

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA COMPREENSÃO DO
COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS
REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS**

JULIANA ARAUJO DA CUNHA

Orientador: Prof. Juan Félix Rodrigues Rebolledo, Ph.D.

Coorientador: Prof. Ennio Marques Palmeira, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-418/2025

BRASÍLIA/DF: MAR/2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA COMPREENSÃO DO
COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS
REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS**

JULIANA ARAUJO DA CUNHA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

JUAN FÉLIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)

ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
(COORDINADOR)

GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAUJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

NIMA ROSTAMI ALKHORSHID, D.Sc. (UNIFEI)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 21 DE MARÇO DE 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

CUNHA, JULIANA ARAUJO DA

Modelagem numérica para compreensão do comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. [Distrito Federal] 2025.

xvi, 97 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2025)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. Simulação Numérica | 2. Geossintético |
| 3. Aterro Estaqueado | 4. Modelo Analítico |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CUNHA, J. A. (2025). Modelagem numérica para compreensão do comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-418/2025, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Juliana Araujo da Cunha

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Modelagem numérica para compreensão do comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos

GRAU/ANO: Mestre/2025

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Juliana Araujo da Cunha
e-mail: araujodacunhajuliana@gmail.com
Brasília/DF - Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pela força e sabedoria em cada passo da minha vida; à minha família, pelo apoio incondicional e amor que me sustentam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade de realizar o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, uma instituição de excelência que muito me orgulha.

Aos meus orientadores, expresso meu profundo agradecimento pelo privilégio de aprender sob sua orientação. Suas orientações, ensinamentos e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento profissional.

Aos meus familiares e amigos, agradeço por todo o apoio, compreensão e incentivo durante este período. Em cada momento de desafio, vocês foram minha força e motivação para continuar.

Agradeço, também, ao CNPq pelo apoio científico e acadêmico concedido durante o período de mestrado. Este suporte foi essencial para a concretização desta etapa tão importante da minha vida.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui minha mais sincera gratidão.

MODELAGEM NUMÉRICA PARA COMPREENSÃO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS ESTAQUEADOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

RESUMO

Empreendimento como ferrovias e rodovias, que exigem rigoroso controle de recalques, representam desafios significativos para fundações de aterros sobre solos moles. Uma abordagem eficaz para esses casos é a utilização de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. Modelos físicos e numéricos permitem avaliar detalhadamente a resposta do solo e a transferência de cargas. Este estudo apresenta uma modelagem numérica bidimensional, baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o modelo constitutivo Hardening Soil, calibrado e validado com dados experimentais e numéricos. Após a validação do modelo, foram realizadas análises para observar tensões internas, cargas aplicadas nas cabeças das estacas e deslocamentos verticais, com o objetivo de compreender os efeitos do arqueamento e de membrana. Paralelamente, foi desenvolvido um programa de dimensionamento para métodos analíticos aplicados a aterros estaqueados reforçados. As análises numéricas foram então comparadas com os resultados dos métodos analíticos e do modelo físico. Os resultados mostram que, as normativas existentes podem ser consideradas métodos seguros e mais econômicos, quando atreladas às simulações numéricas. Após comparar os resultados da análise numérica com os obtidos em simulações física e analítica, observou-se que o efeito do arqueamento é mais eficiente quando o aterro é mais compressível e menos resistente. As simulações numéricas mostraram alinhamento satisfatório com os dados experimentais, comprovando sua eficácia. O método analítico que melhor se alinhou aos resultados do modelo numérico desenvolvido foi o método de arcos concêntricos (Van Eekelen, 2015) para o efeito de arqueamento. Garantido precisão e segurança no dimensionamento de aterros baixos. Portanto os resultados ressaltam o papel do modelo numérico como uma ferramenta essencial para análises de estruturas reforçadas.

Palavras-chave: Modelo numérico, modelo analítico, solos moles, geossintético, ferrovias, rodovias.

