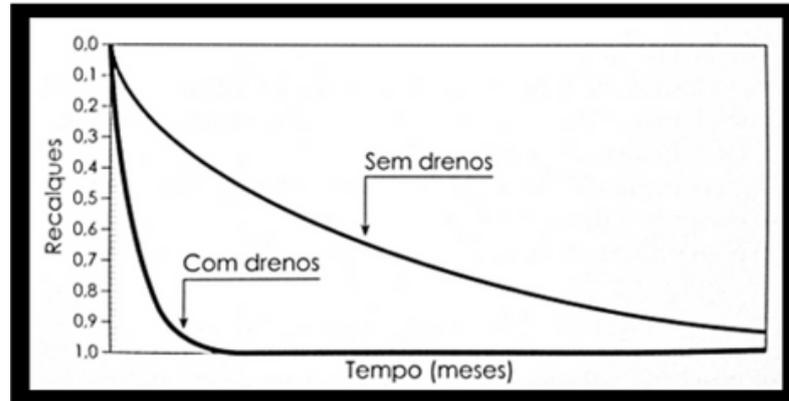
Figura 3 – Comparação de recalque com e sem utilização de drenos



Fonte: Almeida e Marques (2010)

O uso de geodrenos pode aumentar a velocidade dos recalques em aterros, conforme ilustrado na Figura 4. Os resultados do monitoramento comprovam essa vantagem em comparação com aterros construídos de forma convencional.

Figura 4 – (a) Malha de geodreno em planta e (b) Geodreno

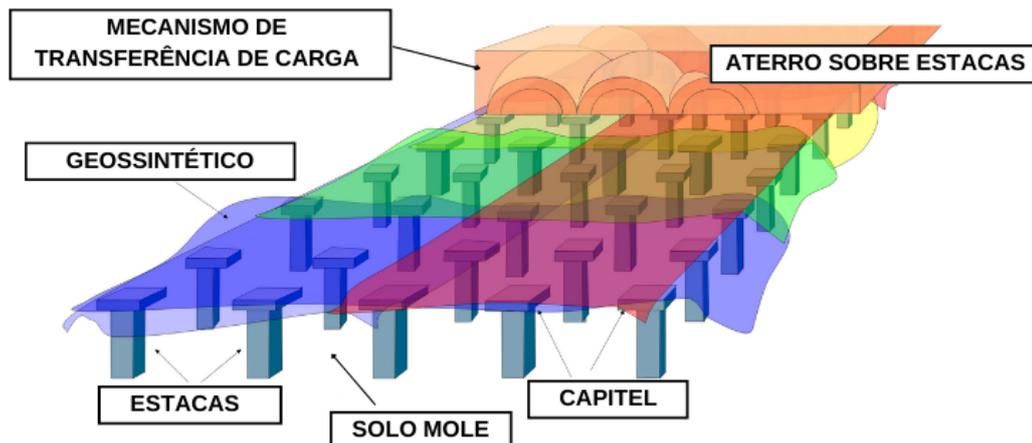


Fonte: NORMA DNIT 381/2022 – PRO (JUNHO 2022)

2.3 ATERRO SOBRE ESTACAS

Conforme Mello e Bilfinger (2014), o emprego de aterros suportados por estacas em terrenos classificados como "solos moles", exemplificado na Figura 5, tem crescido significativamente no campo da engenharia. Essa abordagem alternativa está ganhando destaque quando comparada aos métodos convencionais, como a substituição parcial ou total do solo problemático, bem como a construção de taludes.

Figura 5 – Representação do aterro sobre estaca



Fonte: Modificado - Eekelen (2015)

2.3.1 Mecanismo de transferência de carga

A pesquisa conduzida por Mello e Bilfinger (2014) investigou detalhadamente o mecanismo de transferência de carga, com o objetivo preciso de otimizar a direção da carga do aterro para as estacas. Esse processo é comumente implementado por meio de estruturas denominadas capitéis, que desempenham um papel fundamental nessa transferência eficiente.

Os capitéis são empregados de forma versátil, podendo atuar independentemente ou em conjunto com materiais geossintéticos. Essa abordagem, desenvolvida pelos autores, destaca-se como uma estratégia eficaz para maximizar a eficiência na transferência de carga em estruturas de estacas, contribuindo para avanços significativos nesse campo.

A introdução de geossintéticos frequentemente proporciona a oportunidade de otimizar o espaçamento entre as estacas e/ou reduzir as dimensões dos capitéis, contribuindo de forma significativa para aprimorar o projeto integralmente.

Segundo Almeida e Marques (2010), a transmissão das tensões do aterro para as estacas é realizada por meio de uma plataforma que consiste em capitéis, geogrelhas ou lajes. Essa abordagem não apenas reduz ou, em algumas situações, elimina os afundamentos do aterro, mas também incrementa sua estabilidade. Adicionalmente, viabiliza o aumento da altura do aterro em uma única etapa, em um prazo relativamente curto.

Macedo (2002, p.8) explica que:

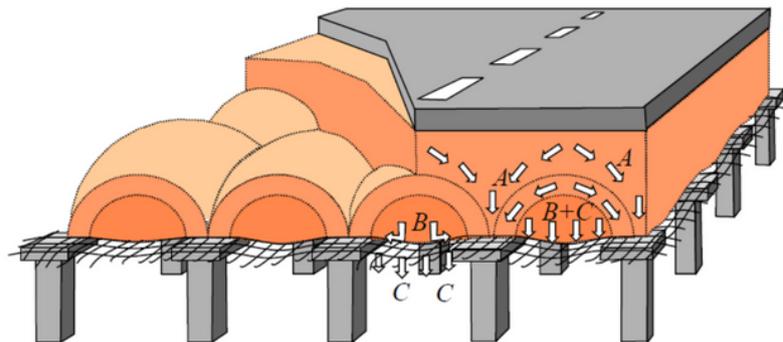
A carga absorvida pelas estacas é substancialmente maior devido à existência dos capitéis na sua parte superior, que faz aumentar a concentração de carga devido ao efeito de arqueamento do solo do aterro. Estes capitéis absorvem as cargas e as transmitem às estacas, que por sua vez transmitem a um solo de fundação mais resistente. Esta técnica proporciona uma considerável redução dos recalques, bem como de seus deslocamentos horizontais.

Eekelen (2015) considera que essa solução é comumente empregada em conjunção com uma camada de reforço posicionada na base do aterro, sobre os capitéis das estacas. A distância entre os eixos longitudinais das estacas varia, dependendo do tipo, geralmente entre 1 e 4 metros. A camada destinada à transferência de cargas/tensões, onde se manifesta o processo de arqueamento do solo, é comumente construída utilizando material granular. Adicionalmente, é possível a incorporação de uma ou mais camadas de reforço na base dessa estrutura. Um dos passos cruciais no desenvolvimento do projeto é a consideração do fenômeno de arqueamento que ocorre no material de preenchimento do aterro.

Eekelen (2015) também considera que a carga vertical, composta pelo peso do tráfego, da estrada e do aterro, é distribuída em três componentes de carga: A, B

e C (conforme ilustrado na Figura 6). Essas componentes são definidas da seguinte maneira: a componente A (carga - efeito do arco) é transmitida diretamente para as estacas; a componente B passa através do reforço geotêxtil em direção às estacas; e a componente C (subsolo/solo mole) é suportada pelo solo de baixa resistência. Este artigo apresenta os valores das componentes de carga A, B e C em kN por estaca. É importante observar que as letras A, B e C representam cargas verticais.

Figura 6 – A distribuição da carga vertical ocorre em três partes: A efeito do arco, B reforço geotêxtil e C subsolo/solo mole.



Fonte: Eekelen (2015)

Eekelen (2015) afirmou que em aterros estaqueados reforçados com geossintéticos, a maior parte da carga vertical é transmitida diretamente para as estacas. A fração restante da carga vertical não transferida para as estacas é absorvida, com parte sendo absorvida pelo reforço e parte pelo solo mole, como mostra a figura 7.

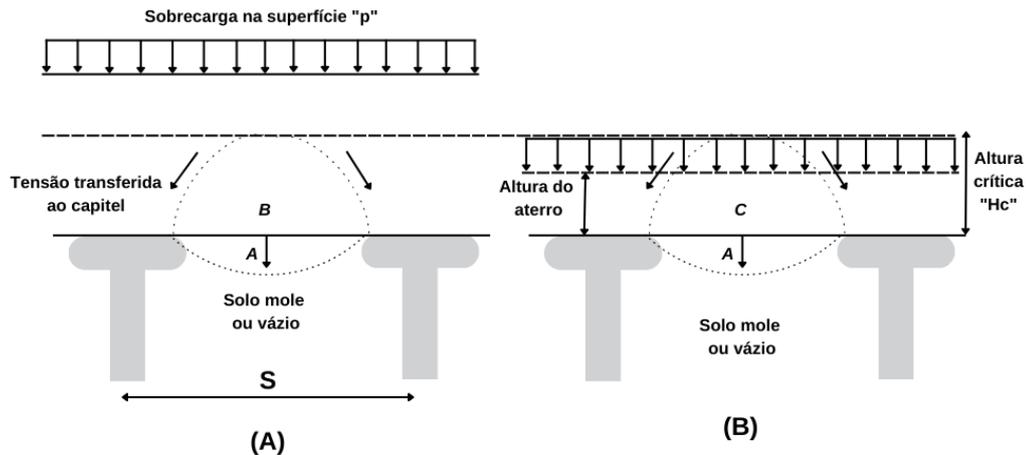
Além disso, Eekelen (2015) compreende que o arqueamento é um fenômeno que ocorre nos solos, especialmente nos granulares. Nesse processo, as tensões verticais se redistribuem e se concentram com maior intensidade nas áreas adjacentes de maior rigidez.

Eekelen, Bezuijen e Oung (2003, p.3) explicam que:

Na mecânica clássica dos solos, assumimos que o peso do solo resulta em uma pressão vertical abaixo desse solo (ponto A na Figura 7). A arqueação é o fenômeno em que a pressão é transferida para zonas rígidas adjacentes a esse ponto. Tanto a figura (A) quanto a (B) mostram o princípio da arqueação. O tensão vertical no ponto A é menor do que $(\gamma \cdot H + p)$. Todo o peso do solo e a carga superior na Figura 1 são transferidos diretamente para as estacas, exceto nas áreas B e C e na parte destacada da carga superior sobre as áreas B e C.

A definição da espessura da camada leva à altura crítica, representada por H_c . Em aterros estaqueados, H_c é interpretado de diferentes maneiras por vários pesquisadores. Para Chen (2009), é a altura na qual qualquer carga adicional no topo

Figura 7 – (A) Arqueamento total ou completo e (B) arqueamento parcial ou incompleto



Fonte: Van Eekelen et al. 2003 Apud Fonseca, 2017

do aterro é transferida diretamente para as estacas. Outros a consideram como a altura a partir da qual o arqueamento se desenvolve completamente, conforme mostrado na Figura 7.

2.3.2 Aterro, Geossintético, Capitel e Fundação

Segundo Eekelen (2015), enfatiza que o aterro pode ter diferentes camadas de solo, pedra britada ou materiais similares, escolhidos de acordo com o terreno e as cargas. Geralmente, não há ligação direta entre estacas e aterro. Usa-se uma camada de distribuição para essa transição, reforçada com geossintéticos, como mostra na Figura 8, para distribuir melhor as cargas pelo sistema, melhorando sua eficiência.

Figura 8 – (a) Geogrelha e (b) Aplicação da geogrelha

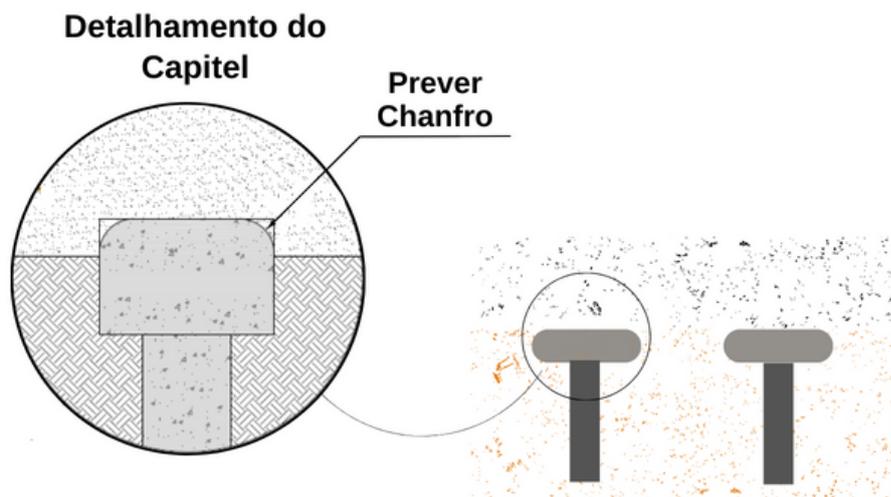


Fonte: Adaptado - TenCarte (2010)

De acordo com a empresa fornecedora de geossintéticos TenCarte (2010), as geogrelhas são constituídas por fios de poliéster de alta resistência e alto módulo, envoltos por um revestimento polimérico resistente. Suas capacidades de resistência à tração variam de 35 kN/m a 600 kN/m. Esses materiais exibem robusta resistência à instalação e alta durabilidade em diversas condições como mostra a Figura 8 .

Em relação à geometria do capitel, localizado na extremidade superior da estaca conforme mostrado na Figura 9, Almeida e Marques (2010) mencionam que os capitéis podem ter várias formas, como circulares, quadradas, esféricas, com ou sem reforço. Nos capitéis com reforço de geossintético, o formato ideal é aquele que não possui bordas afiadas.

Figura 9 – Detalhamento Capitel



Fonte: O autor (2023)

Farias (2002) também destaca que a inclusão do geossintético visa fortalecer a base do aterro e otimizar a distribuição da carga para as estacas, permitindo um maior espaçamento entre elas e redução das dimensões dos capitéis. Além disso, esse reforço com geossintéticos aprimora a distribuição das tensões no solo, reduzindo deformações e aumentando a segurança da construção. Isso resulta em menor consumo de material de aterro e melhor separação entre o material de aterro e o solo de fundação.