NUMERICAL MODELING FOR UNDERSTANDING THE BEHAVIOR OF PILED EMBANKMENTS REINFORCED WITH GEOSYNTHETICS

ABSTRAT

Infrastructure projects such as railways and highways, which require rigorous settlement control, pose significant challenges for embankment foundations over soft soils. An effective approach in such cases is the use of piled embankments reinforced with geosynthetics. Physical and numerical models enable a detailed assessment of soil response and load transfer mechanisms. This study presents a two-dimensional numerical modeling approach based on the Finite Element Method (FEM), utilizing the Hardening Soil constitutive model, which was calibrated and validated against both experimental and numerical data. Following model validation, analyses were conducted to evaluate internal stresses, loads applied to the pile heads, and vertical displacements, with the objective of understanding arching and membrane effects. Simultaneously, a design program was developed for analytical methods applied to reinforced piled embankments. The numerical analyses were then compared with results from analytical methods and physical modeling. The findings indicate that existing design standards can be considered safe and more cost-effective when combined with numerical simulations. Comparing the results of the numerical analysis with those obtained from physical and analytical simulations, it was observed that the arching effect is more efficient when the embankment is more compressible and less resistant. The numerical simulations showed satisfactory alignment with experimental data, confirming their reliability. The analytical method that most closely aligned with the results of the numerical model developed was the concentric arches method (Van Eekelen, 2015), particularly for simulating the arching effect. This approach ensures both accuracy and safety in the design of low embankments. Therefore, the findings highlight the role of the numerical model as an essential tool for the analysis of reinforced soil structures.

Keywords: Numerical model, analytical model, soft soils, geosynthetics, railways, highways.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivo Específico	3
2.3	Estrutura da Dissertação	3
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
3.1	Características Gerais - Conceitos Básicos.....	5
3.1.1	Aterros Estaqueados	5
3.1.2	Geossintéticos.....	6
3.2	Métodos de Análise de Aterro Reforçado	11
3.2.2	Teoria de Arqueamento de Terzaghi (1943).....	15
3.2.3	Método Normativo Britânico (BS8006, 2010).....	16
3.2.4	Método de Recomendação Alemão (EBGEO, 2011).....	20
3.2.5	Método Normativo Holandês (CUR 226,2016)	25
3.2	Modelagem física e numérica.....	32
4.	METODOLOGIA.....	43
4.1	Modelo Físico	44
4.1.1	Características Gerais	44
4.1.2	Programa Experimental	46
4.1.3	Propriedades dos Materiais.....	48
4.1.3.1	Geossintéticos.....	48
4.1.3.2	Aterro.....	48
4.1.4	Etapas do Ensaio.....	48
4.2	Modelo Numérico.....	49
4.2.1	Simulação do Geossintético.....	49

4.2.1.1	Modelo Constitutivo	49
4.2.1.2	Elementos de Interface	50
4.2.1.3	Parâmetros Utilizados.....	50
4.2.2	Simulação do Material do Aterro	52
4.2.2.1	Modelo Constitutivo	52
4.2.2.2	Obtenção de Parâmetros	53
4.2.3	Definição da Malha	59
4.2.3.1	Condições de Contorno	60
4.2.3.2	Etapas de Análise.....	62
4.2.3.3	Análise de Sensibilidade da Malha.....	62
4.2.4	Análise Paramétrica Normativa.....	66
4.2.4.1	Cálculos Analíticos em Wolfram Mathematica.....	66
4.2.4.2	Casos de Análise.....	66
5.	RESULTADOS	67
5.1	Simulação Numérica do Modelo Físico	67
5.1.1	Tensões no Interior do Aterro.....	67
5.1.2	Carga na Cabeça da Estaca.....	69
5.1.3	Deslocamentos Verticais	70
5.1.4	Análise do Efeito de Arqueamento.....	71
5.2	Análise Paramétrica Normativa.....	76
5.2.1	Peso Específico Aparente do Aterro.....	76
5.2.2	Ângulo de Atrito do Aterro	78
5.2.3	Espaçamento e Diâmetro da Estaca.....	79
5.3	Modelo Físico <i>versus</i> Numérico <i>versus</i> Normativo	82
5.3.1	Carga na Cabeça da Estaca.....	82
5.3.2	Tração no Reforço	84

5.3.3	Eficiência	87
6.	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Coeficiente de Arqueamento (C_c) para aterros estacados reforçados (BS8006, 2010).....	17
Tabela 3.2 – Estudos de modelos físicos e numéricos sobre aterros estacados reforçados e não reforçados.....	36
Tabela 4.1 – Fatores de Escala (Melchior Filho, 2022).....	46
Tabela 4.2 – Parâmetros para o Modelo Hardening Soil (Manual Plaxis, 2022).....	52
Tabela 4.3 - Parâmetros do Modelo Constitutivo do Aterro	59
Tabela 5.1 – Valores da Tensão no Capitel vs Variação Geométrica - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Aterro Estaqueado Reforçado	6
Figura 3.2 – Classificação dos Geossintéticos – IGS Brasil (Palmeira, 2020).....	8
Figura 3.3 – Principais Funções do Geossintético -IGS Brasil (Palmeira, 2020)	9
Figura 3.4 – Distribuição de Tensões no Aterro.....	12
Figura 3.5 - Divisão de Cargas no Aterro Estaqueado Reforçado com Geossintético (Van Eekelen et al, 2011)	14
Figura 3.6 – Pesquisa Experimental de Martson&Anderson (1913).....	17
Figura 3.7 – Eficiência pelo Método Hewlett & Randolph (1988) – Ref. (Van Eekelen, 2015).....	18
Figura 3.8 - Teoria do arqueamento de múltiplos arcos Zaeske (2001) – Ref. (Van Eekelen, 2015).....	21
Figura 3.9 – Representação Esquemática do Aterro Sobre Estacas Reforçado (DNIT, 2022).....	22
Figura 3.10 – Arranjo em planta do espaçamento entre estacas (DNIT, 2022)	22
Figura 3.11 – Tensão vertical sobre o solo mole entre estacas para um aterro não coesivo com ângulo de atrito igual a 30° (EBGEO,2011).....	24
Figura 3.12 – Deformação de tração máxima do reforço (EBGEO,2011).....	25
Figura 3.13 - Distribuição de carga no geossintético – Van Eekelen (2015)	26
Figura 3.14 – Teoria dos Arcos Concêntricos - Van Eekelen (2015).....	27
Figura 3.15 – Formação dos Arcos Concêntricos no Aterro estaqueado reforçado - Van Eekelen (2015).....	28
Figura 3.16 – Etapas de cálculo da combinação do hemisférico 3D com o arco 2D – ..	31
Figura 4.1 - Equipamento montado com seus elementos e instrumentos posicionados adequadamente: (a) Corte transversal; (b) Geometria em planta. - Dimensões em metros – (Melchior Filho, 2022).	45
Figura 4.2 – Equipamento do ensaio de tração de faixa larga (Melchior Filho, 2022) ..	47
Figura 4.3 – Equipamento do Ensaio de Cisalhamento (Melchior Filho, 2022)	47
Figura 4.4 – Elemento tipo Geogrid (Manual Plaxis, 2022)	50
Figura 4.5 - Distribuição de nós e pontos de tensão em elementos de interface e sua conexão com elementos do solo. (Manual Plaxis, 2022)	51
Figura 4.6 - Interação solo-estrutura sem e com interface (Manual Plaxis, 2022).....	51