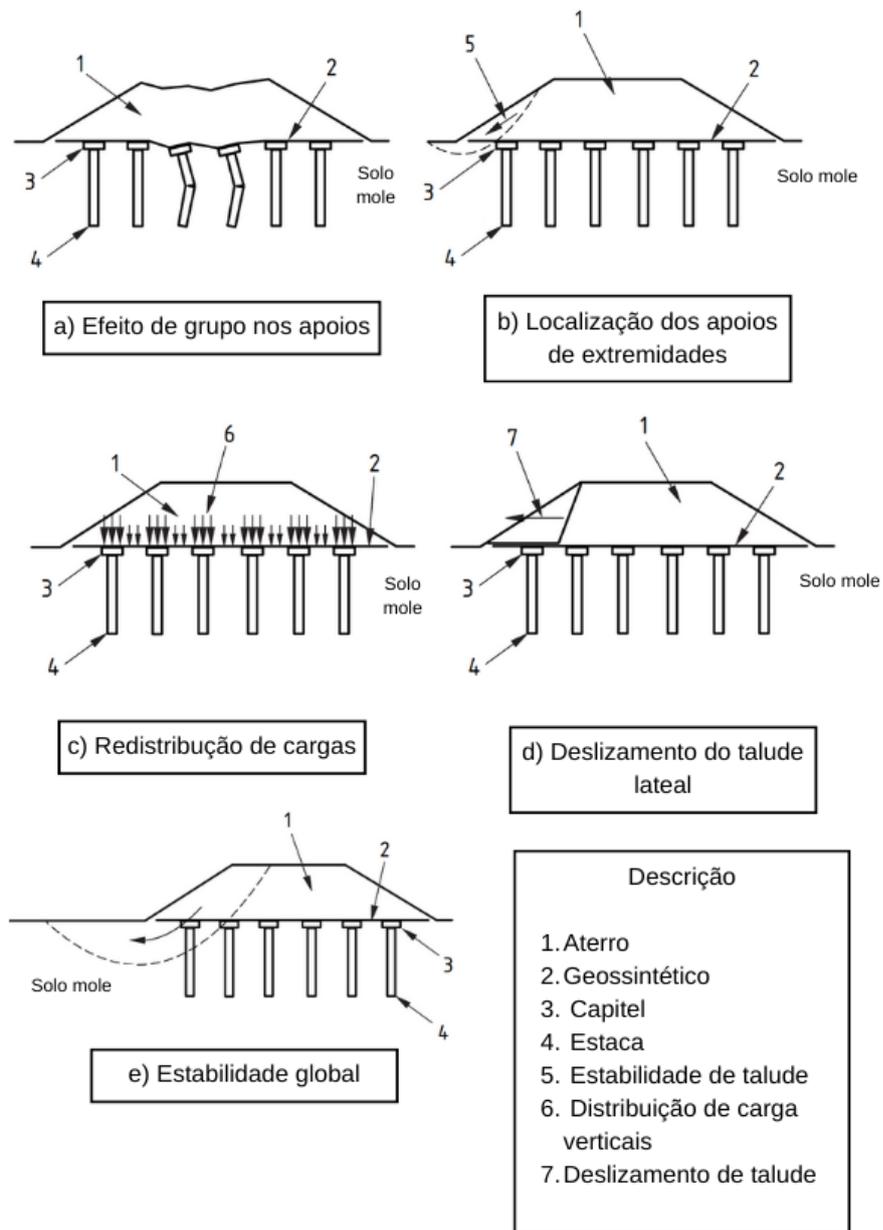
Segundo BEZERRA (2003), o termo "fundações" engloba elementos estruturais como radier, sapata, tubulão e estaca na construção civil e engenharia estrutural, sendo sua função transferir os esforços da superestrutura para o solo. Na engenharia geotécnica, a definição de fundação também abrange o próprio solo que sustentará as cargas da edificação.

Uma fundação deve ser projetada para suportar o peso da estrutura e transmiti-lo aos estratos mais profundos, minimizando recalques excessivos. Seguindo a norma Brasileira de execução de fundações NBR 6122 (2019), um projeto de fundações precisa assegurar a segurança em relação aos Estados-Limite Último (ELU) e aos Estados-Limites de Serviço (ELS). O ELU diz respeito à prevenção de colapso ou ruptura da obra, enquanto o ELS abrange questões como deformações, trincas e outros defeitos.

Conforme a norma brasileira de execução de fundações da NBR 6122 (2019) e a norma britânica BS8006-1 (2010), que descreve os Estados-Limites de Serviço

(ELS), ilustrado na Figura 10, são considerados os seguintes fatores:

Figura 10 – Estado de limite último



Fonte: Adaptado de BS8006-1 (2010)

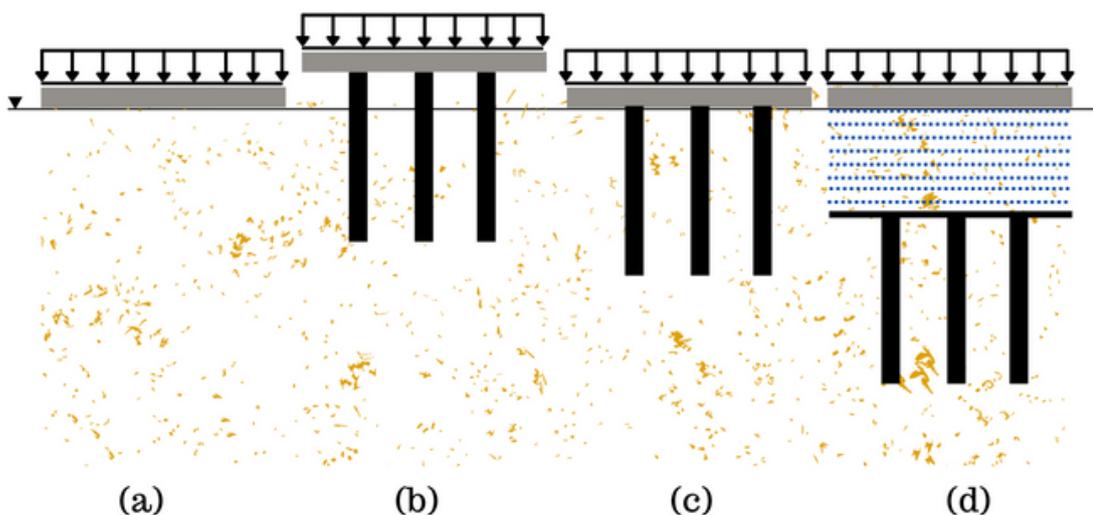
- a) O efeito de grupo ilustrado na Figura 10a ocorre um fenômeno que ocorre quando estacas ou pilares são organizados em conjuntos, gerando interações complexas entre eles devido às influências mútuas das cargas e deformações. Essas interações podem redistribuir forças e momentos entre as estacas, afetando sua capacidade de carga e o desempenho geral da estrutura.
- b) A Localização dos apoios de extremidades, conforme Figura 10b, refere-se à posição estratégica dos pontos de suporte nas extremidades de uma estrutura.

Esses pontos de apoio são onde a estrutura se fixa para resistir às cargas. Determinar essas posições de forma precisa é essencial para garantir a estabilidade.

- c) A distribuição de carga ilustrado na Figura 10c, se refere à transmissão eficaz das forças e cargas aplicadas a uma estrutura. Quando uma carga é aplicada, ela se espalha pelos elementos estruturais e é transmitida com segurança aos pontos de apoio.
- d) O deslizamento lateral (Figura 10d) é quando um talude não suporta as cargas, como o peso do solo ou a pressão da água, ele pode se mover lateralmente. Chuvas intensas e variações de umidade podem agravar isso. Ao projetar taludes, considera-se a estabilidade do solo, ângulo de inclinação e cargas para evitar o deslizamento.
- e) Por fim, a consideração da estabilidade global (Figura 10e) envolve a análise de diversos aspectos, tais como equilíbrio estático, interação entre elementos, resistência dos materiais, configuração de apoio, comportamento estrutural sob diferentes carregamentos, influências ambientais, geometria e forma. A estabilidade global assegura a segurança da estrutura em situações diversas, incluindo cargas normais e eventos extremos para garantir que a estrutura cumpra requisitos de segurança e desempenho ao longo do tempo.

De acordo com GARCÍA (2021), existem quatro tipos principais de fundações identificados na Figura 11.

Figura 11 – Tipos de fundações: a) fundação superficial, b) grupo de estacas, c) radier estaqueado e d) inclusões rígidas



Fonte: O autor

As fundações superficiais transmitem cargas diretamente ao solo, distribuindo-as na base de elementos estruturais como sapata, bloco ou radier (Figura 11a). Fundações profundas convencionais transmitem a carga por meio de um bloco

de fundação, distribuindo-a aos estratos mais profundos por estacas (Figura 11b). Fundações profundas do tipo radier estaqueado usam estacas para parte das cargas, enquanto outra parte é distribuída na camada superficial do bloco ou radier (Figura 11c). Fundações sobre inclusões rígidas envolvem elementos verticais conectados a uma laje sem união estrutural, geralmente usando uma camada de distribuição entre o bloco e as inclusões (Figura 11d).

2.4 APLICAÇÕES

Conforme delineado nos tópicos anteriores, o método de aterro sobre estacas para solos moles representa uma técnica de engenharia geotécnica que busca oferecer uma solução eficaz e segura para a construção em terrenos com capacidade de suporte baixa. Neste método, estacas são empregadas como elementos de fundação profunda para transmitir as cargas do aterro para um substrato mais resistente, reduzindo assim as tensões na camada de solo compressível. Este procedimento se revela fundamental para evitar recalques excessivos e garantir a estabilidade das estruturas erguidas sobre esses solos problemáticos.

Segundo Cardoso (2009), a técnica de aterro sobre estacas engloba a combinação de vários elementos, com destaque para as estacas e o próprio aterro. As estacas, constituídas por materiais como concreto armado ou aço, são elementos rígidos e verticais que são cravados ou perfurados no solo até atingirem uma camada de solo mais resistente. Elas funcionam como pilares que sustentam a carga do aterro e a transferem para o substrato mais competente, evitando, assim, a compressão excessiva do solo mole.

Em resumo, o método de aterro sobre estacas para solos moles representa uma estratégia eficaz para a construção em terrenos problemáticos. Ele combina elementos rígidos, como estacas, com aterros bem projetados para garantir a estabilidade e segurança das estruturas.

A TenCate Geosynthetics também apresenta estudo de caso com a aplicação de geossintéticos, abrangendo, o método fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

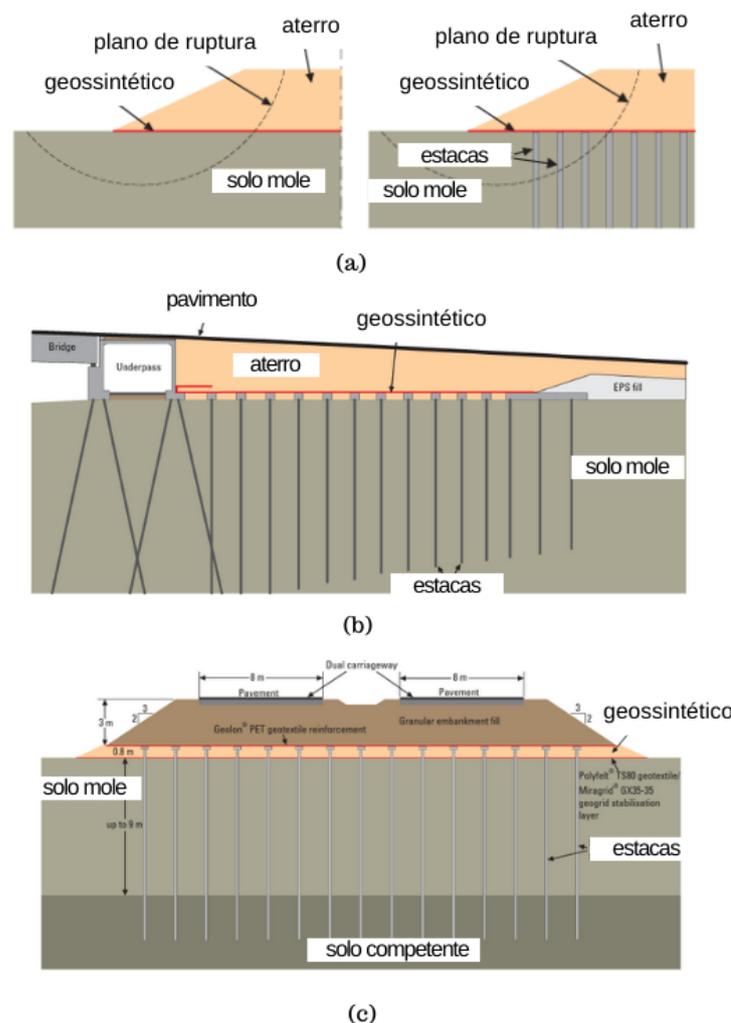
No "Reinforced Soil Case Studies"apresentado pela TenCarte (2010), são apresentadas diversas aplicações do geossintético, nas quais se podem evidenciar várias aplicações na metodologia de aterro sobre estacas, como ilustrado na Figura 12.

- a) Em aterros sobre solos moles, uma camada de reforço geossintético é adicionada à base para melhorar a estabilidade. Isso permite construir aterros mais altos com taludes laterais mais íngremes do que seria possível sem esse reforço.
- b) O projeto envolveu a construção de uma nova ponte e uma rede de estradas conectadas, exigindo várias pontes menores e passagens de tráfego. A área de

fundação tinha uma camada de "argila mole de Bangkok", altamente compressível, sobre uma camada de argila rígida. Para prevenir assentamentos diferenciais, utilizaram-se estacas de concreto pré-fabricadas e geotêxteis de reforço em áreas críticas. O projeto garantiu estabilidade e minimizou os problemas de assentamento, contribuindo para o sucesso da infraestrutura;

- c) O projeto atravessou o pântano de Flurry, composto por turfa e sedimentos moles de até 9 metros de profundidade. Duas abordagens foram usadas: remover a turfa e substituí-la por material granular em áreas rasas, e aplicar um aterro reforçado por estacas em áreas profundas, usando geotêxteis e pré-carregamento para reduzir deformações a longo prazo. O monitoramento mostrou estabilidade no aterro, com mínimo assentamento na superfície;

Figura 12 – a) Aterros reforçados na base em solos moles, b) Aterros reforçados na base sobre estacas: Aproximações à ponte Wat Nakorn-In, Bangkok, Tailândia. c) Aterros reforçados na base sobre estacas: Autoestrada A1/N1 de Dundalk a Newry, Irlanda.



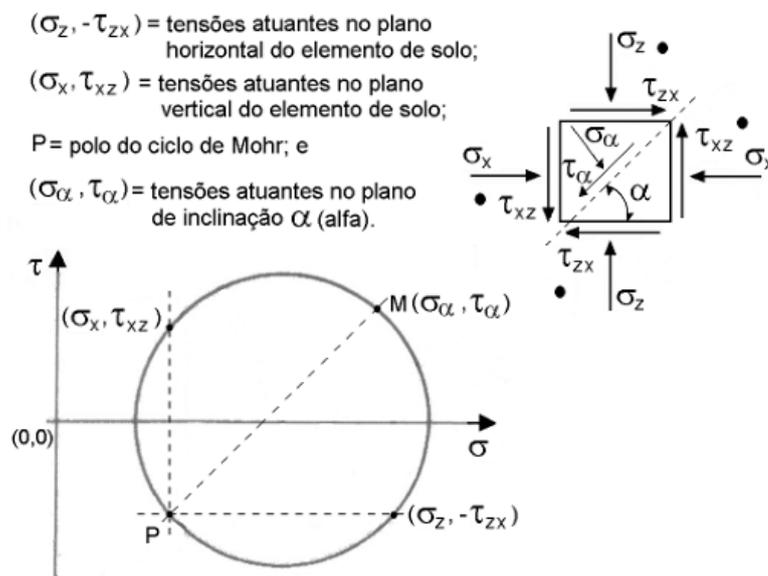
Fonte: TenCarte (2010)

2.5 MODELO CONSTITUTIVO: MOHR-COULOMB

A teoria de Mohr-Coulomb argumenta que a simultaneidade de tensões normais e de cisalhamento resulta em uma condição mais crítica do que a avaliação individual das tensões máximas. Os parâmetros fundamentais que governam essa interação crítica são o coesão c' e o ângulo de atrito interno φ' . No contexto da ruptura do solo, estes critérios representam princípios que delineiam a maneira como os materiais "falham" conforme a Figura 13.

Neste contexto, a estrutura de aterro é composta por material granular, incorporando agregados como brita, areia e rachão. Essa mistura, combinada a práticas construtivas seguindo os padrões de engenharia, resulta em um solo resistente às cargas provenientes do peso próprio da estrutura e de cargas móveis, prevenindo recalques. Esse tipo de aterro desempenha a função da plataforma de transferência e de carga de também conhecido como PTC.

Figura 13 – Determinação das tensões atuantes em um plano do interior do elemento de solo, que é inclinado com um ângulo (alfa) com a horizontal



Fonte: FTC (2014)

2.6 MODELO CONSTITUTIVO: HARDENING SOIL

Segundo GARCÍA (2021), o modelo constitutivo selecionado para representar o comportamento do material na camada abaixo da distribuição de carga é o Hardening Soil Model (HSM) no qual apresenta parâmetros mostrados na Tabela 01. O HSM é uma ferramenta robusta que permite a consideração de diversos aspectos cruciais no

Tabela 1 – Parâmetros do modelo Hardening Soil

Parâmetros HSM	
$c'(kPa)$	Coesão efetiva
ϕ	Ângulo de atrito efetivo
ψ	Ângulo de dilatância na ruptura
$E50_{ref}$	Módulo de rigidez secante de referência
$E_{oed_{ref}}$	Módulo de rigidez tangente em ensaios oedométricos
$E_{ur_{ref}}$	Rigidez de carregamento e descarregamento
m	Potência -Dependência da rigidez com o estado de tensão do solo
ν	Coefficiente de Poisson para condição de carregamento - descarregamento
p	Tensão de referência
K	Coefficiente de pressão lateral do solo normalmente adensado
POP	Pressão prévia à sobrecarga
OCR	Razão de ruptura (Relação entre q_f e q_a)
R_f	Razão de pré-adensamento

Fonte: O autor (2023).

estudo do solo submetido a carregamentos variados e cíclicos, como os encontrados em eventos sísmicos.

GARCÍA (2021) conta que este modelo apresenta um perfil com uma relação tensão-deformação hiperbólica, incluindo endurecimento por cisalhamento e compressão. Sua versatilidade é evidenciada por duas superfícies de escoamento, descrevendo melhor o comportamento do solo sob diferentes cargas.

Além de considera a variação dos parâmetros do solo conforme as tensões aplicadas, tornando simulações mais realistas em relação às condições reais de carga e descarga. Também representa a dilatância do solo, ativada antes do ponto de ruptura.

De uma forma geral o modelo HSM tem 11 parâmetros que podem ser obtidos a partir de ensaios triaxiais e oedométricos convencionais. É um modelo com endurecimento isotrópico que reproduz com maior precisão o comportamento elasto-plástico progressivo.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros considerados pelo modelo, a condição inicial de tensões se determina a partir dos parâmetros K_0 e POP ou OCR .

3 MÉTODO

O método de pesquisa está descrevendo a produção do estudo, incluindo a metodologia, tipo de pesquisa, coleta e análise de dados. Ele está promovendo a transparência, justificando escolhas metodológicas, demonstrando a adequação do método ao problema e abordando limitações e delimitações do estudo

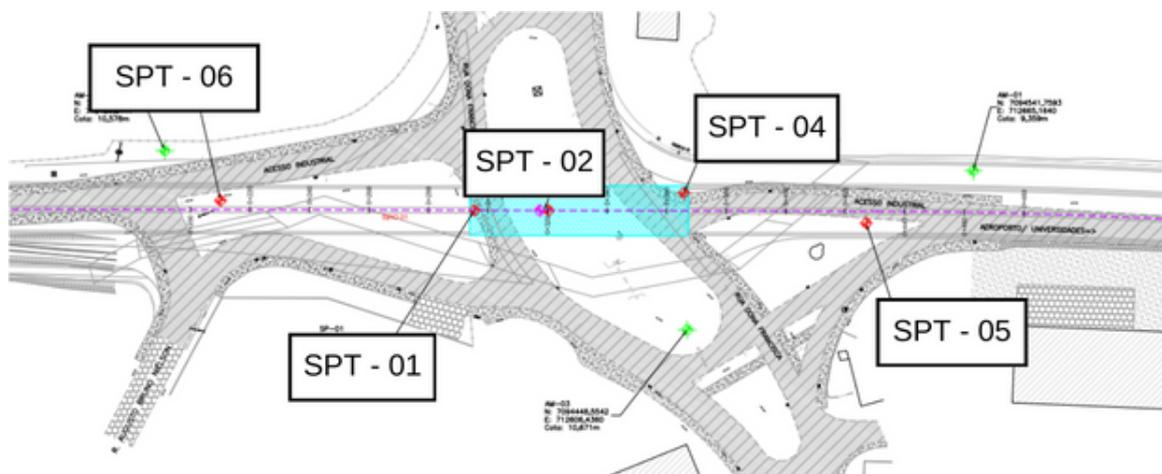
Neste contexto a estrutura da metodologia está definida como:

1. Descrição do estudo de caso;
2. Ensaio Geotécnicos: Análise e escolha do perfil geotécnico, considerando o Ensaio de Adensamento, Su em relação a profundidade, SPT e CPTu;
3. Calibração e Dados de Entrada: Interpretação dos Ensaio Triaxiais e Ajustes e Calibração do Modelo;
4. Modelagem Numérica 2D e 3D;
5. Resultados;

3.1 ESTUDO DE CASO

Realizando o estudo de caso, está sendo utilizado o Projeto Executivo de Interseção em Desnível - Implantação de Elevado entre o Eixo Industrial (Km 3+500) e Rua Dona Francisca. Para compreender os problemas geotécnicos da região, foram sendo realizadas coletas de amostras e sondagens em pontos-chave. Isso possibilitou a identificação de possíveis causas de problemas, a verificação da consistência do solo, a identificação de suas camadas, a análise de solos moles, a avaliação da estabilidade dos taludes e de outros aspectos importantes.

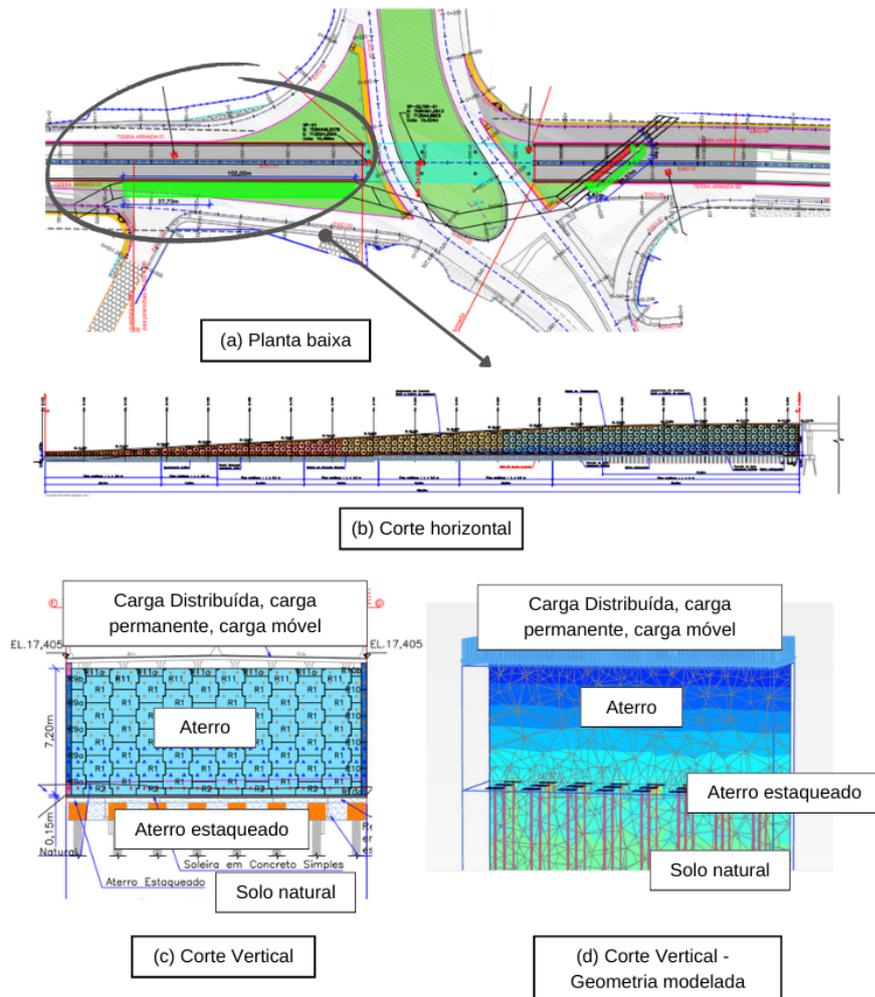
Figura 14 – Mapamento dos ponto de sondagem



Fonte: Secretaria de Infraestrutura do Estado (2020)

A Figura 15a está exibindo a planta baixa, indicando o local onde estão sendo posicionadas as estacas por meio de círculos. Na Figura 15b, está sendo apresentada uma visão de corte horizontal, permitindo a observação das estacas no primeiro terço da rampa que está compondo o elevado. O propósito dessa imagem não é detalhar o projeto, mas sim ilustrar a disposição da obra. Por fim, as Figuras 15c e 15d estão oferecendo cortes verticais, servindo como referência para a modelagem tridimensional. A representação ao lado está sendo do projeto no software de elementos finitos. Essas imagens estão visando compreender o que está sendo considerado, em ordem sequencial: carga do peso próprio, carga móvel, aterro e estacas como componentes separados.

Figura 15 – Relação entre a geometria modelada e o projeto: a) planta baixa b) corte horizontal c) corte vertical d) corte vertical da geometria modelada



Fonte: O autor (2023)

Seguindo as normas brasileiras, especialmente a NBR 6484 de 2001 para Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos e a NBR 8036 de 1983, classificando o solo com base na resistência à penetração do amostrador padrão no

ensaio SPT, diferenciando a compactação (para areia) e a consistência (para argila).

Na Figura 14, os pontos de sondagem foram estrategicamente indicados para dimensionar a obra. Inicialmente, não se previa a necessidade de aterro, pois as análises de resistência do solo pelas sondagens SPT estavam sendo consideradas satisfatórias pelos responsáveis, a ponto de não se considerar um melhoramento da resistência do solo natural. No entanto, durante a execução da obra, foram encontrados materiais com baixa resistência que não estavam previstos.

Para solucionar esse problema, o projetista optou por utilizar a técnica de aterro estaqueado, que se mostra como uma alternativa viável para superar as limitações encontradas e garantir a estabilidade necessária ao projeto. É essencial considerar as cargas dinâmicas dos veículos, bem como o peso do elevado, o que demanda uma análise detalhada do impacto dessas cargas na estrutura.

O aterro visível na Figura 15 é feito de material granular, incorporando brita, areia e rachão. Com práticas construtivas seguindo padrões de engenharia, isso resulta em um solo resistente tanto ao peso da estrutura quanto às cargas móveis, evitando afundamentos. Esse tipo de aterro atua como plataforma de transferência de carga (LTP) mais detalhe dos parâmetros desse solo no item 3.3.1.

Escolhemos o método de Mohr-Coulomb para a camada de aterro e o método HSM (Hardening Soil) para a camada de solo natural por serem adequados para lidar com diferentes situações de carga, descarga e consideração de fenômenos como a dilatância do solo.

Figura 16 – Execução da obra de aterro estaqueado



a) Arrasamento das estacas

b) Capitel

Fonte: AZIMUTE (2023)

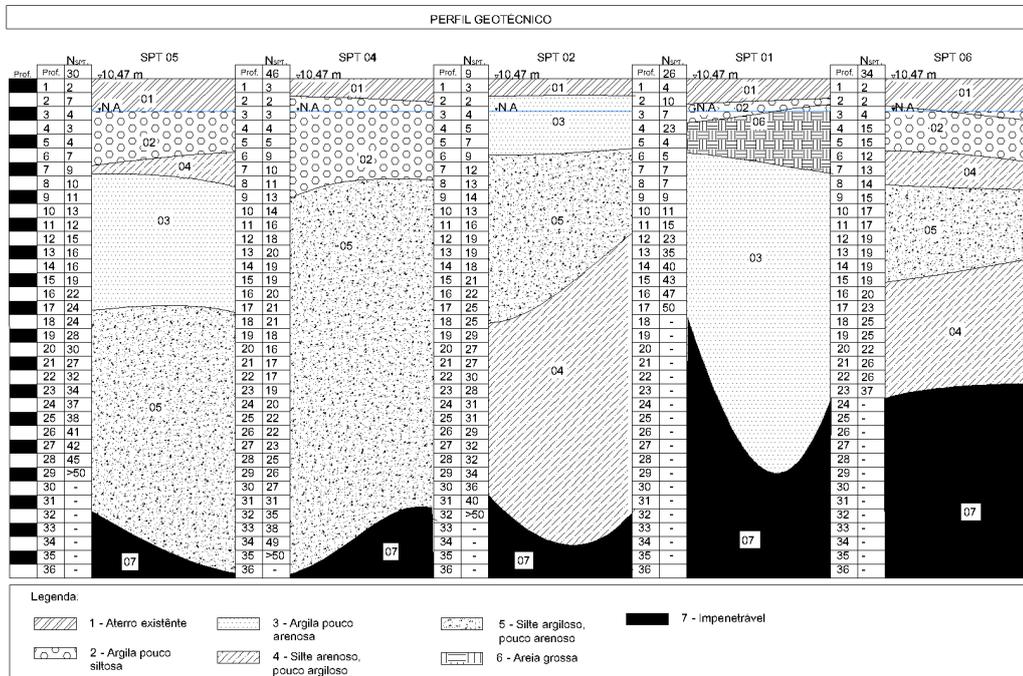
3.2 ANÁLISE DO PERFIL GEOTÉCNICO

Partindo dos perfis de sondagem identificados na Figura 20, foi elaborado um perfil geotécnico para identificar as características do solo, buscando definir o perfil que apresentasse a resistência mais crítica. Além da análise com base no SPT, foram utilizadas sondagens CPT-u. No entanto, constatamos características semelhantes em todos os perfis. Inicialmente, há uma camada de aterro, cuja composição pode variar, geralmente contendo uma mistura de solo, rochas britadas ou outros materiais de preenchimento. Logo abaixo, deparamo-nos com uma camada de argila pouco siltosa, caracterizada por plasticidade e coesão

Na sequência, temos um estrato de silte argiloso, que possui menos plasticidade que a argila, mas ainda apresenta certa coesão e compressibilidade. Por fim, identificamos uma camada de silte arenoso pouco siltoso, que tende a ter maior granularidade.

Analisando e definindo os parâmetros geotécnicos utilizados neste trabalho, consideramos o mesmo princípio da norma BS8006, aumenta-se as cargas desfavoráveis e diminui-se os esforços resistentes para obter um dimensionamento com margem de segurança.

Figura 17 – Perfil geotécnico



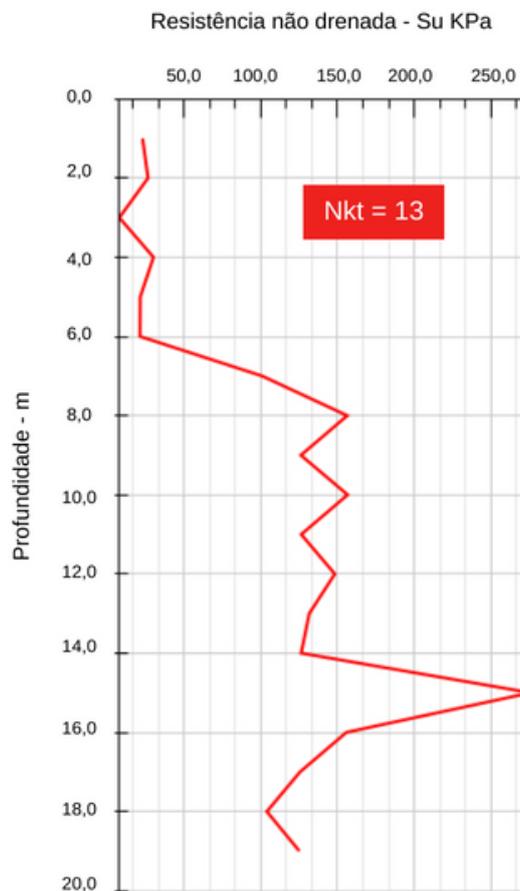
Fonte: O autor (2023)

Considerando o contexto, desenvolvemos o perfil geotécnico a partir da sondagem SPT, evidenciado na Figura 17. Identificando o solo menos competente com

base nos valores exclusivos do N_{spt} e na análise do CPT-u, determinamos a resistência não drenada S_u , ilustrada na Figura 18. A partir dessas análises, estabelecemos que a sondagem SPT 02 seria a mais coerente para extrair os dados necessários à análise do modelo numérico.

A resistência não drenada do solo (S_u) ocorre quando um carregamento externo é aplicado a uma velocidade mais rápida do que a taxa em que a poropressão induzida pode ser dissipada no solo saturado. Construímos o gráfico S_u x Profundidade para o perfil 02, como evidenciado na Figura 18.

Figura 18 – S_u x Profundidade



Fonte: O autor (2023)

Determinar o peso específico de cada camada de solo é crucial nesta análise Equação 1. Essa etapa é fundamental como ponto de partida para a calibração, permitindo a definição inicial dos parâmetros. Essa metodologia será mais detalhada no item 3.3.1. Além disso, para a definição de S_u , estabelecemos que N_{kt} é igual a 13, conforme definido pelo projeto, através da Equação 2.

A compressibilidade do solo se refere à sua capacidade de deformação sob carga, influenciada pelo tipo de solicitação e pelas características do solo.

Através da Equação 1, determinamos o peso específico do solo, devido à falta

de ensaios de caracterização do solo, enquanto na Equação 2 calculamos a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u).

$$\frac{Y}{Y_w} = 0,27 \cdot [\log(Rf)] + 0,36 \cdot \left[\log \frac{q_t}{P_a} \right] + 1,236$$

Onde:

Y – peso específico do solo Eq. (1)

Y_w – peso específico da água

R_f – razão de atrito = $(f_s/q_t)100\%$

P_a – pressão atmosférica

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{KT}} \quad \text{Eq. (2)}$$

onde:

S_u - Resistencia não drenada

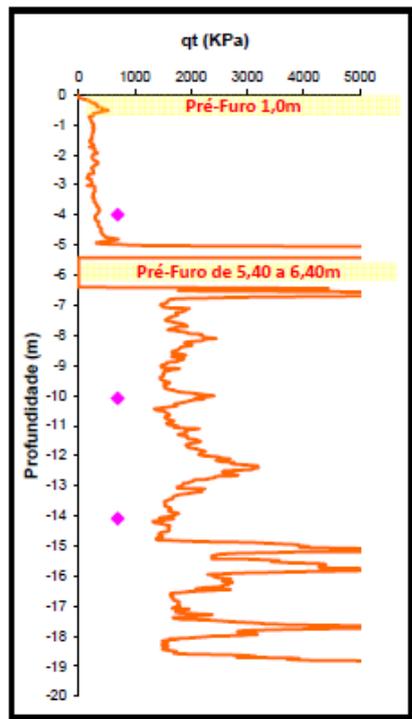
q_t - Resistência da ponta

N_{KT} - Fator de capacidade de carga

σ'_{v0} = Tensão efetiva

Observando o gráfico resultante, analisando a variação da resistência ao cisalhamento não drenada com as mudanças de resistência de ponta, percebemos na Figura 18 que entre 2 e 6 metros de profundidade, há uma argila mole com baixa capacidade de carga. Esses parâmetros foram obtidos por meio do CPT-u.

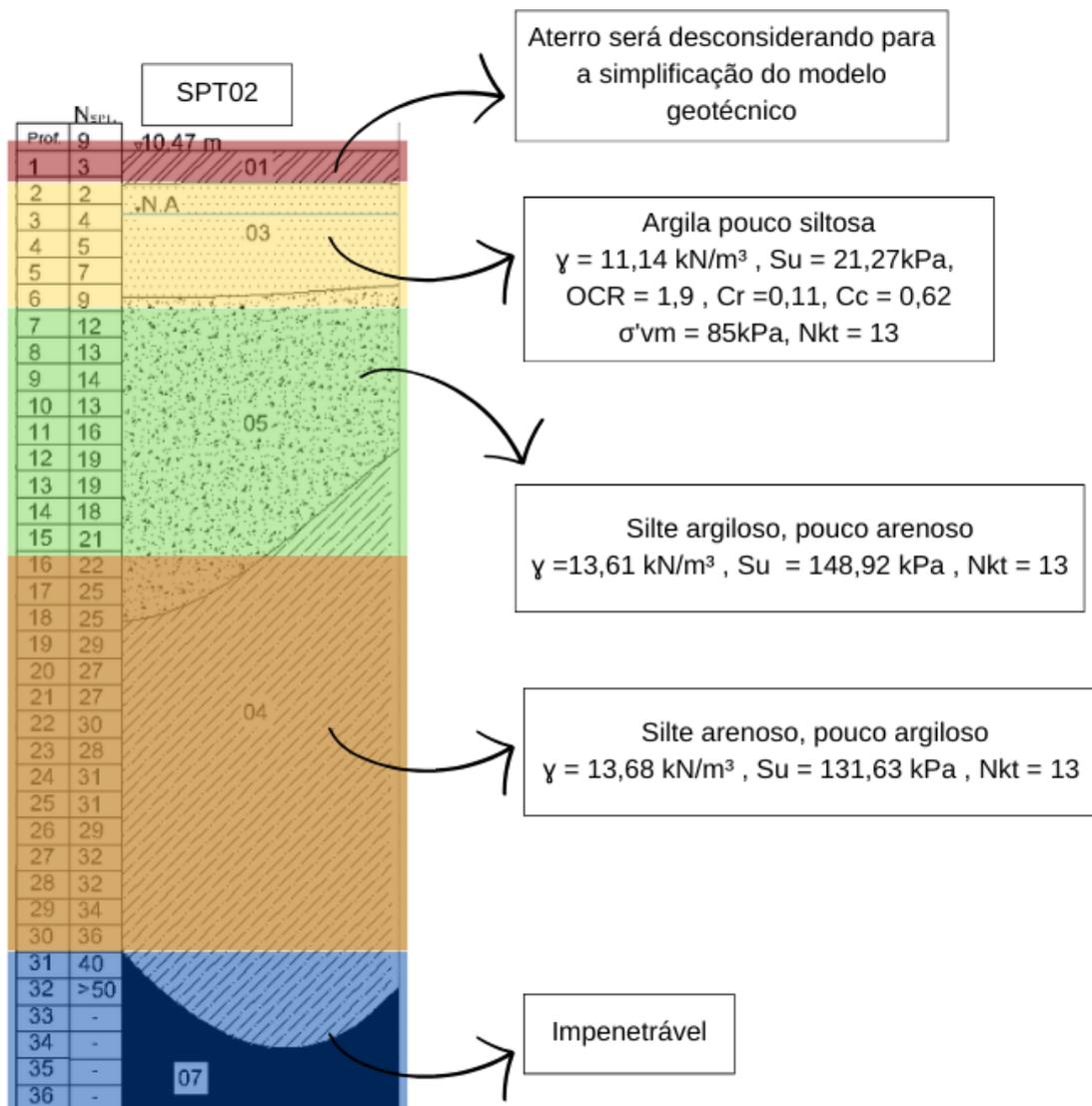
Figura 19 – Resistência de ponta x profundidade



Fonte: O autor (2023)

Por fim, definimos o perfil, como mostra na Figura ?? que será utilizado para

Figura 20 – Perfil geotécnico - SPT02



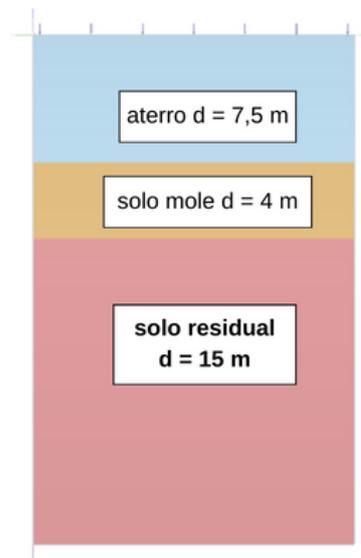
Fonte: O autor (2023)

a modelagem. E de formar simplificar além de escolher apenas um perfil, também escolheremos 3 camadas de solo para a análise, o aterro do projeto, o solo mole defino como solo mais crítico e um solo silte.

3.3 MODELAGEM

O método dos elementos finitos envolve a divisão do problema em elementos menores, formulando seu comportamento com base na geometria representada na Figura 21 no qual leva-se em consideração as propriedades do material em questão, conectados por pontos nodais. Esses elementos são representados por equações matriciais, integrando-se em um sistema global resolvido com as condições de contorno adequadas, fornecendo os valores desejados da variável em cada ponto da malha.

Figura 21 – Representação simplificada das camadas solo



Fonte: O autor (2023)

Tabela 2 – Parâmetros de entrada

	Solo Residual	Solo Natural	Aterro	Estaca	Capitel
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	Haderning Soil	Mohr-Coulomb	Elastic	Elastic
Diametro (m)	-	-	-	0,6	1
H (m)	-	-	-	21	1
$\gamma kN/m^3$	-	13	17	24	24
E_{ref}	40,00E3	-	50E3	25,04E6	25,04E6
$E_{50} kN/m^2$	-	3650	-	-	-
$E_{oed} kN/m^2$	-	2600	55,56E3	-	-
$E_{ur} kN/m^2$	-	12E3	-	-	-
ν	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
G_{ref}	15,38E3	-	20,83E3	-	-
e	0,5	1	0,5	-	-
c'	10,00	11	0	-	-
ϕ	35	21	33	-	-
OCR	-	1,90	-	-	-

Fonte: O autor (2023)

Utilizando valores de referencia para o método constitutivo Mohr-Coulomb e para o Haderning Soil os parâmetros como $\gamma kN/m^3$, $E_{50} kN/m^2$ os demais foram sugerido pelo Plaxis.

3.3.1 Calibração

Realizando o ensaio triaxial, busca-se avaliar as propriedades mecânicas do solo sob diferentes condições de tensão. Esse procedimento laboratorial oferece dados

essenciais, incluindo a resistência ao cisalhamento e informações sobre deformações, entre outros parâmetros, fundamentais para a análise.

Para calibrar no PLAXIS, a interpretação dos resultados do ensaio triaxial é crucial. Esses dados fornecem parâmetros essenciais, como resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito, que variam conforme o comportamento do solo estudado. Esses parâmetros são então inseridos no modelo para ajustá-lo à realidade observada.

Após a definição dos parâmetros obtidos pelo ensaio triaxial, eles são incorporados ao modelo geotécnico do PLAXIS. Em certos casos, é essencial ajustar esses parâmetros para garantir uma reprodução mais fiel do comportamento real do solo pelo modelo.

Neste estudo, foi necessária a calibração devido à ausência de um ensaio triaxial específico para a obra em análise. Com base nos ensaios de campo e laboratório, começamos a calibrar para obter resultados convergentes entre os dados de campo e laboratório, conforme ilustrado na Figura 23. Os testes disponíveis incluíram SPT, SPTU e ensaios de adensamento. O método HSM requer dados derivados do ensaio triaxial para definir seus parâmetros, levando-nos a selecionar o ensaio triaxial disponibilizado pela UFSC para alcançar características semelhantes às exigidas para a análise.

A Figura 23 ilustra esse processo, onde os dados de entrada conduzem à obtenção dos resultados. Dessa forma, é possível comparar e realizar ajustes nos parâmetros, promovendo pequenas modificações até alcançar um resultado altamente congruente. No decorrer deste contexto, foram realizadas quatro iterações, conforme evidenciado, a fim de garantir que as curvas geradas pelo software Plaxis se mostrassem coerentes com os resultados dos ensaios do solo em análise.

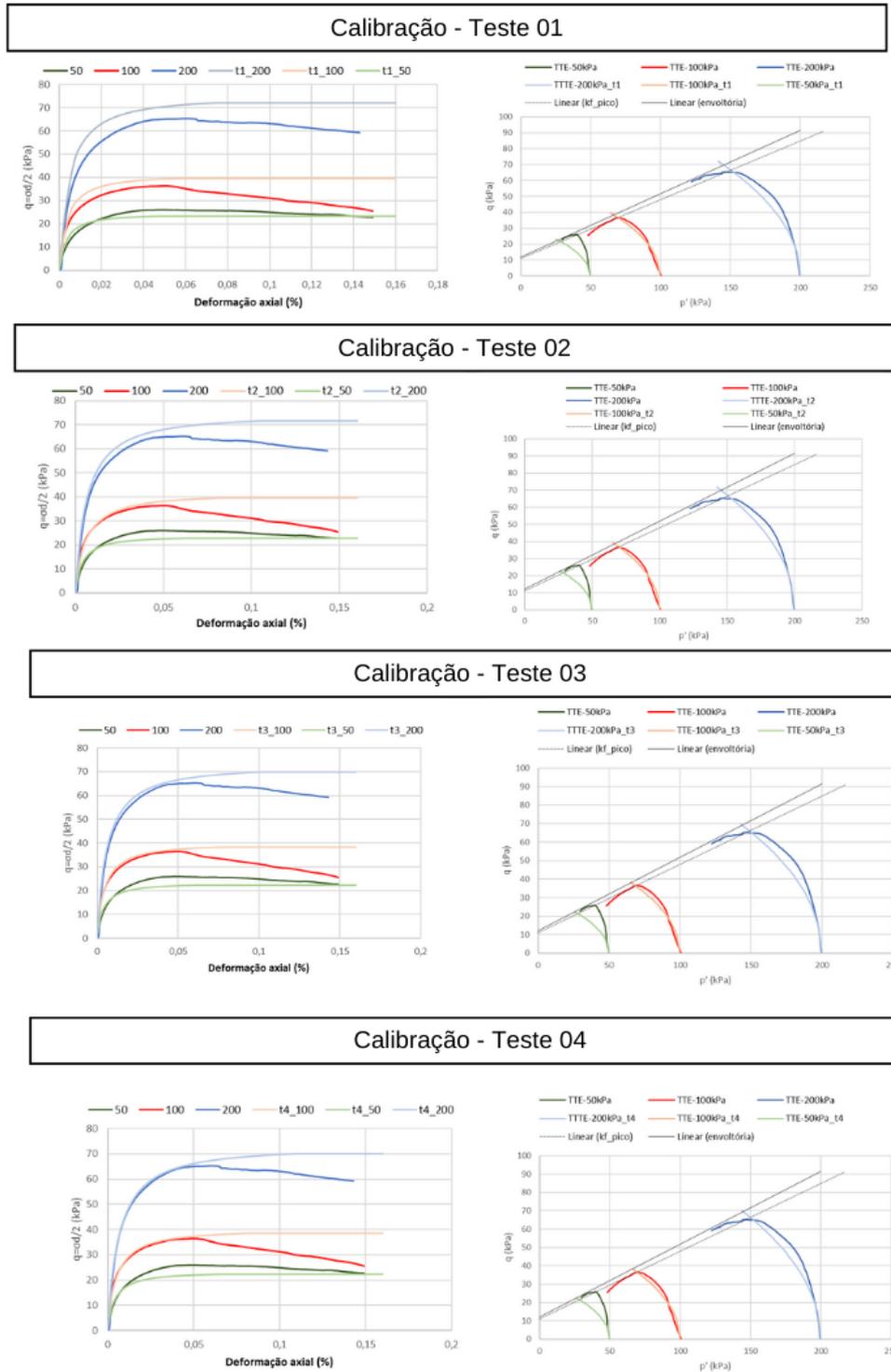
Quadro 2 – Parâmetros HSM

Parâmetro	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 04
γ_{nat}	11,14	11,5	11,5	9,5
γ_{sat}	12,08	12,5	12,5	10,5
e	1,2	1,2	1,18	1,9
E_{50}	4500	3700	3700	3650
E_{eod}	2683	2500	2500	2600
E_{ur}	1,20E+04	1,20E+04	1,20E+04	1,20E+04
ν	0,2	0,2	0,2	0,2
c'	11,96	11	11	11,00
Φ'	21,67	21,67	21	21
OCR	1,9	1,95	1,80	1,9

Fonte: O autor (2023).

Na Figura 22, destacam-se as curvas mais escuras, correspondentes aos

Figura 22 – Calibração dos Parâmetros Geotécnicos

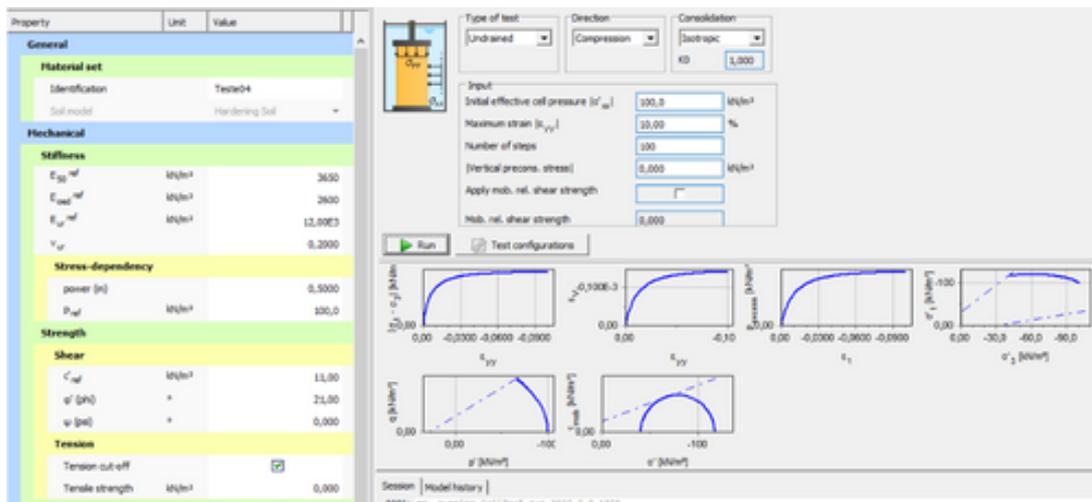


Fonte: O autor (2023)

resultados do ensaio triaxial de laboratório, enquanto as curvas em tons mais claros representam os dados gerados pelo software em análise.

Essa etapa permite ajustes nos parâmetros, possibilitando pequenas modificações até se atingir um resultado consistente, conforme demonstrado no

Figura 23 – Calibração com base no triaxial



Calibração Plaxis - Triaxial

Fonte: O autor (2023)

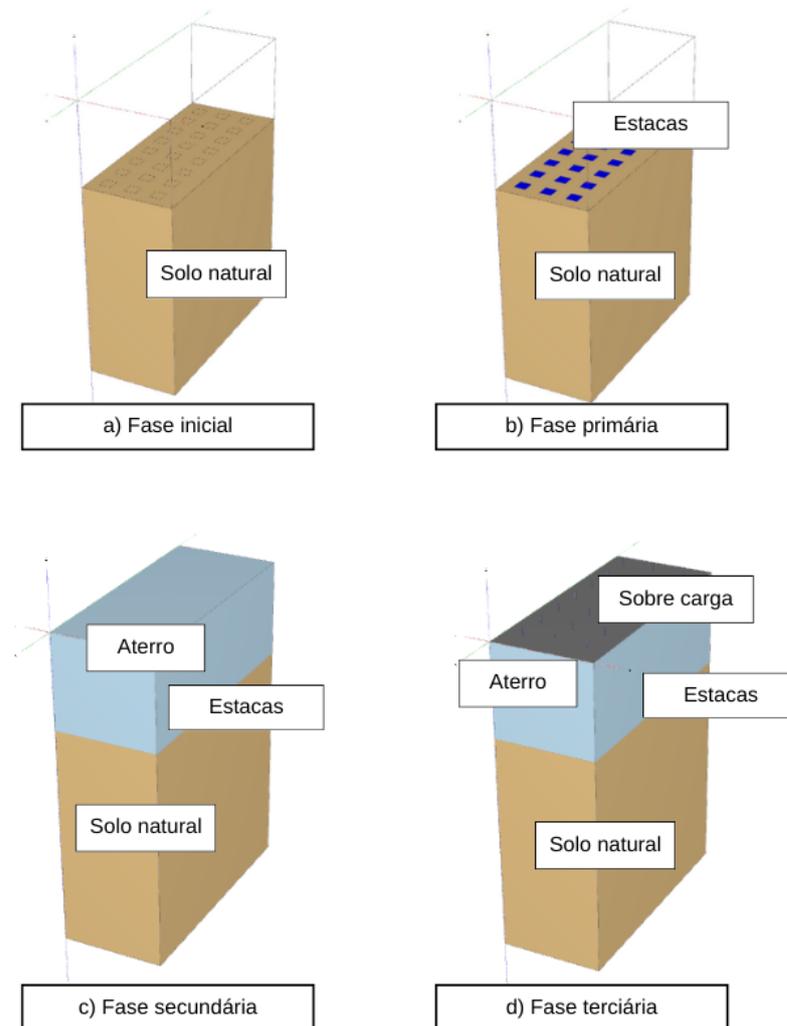
Quadro 2. Foram feitas variações nos parâmetros até o teste 4, escolhido para o desenvolvimento do trabalho. Durante esse processo, foram realizadas quatro iterações para garantir a consistência entre as curvas geradas pelo software Plaxis e os resultados dos ensaios do solo em análise.

A Figura 24 evidencia a relação existente entre o projeto e a geometria modelada no software Plaxis. A partir dessa representação, assumimos os seguinte fases construtiva:

- FASE INICIAL: Estado natural do terreno, sem qualquer tipo de intervenção ou modificação.
- FASE PRIMÁRIA: Terreno com a instalação de estacas e capitel, representando o início das intervenções na área.
- FASE SECUNDÁRIA: Etapa em que o terreno recebe estacas, capitel e aterro, evidenciando a continuidade das obras e acréscimo de material sobre o solo.
- FASE TERCIÁRIA: Momento em que a obra está completa, com estacas, capitel, aterro e a superestrutura concluída, representando a fase final da construção e a totalidade da estrutura em estudo.

Após a representação do projeto considerando as diferentes fases construtivas, o próximo passo consiste na criação de uma malha. Essa malha é uma estrutura de elementos finitos que compõem a base para a análise numérica no software, permitindo a simulação do comportamento do solo e das estruturas ao longo das diversas etapas do projeto.

Figura 24 – Fase construtiva: a) Fase inicial b) Fase primária c) Fase secundária d) Fase terciária



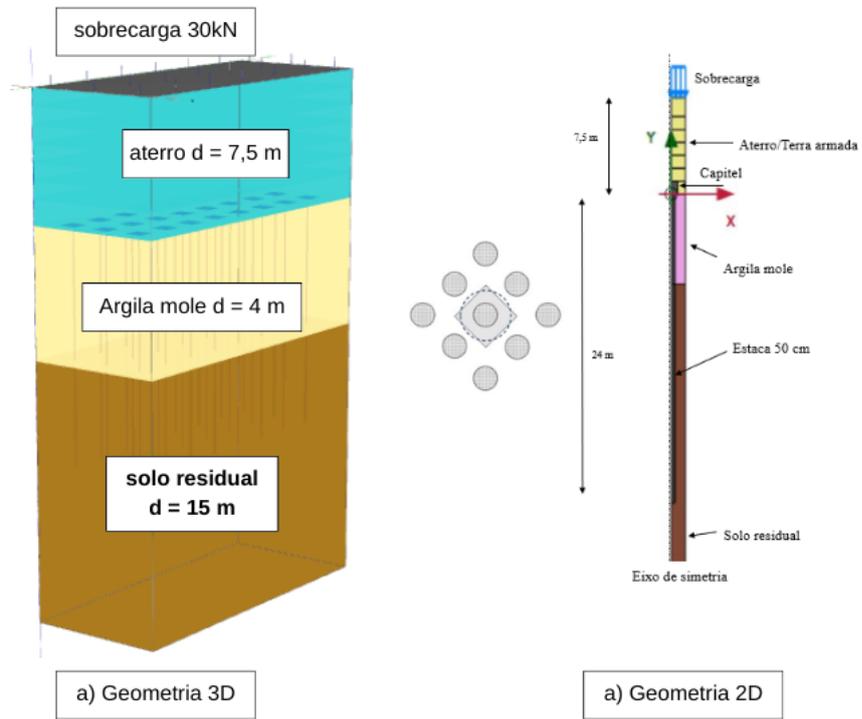
Fonte: O autor (2023)

3.3.2 Modelos da geometria

O estudo de caso está sendo baseado inicialmente em um modelo com espaçamentos de 2,25 metros entre as estacas. Em seguida, estão sendo realizadas variações nos espaçamentos, contemplando valores de 2,25, 3, 4 e 6 metros. O objetivo principal está sendo estabelecer uma correlação entre as tensões efetivas e os recalques, buscando identificar a relação ideal de custo-benefício para a minimização desses recalques.

Em relação às camadas de solos mostradas na Figura 25, está sendo optado por considerar apenas três estratos distintos. O primeiro está correspondendo ao aterro estabelecido no projeto e que está integrando o alicerce elevado. O segundo estrato está sendo referente ao solo mole, sendo essa a principal justificativa para a implementação do método de aterro estaqueado. O terceiro estrato está correspondendo às camadas mais profundas que estão fornecendo suporte para as fundações profundas.

Figura 25 – Modelo da geometria



Fonte: O autor (2023)

4 ANÁLISE E RESULTADOS

Optamos por realizar modelagens em ambas as dimensões, 2D e 3D, visando uma compreensão mais aprofundada do problema. Focamos nossa análise na distribuição de tensões e recalques, visando a estabilidade das estruturas. Os resultados das simulações, apresentados nos Quadros 3 e 4, revelam os recalques e tensões para diferentes espaçamentos. Vale ressaltar que percebemos uma variação mínima nos recalques ao ajustar os espaçamentos entre 3 e 4 metros.

Quadro 3 – Resultado simulação 2D - PLAXIS

Resultados/ Espaçamento (s)	2,25 m	3m	4m	6m	Sem estacas
Recalque mm	37,76	45,84	47,93	73,01	90,30
Tensão Máxima kN/m ²	450	634,3	877,5	1064	389,5

Fonte: O autor (2023).

Quadro 4 – Resultado simulação 3D - PLAXIS

Resultados/ Espaçamento (s)	2,25 m	3m	4m	6m	Sem estacas
Recalque mm	37,71	38,46	39,67	40,88	138,5
Tensão Máxima kN/m ²	678,7	669,6	667,2	667	658,8

Fonte: O autor (2023).

4.1 GEOMETRIA TESTE

Enfrentando dificuldades iniciais, buscávamos estabelecer uma geometria precisa que representasse com fidelidade a realidade, considerando parâmetros geotécnicos e detalhes cruciais do projeto.

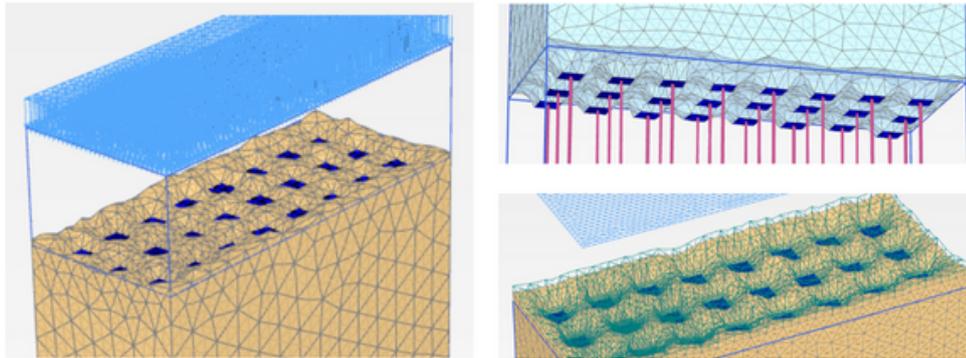
O primeiro modelo, representado na Figura 26, contempla 30 metros de argila mole com o aterro do projeto, carregado com cargas permanentes e móveis similares às do elevado e tráfego de veículos.

Inicialmente, o modelo parecia alinhado ao projeto do estudo de caso. No entanto, uma análise minuciosa revelou recalques positivos inesperados e afundamento das estacas no solo mole. Isso sugeria que as estacas não encontravam suporte adequado, especialmente com 21 metros do fuste em contato com solo de baixa resistência. Visualmente, isso era comparável a um objeto pesado afundando numa

superfície gelatinosa.

Após essa análise, identificamos uma camada adicional de solo residual, congruente com o perfil do SPT, proporcionando maior fidelidade. Para aprimorar ainda mais a análise, seria fundamental considerar todos os estratos de solo identificados no SPT e definir camadas críticas, incluindo uma base resistente para as fundações profundas.

Figura 26 – Representação da primeiro modelo



Fonte: O autor (2023)

4.2 MODELAGEM 2D

Durante a análise do modelo em 2D, estávamos utilizando um perfil representativo da metade da estaca. No estágio inicial, estávamos avaliando o solo sem intervenções adicionais, sendo essencial para justificar o projeto de aterro estaqueado. Os resultados estavam apontando um recalque de 90,30 mm, conforme sendo evidenciado na Figura 27, ilustrando o desfecho da simulação.

Na representação dos recalques, estávamos observando um gradiente de cores, em que tons azuis estavam indicando menores recalques e tons mais intensos estavam correspondendo aos maiores. Essa diferenciação cromática estava se tornando essencial devido à presença de uma carga distribuída no topo, prevendo-se recalques de cima para baixo. Visando minimizar os recalques para a mesma situação, estávamos procedendo à análise considerando estacas com espaçamentos de 2,25 metros.

A partir deste modelo, estávamos obtendo valores de 37,76 mm, conforme sendo evidenciado na Figura 28. Ao comparar com a primeira simulação, estávamos observando uma queda significativa de mais de 50% nos recalques. Apesar dessa redução substancial, estávamos optando por considerar espaçamentos maiores para compreender melhor o comportamento do solo.

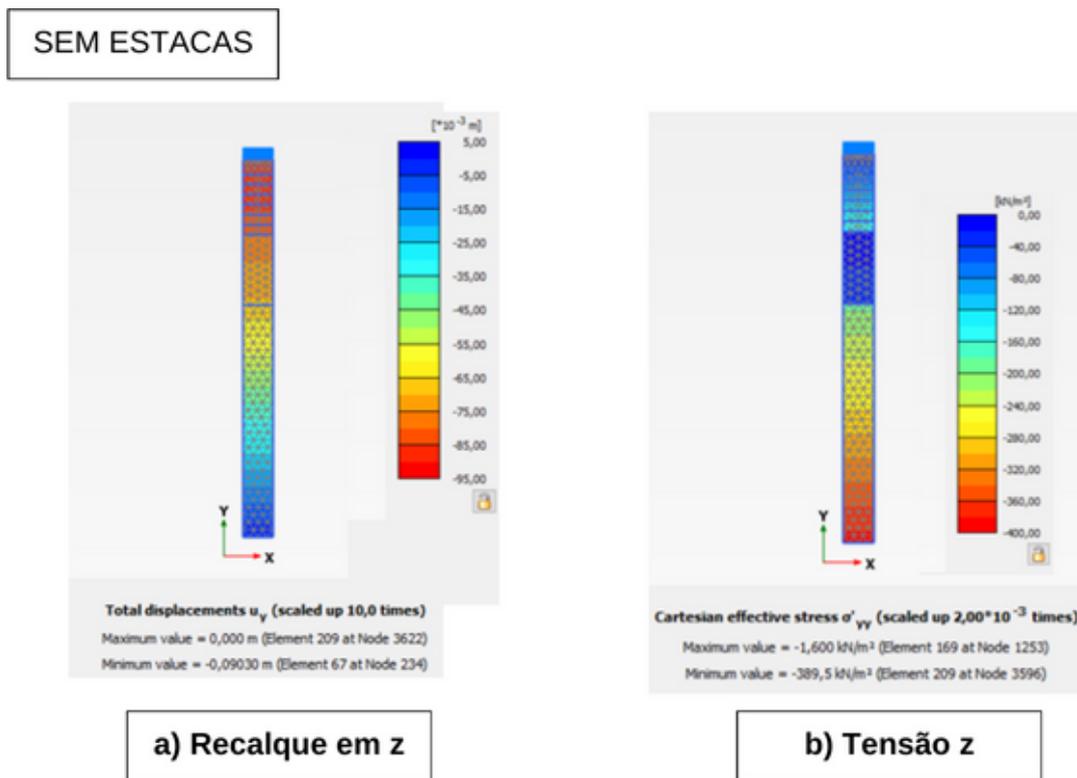
Para avaliar a resposta do solo em diferentes espaçamentos, estávamos

testando uma nova disposição das estacas, posicionando-as a cada 3 metros. Embora estivéssemos esperando recalques mais significativos nessa nova configuração, ao comparar os valores com o espaçamento de 2,25 metros, estávamos notando uma diferença mínima. Na Figura 29 e 30, os recalques estavam sendo de 45,84 mm, enquanto para um espaçamento de 4 metros, estávamos registrando 47,93 mm, uma diferença de apenas 2,09 mm entre os dois espaçamentos.

Observamos uma relação interessante: apesar da diferença de apenas 1 metro entre os espaçamentos, os recalques variaram apenas 2 mm. A visualização das tensões direcionadas para o capitel, evidenciada na Figura 27c, é satisfatória. Isso reforça a ideia de que, ao utilizar o aterro com estacas, o objetivo é concentrar a maior parte da carga no capitel, minimizando a carga transferida para o solo menos resistente.

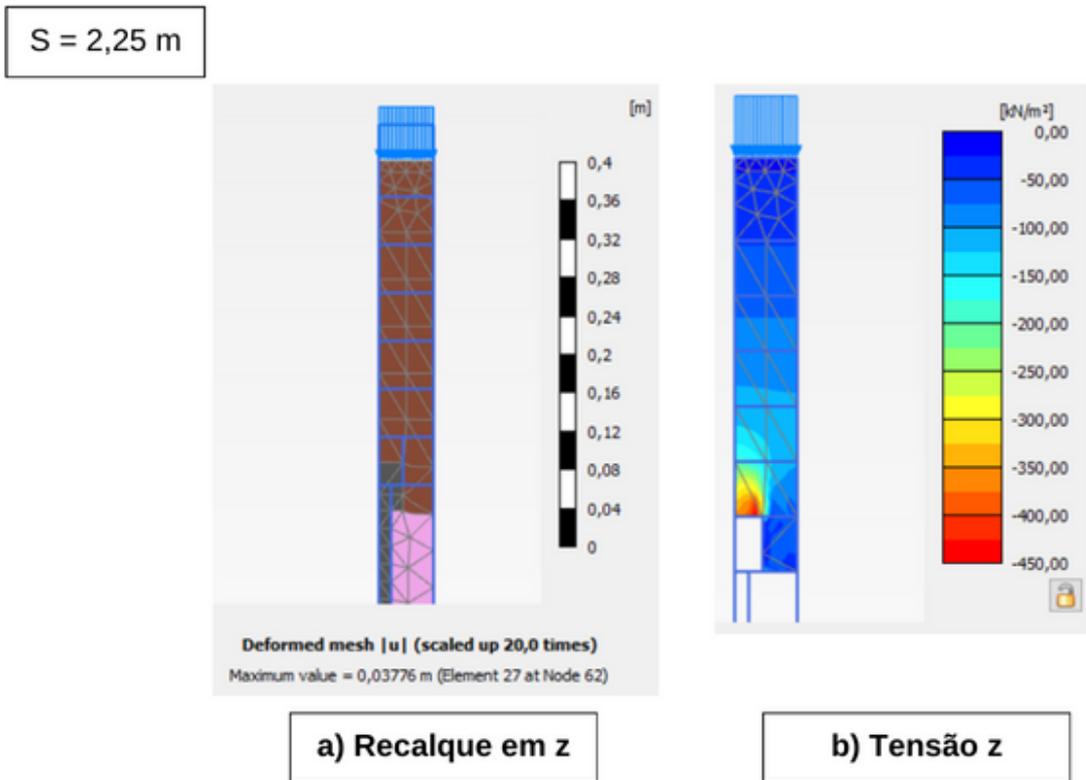
Além disso, ao modelar estacas espaçadas a cada 6 metros, conforme na Figura 31, resultou em um recalque de 73,01 mm. Esse valor se aproxima do esperado sem estacas na obra. Portanto, não há justificativa para continuar a modelagem, já que os valores indicam uma tendência de aumento nos recalques.

Figura 27 – Sem estacas: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



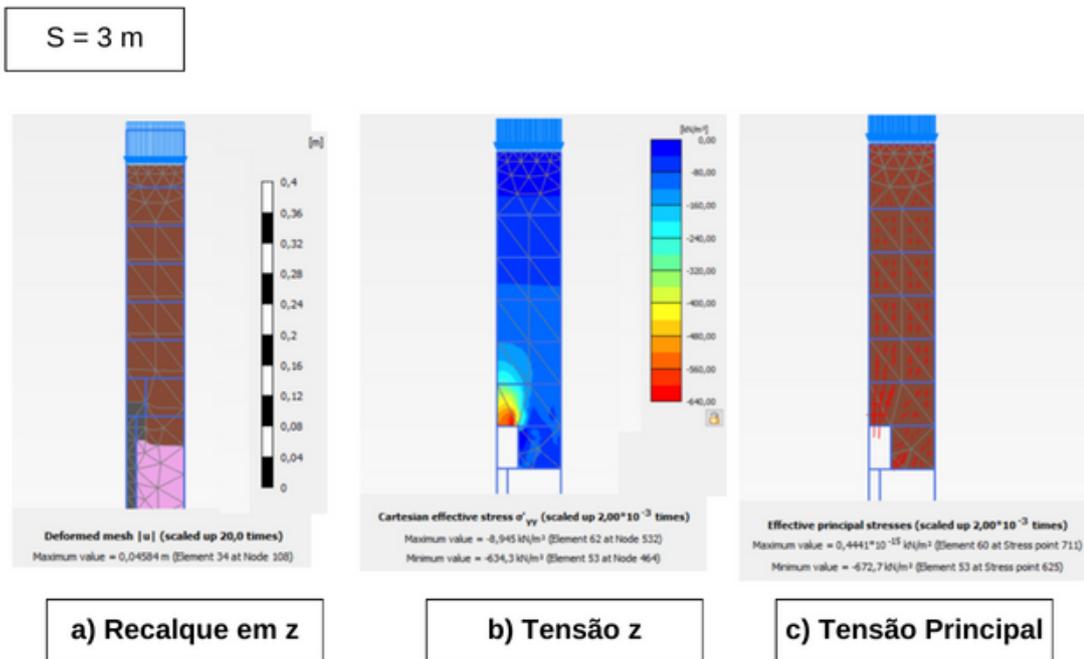
Fonte: O autor (2023)

Figura 28 – Espaçamento de 2,25 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas c) Tensão principal



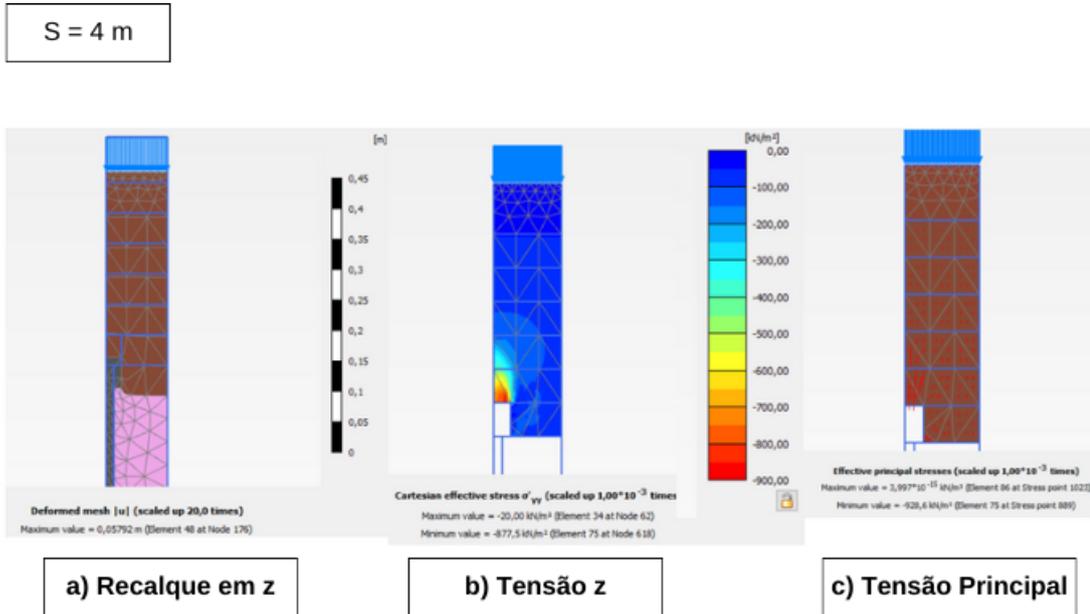
Fonte: O autor (2023)

Figura 29 – Espaçamento de 3 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas c) Tensão principal



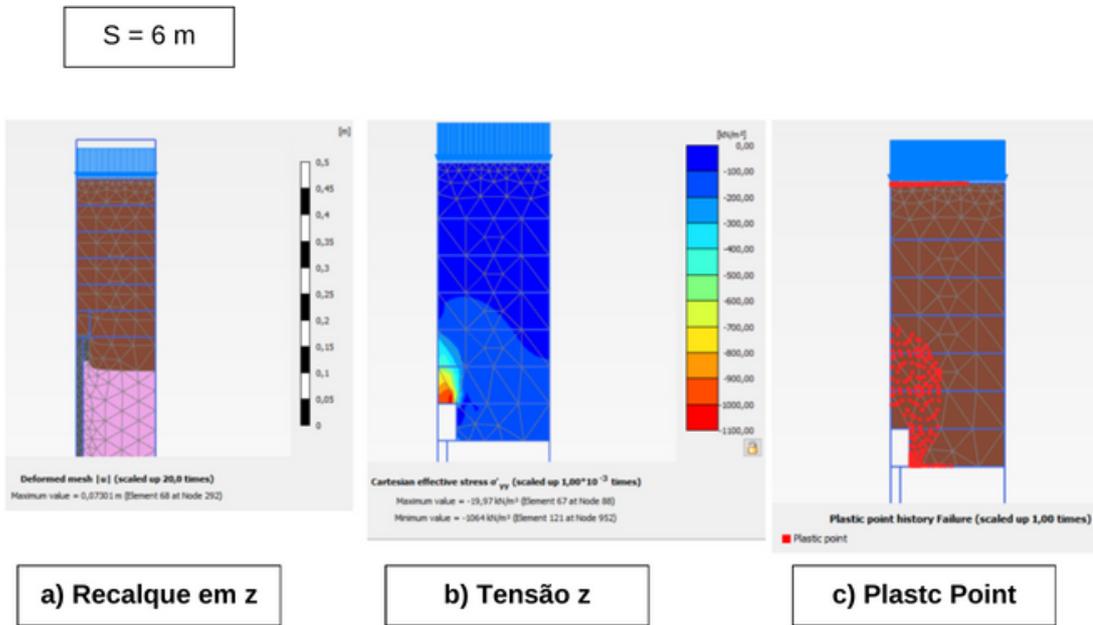
Fonte: O autor (2023)

Figura 30 – Espaçamento de 4m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



Fonte: O autor (2023)

Figura 31 – Espaçamento de 6m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



Fonte: O autor (2023)

Observamos uma relação interessante: apesar da diferença de apenas 1 metro entre os espaçamentos, os recalques variaram apenas 2 mm. A visualização das tensões direcionadas para o capitel, evidenciada na Figura 27c, é satisfatória. Isso reforça a ideia de que, ao utilizar o aterro com estacas, o objetivo é concentrar a maior

parte da carga no capitel, minimizando a carga transferida para o solo menos resistente.

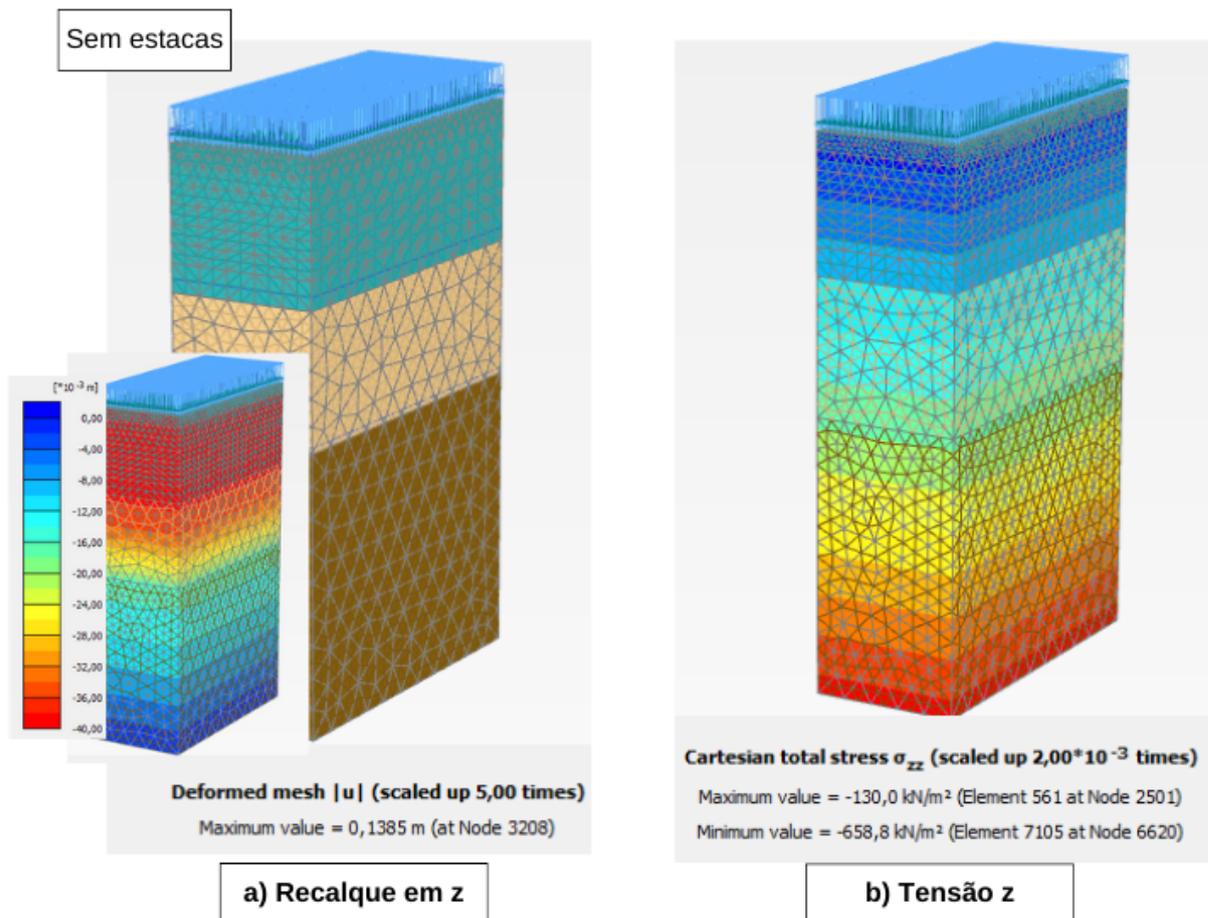
Além disso, ao modelar estacas espaçadas a cada 6 metros, conforme na Figura 31, resultou em um recalque de 73,01 mm. Esse valor se aproxima do esperado sem estacas na obra. Portanto, não há justificativa para continuar a modelagem, já que os valores indicam uma tendência de aumento nos recalques.

4.3 MODELAGEM 3D

Considerando inicialmente a construção sem estacas para justificar o emprego do método de aterro estaqueado, observamos um recalque de 138 mm nos resultados fornecidos pelo Plaxis, conforme mostrado na Figura 32. Este recalque foi atribuído à baixa capacidade de suporte do solo, especialmente na camada de argila.

Iniciamos a modelagem considerando espaçamentos de 2,25 metros, conforme estabelecido no projeto deste estudo de caso. Para essa simulação, buscamos o resultado de 57,58 mm, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 32 – Sem estacas: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas

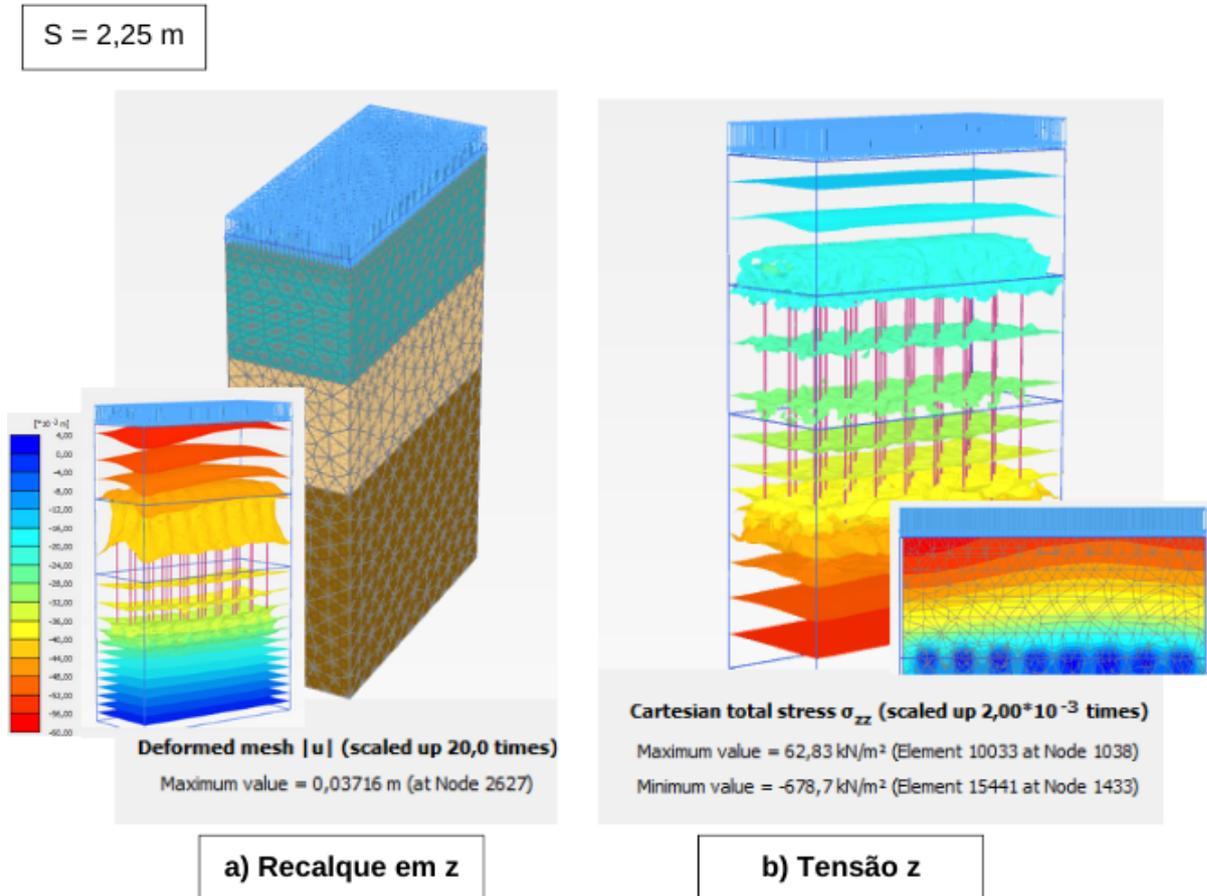


Fonte: O autor (2023)

A progressão gradual nos espaçamentos tem como objetivo evidenciar o

mecanismo de transferência de carga, embasado no referencial teórico do método do aterro estaqueado.

Figura 33 – Espaçamento de 2,25 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



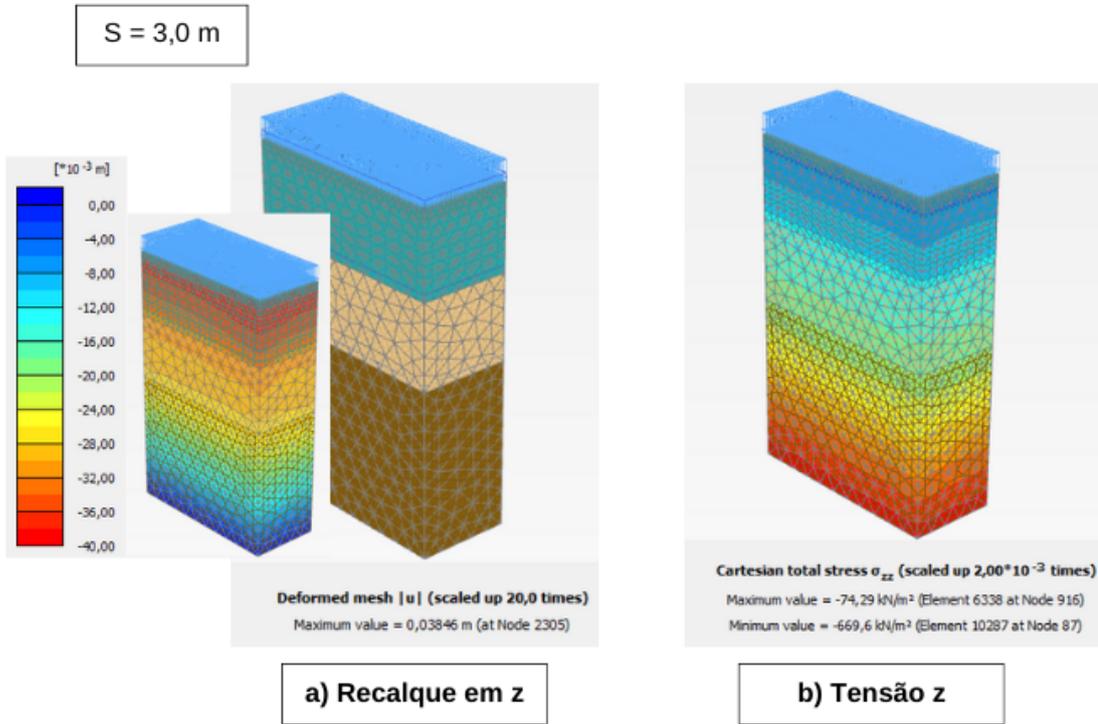
Fonte: O autor (2023)

Confirmamos essa premissa ao obter uma redução no recalque para 38,46 mm, conforme demonstrado na Figura 34. Outras ilustrações detalhadas desses resultados estão nos anexos desta análise.

Apesar de a simulação 3 ter revelado uma redução de mais de 50% nos recalques em relação ao solo sem o aterro, estávamos decidindo explorar espaçamentos maiores entre as estacas. Essa abordagem estava sendo adotada com o intuito de aprofundar nossa compreensão das condições de contorno presentes neste projeto. Adicionalmente, ao considerarmos a Figura 34, estávamos notando resultados interessantes, visto que ao aumentar o espaçamento em um metro, estaríamos observando uma redução na quantidade de estacas necessárias para o projeto.

No caso da simulação com espaçamento de 4 metros, o recalque estava sendo registrado como 39,67 mm, uma diferença de apenas 1,21 mm em relação ao caso anterior. Com base nessas constatações, estávamos concluindo que a diferença de recalque entre espaçamentos de 3 e 4 metros não estava sendo substancial, como estava sendo evidenciado na Figura 35.

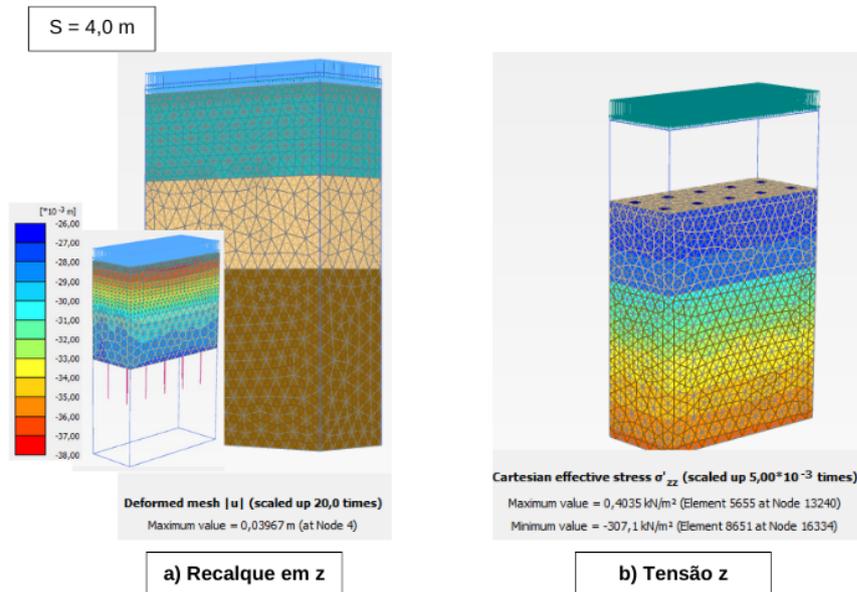
Figura 34 – Espaçamento de 3 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



Fonte: O autor (2023)

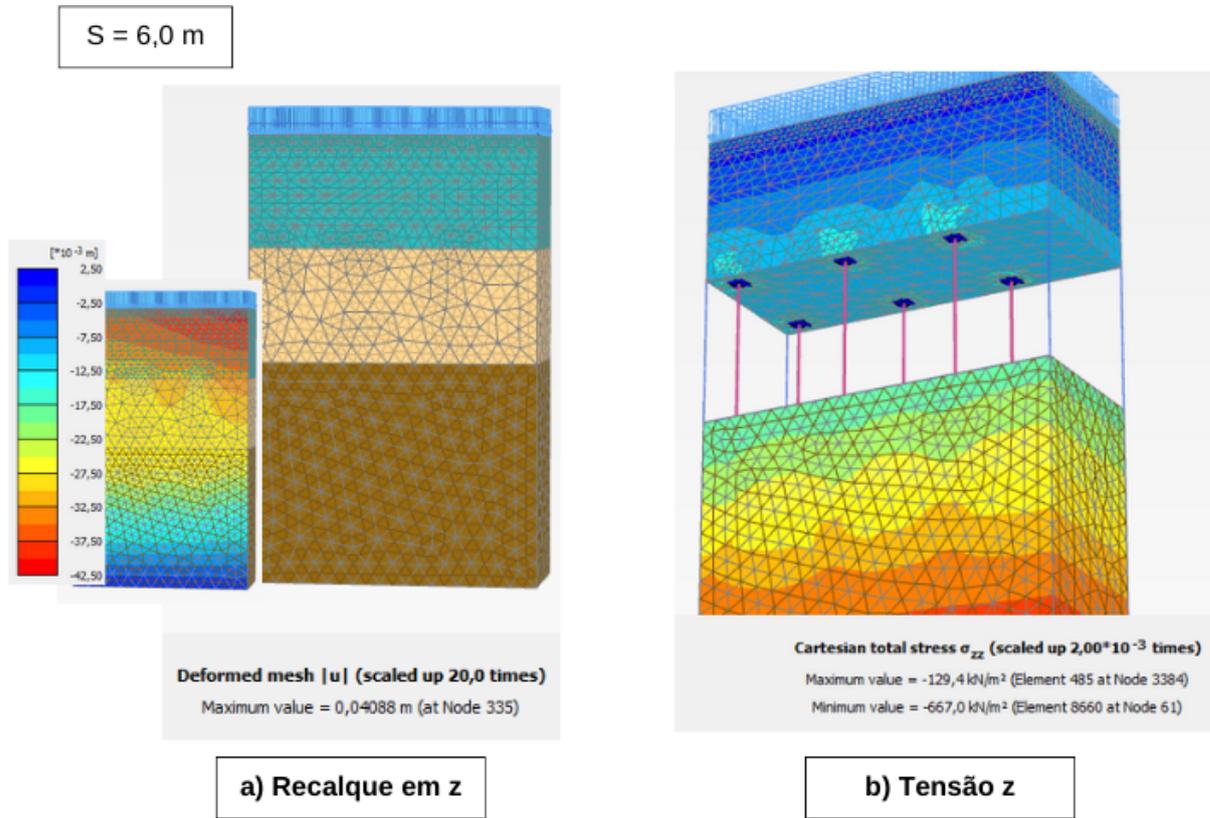
Ao realizarmos uma análise comparativa entre as simulações, estávamos observando um aumento de 2,42 mm no recalque em relação à simulação com espaçamento de 3 metros. Diante desse aumento significativo no recalque, não estávamos considerando necessário prosseguir com a análise de mais espaçamentos. Esta constatação estava sendo detalhada na Figura 36.

Figura 35 – Espaçamento de 4 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



Fonte: O autor (2023)

Figura 36 – Espaçamento de 6 m: a) Recalque sem estacas b) Tensão sem estacas



Fonte: O autor (2023)

5 CONCLUSÕES

Após semanas dedicadas à modelagem, percebemos a necessidade de realizar uma análise em 2D, pois essa abordagem se mostra menos complexa do que a modelagem em 3D. Ao validar os resultados dessa análise, procedemos conforme planejado, avançando para a modelagem em 3D.

No âmbito do estudo acadêmico, ao analisar os resultados, notamos uma semelhança significativa nos recalques entre os espaçamentos de 3 e 4 metros, havendo uma discreta diferença entre essas duas configurações.

Essa avaliação se torna crucial ao considerar que espaçamentos muito estreitos entre estacas podem não explorar totalmente os benefícios do aterro estaqueado, baseado no mecanismo de transferência de carga mencionado no referencial teórico e na formação de arcos para distribuição de forças.

Ao ponderarmos a eficiência do projeto em relação ao espaçamento e aos recalques obtidos, torna-se viável estabelecer critérios de avaliação. Por exemplo, ao definir um máximo de recalque admissível, como 50 mm, podemos comparar a eficiência de cada espaçamento. Nessa perspectiva, obteríamos eficiências de 76%, 92% e 96% para os espaçamentos de 2,25 m, 3 m e 4 m, respectivamente.

A análise do mecanismo de transferência de carga revelou, em várias pesquisas, que o domo de transferência assume uma forma prismática quando o capitel é quadrado e em formato arredondado.

A tese de GARCÍA (2021) demonstra que a inclinação é de $45^\circ + \Phi/2$, considerando um espaçamento de 2,25 metros, resultando em um ângulo de 65 graus. Esse ângulo sugere uma inclinação muito fechada, indicando que o potencial desse mecanismo pode não estar sendo totalmente maximizado. Portanto, como um exercício acadêmico, poderíamos considerar espaçamentos maiores para otimizar a transferência de carga, visando a um projeto mais eficiente nessa situação.

Embora um espaçamento de 6 metros não seja a melhor opção por se assemelhar aos recalques sem a estaca, poderíamos indicar espaçamentos entre 3 e 4 metros no projeto, os quais seriam suficientes para alcançar uma transferência eficaz da carga.

Em resumo, surgem considerações importantes para pesquisas futuras. A precisão dos parâmetros geotécnicos é fundamental para uma modelagem mais precisa. Durante este estudo, encontramos algumas lacunas nos ensaios, exigindo um arranjo técnico para obter dados de solos semelhantes aos da obra, recorrendo a bancos de dados universitários.

Além disso, considerar variações nos métodos constitutivos e realizar

comparações entre eles poderia agregar valor ao estudo.

Em particular, para um projeto de elevado, explorar variações na altura do aterro poderia fornecer insights valiosos sobre como os recalques se comportariam se a altura do aterro fosse reduzida.

Esses são alguns aspectos que podem ser explorados em futuras pesquisas para ampliar o conhecimento sobre o comportamento do solo e otimizar projetos de infraestrutura como elevados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. de souza; MARQUES, M. E. S. **Aterros Sobre Solos Moles. Projeto e Desempenho**. Livro — UFRJ, São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- BEZERRA, J. E. Estudo do comportamento de fundações em radier estaqueado: conceitos e aplicações. Brasília, 2003. Dissertação de mestrado em Geotecnia.
- BRASIL, A. **Fenabreve: Vendas de veículos crescem 48%** Acesso em: 22 jul. 2023.
- BS8006-1. British standards institution. In: _____. **Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills**. Chiswick High Road London: BSI - British Standards Institution, 2010. cap. 8, p. 160. ISBN 978 0 580 92713 3.
- ALBUQUERQUE CARDOSO, C. de. **Estudos numéricos de aterros estaqueados reforçados com geogrelha**. Dissertação Mestrado — UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- CHEN, R. P. A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression. *canadian geotechnical*. p. 611–623, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **NORMA DNIT 381/2022**: Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias – procedimento. Rio de Janeiro, JUNHO 2022.
- EEKELEN, S.; BEZUIJEN, A.; OUNG, O. Arching in piled embankments; experiments and design calculations. **BGA International Conference on Foundations, Innovations, Observations, Design and Practice**, p. 3, 01 2003.
- EEKELEN, S. J. van. **Basal Reinforced Piled Embankments**. Dissertação (Dissertação de Doutorado) — Technische Universiteit Delft, Delft Holanda do Sul, 2015.
- FARIAS, M. M. de. **Análise Numérica da Construção de Aterros Sobre Solos Moles Próximos a Estruturas Existentes – Influência da Presença de Reforço Geossintético**. Dissertação Mestrado — UnB, 2002.
- ECHEVERRÍA FERNÁNDEZ, S. P. **Efeitos de Arqueamento em Aterros sobre Solo Estaqueado**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006. Xiii, 136 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2006).
- GARCÍA, J. A. B. **ESTUDO DO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA NA CAMADA DE DISTRIBUIÇÃO EM FUNDAÇÕES REFORÇADAS COM INCLUSÕES RÍGIDAS**. TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA — Unb, 2021.
- GEOSENSORI. **Tipos de solo e suas aplicações na construção civil**. 2019. <https://www.geosensori.com.br/2019/05/09/tipos-de-solo-e-suas-aplicacoes-na-construcao-civil/>. Acessado em dezembro de 2023.

GRANDO. **Caracterização Física e Quantificação de Matéria Orgânica e Turfa do Depósito do Contorno Ferroviário de Joinville/SC.** (Pós-Doutorado em Infraestrutura e Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC,) — Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC., 2019.

IBGE. **Estimativa da População dos Municípios para 2021.** 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31461-ibge-divulga-estimativa-da-populacao-dos-municipios-para-2021>. Acesso em: 22 jul. 2023.

LUNA MACEDO Íris. **Análise Numérica da Construção de Aterros Sobre Solos Moles Próximos a Estruturas Existentes – Influência da Presença de Reforço Geossintético.** 8 p. Dissertação Mestrado — UnB, Brasília, 2002.

MACHADO, B. A. **Análise de Desempenho de Aterro Experimental na Vila Pan-Americana.** 9 p. Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da universidade federal do rio de janeiro. — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MELLO, L. G. F. S.; BILFINGER, W. Aterros sobre estacas. In: _____. **Manual Brasileiro de Geossintéticos / José Carlos Vertematti (coord.). – 2. ed.** [S.l.]: São Paulo: Blucher, 2015, 2014. cap. 4.7, p. 155. ISBN 978-85-212-0926-3.

SALES, I. A. S. L. de. **Estudos Numéricos e Analíticos de Aterros Estaqueados Reforçados.** 15 p. Dissertação Mestrado — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

SANTOS, F. S. D. **ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: DIMENSIONAMENTO DOS ENCONTROS DA PONTE SOBRE O RIO TRÊS RIACHOS, BR-101 (SC).** TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, FLORIANÓPOLIS, 2015.

Senado Federal. **Humberto destaca investimentos do governo em obras de infraestrutura.** 2023. <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/04/13/humberto-destaca-investimentos-do-governo-em-obras-de-infraestrutura>. Acesso em: 22 jul. 2023.

TENCARTE. **Reinforced Soil Case Studies.** 2010. [Http://www.tencategeosynthetics.com](http://www.tencategeosynthetics.com). Acessado em agosto de 2023.