Figura 4.7 - Equipamento de cisalhamento direto: (a) preparação do ensaio; (b) após o cisalhamento do material de aterro. (Melchior Filho, 2022)	54
Figura 4.8 – Representação Esquemática do Ensaio de Cisalhamento Direto	54
Figura 4.9 - Ensaio de Cisalhamento: (a) no laboratório, (b) simulação numérica.....	56
Figura 4.10 - Ensaio de Cisalhamento em laboratório e modelagem numérica :(a) Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal e (b) Variação Volumétrica	57
Figura 4.11 - Condições de Contorno Modelo 2D	61
Figura 4.12 – Representação do Modelo Físico e Numérico – Vista Lateral.....	61
Figura 4.13 – Detalhamento da Instrumentação	62
Figura 4.14 – Estudo do Caso A.....	64
Figura 4.15 – Estudo do Caso B	64
Figura 4.16 – Análise de Sensibilidade da Malha - Caso A	65
Figura 4.17 – Análise de Sensibilidade da Malha - Caso B	65
Figura 5.1- Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT1	68
Figura 5.2 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT2.....	68
Figura 5.3 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT3.....	69
Figura 5.4 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT5.....	69
Figura 5.5 - Resultado da Simulação Numérica da Carga na Cabeça da Estaca	70
Figura 5.6 – Resultado da Simulação Numérica do LVDT2.....	71
Figura 5.7 – Resultado da Simulação Numérica do LVDT4.....	71
Figura 5.8 – Distribuição de tensão na cabeça da estaca para diferentes valores do módulo de reação do subleito(ks).	73
Figura 5.9 – Simulação do Modelo Numérico Axissimétrico 2D das distribuições de tensões	74
Figura 5.10 – Deslocamentos no corpo do Aterro.....	75
Figura 5.11 – Deslocamento no Geossintético	75
Figura 5.12 - Força Axial atuando no Geossintético	76
Figura 5.13 – Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico BS 8006 (2010)	77
Figura 5.14 - Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico EBGE0 (2011)	77
Figura 5.15 - Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico CUR 226(2016) - CA.....	78

Figura 5.16 – Influência da Variável Ângulo de Atrito no método analítico EBGeo (2011)	79
Figura 5.17 - Influência da Variável Ângulo de Atrito no método analítico CUR 226(2016) - CA.....	79
Figura 5.18 – Visão 3D dos Métodos de Dimensionamento	80
Figura 5.19 - Tensão no Capitel vs Largura do Capitel - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico	81
Figura 5.20 – Tensão no Capitel vs Espaçamento entre Estacas - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico.....	82
Figura 5.21 –Efeito do Arqueamento: Carga na Cabeça da Estaca versus a razão da altura com a distância entre as estacas (H/d)	83
Figura 5.22 – Efeito Membrana: Tração no Geossintético versus a razão da altura com a distância entre as estacas (H/d).....	86
Figura 5.23 – Eficiência do Modelo	88
Figura 5.24– Eficiência do Modelo para diferentes espaçamentos entre estacas	89

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

a	Largura do Cabeça da Estaca (Capitel)
a_{tubo}	diâmetro do tubo
ASIRI	“Amélioration des Sols par Inclusions Rigides”- Projeto Nacional Francês
BS	“British Standard 8006” – Norma Britânica (BS 8006, 2010)
BS Mod	Norma Britânica modificada por Van Eeklen (BS 8006, 2011)
c	Coesão
C_c	Coeficiente de Arqueamento
CA	“Concentric Arches Model” – Modelo de Arcos Concêntricos
CUR 226	“Design Guideline for Basal Reinforced Piled Embankment Systems” – Método Holandês
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
d	Distância entre estacas
d_{eq}	Diâmetro das estacas ou diâmetro equivalente do capitel
d_{eq}	Diâmetro equivalente do capitel quadrado
E	Eficiência do arqueamento
E_{50}	Módulo de rigidez de carregamento primário
E_{50}^{ref}	Módulo de rigidez de carregamento primário de referência
E_{oed}	Módulo de rigidez oedométrico
E_{oed}^{ref}	Módulo de rigidez oedométrico de referência
E_{ur}	Módulo de rigidez de descarga/recarga
E_{ur}^{ref}	Módulo de rigidez de descarga/recarga de referência
E_{crown}	eficiência do arqueamento na coroa do arco
EBGEO	“German Recommendations for Geosynthetic Reinforced Earth Structures” – Método Alemão
H	Altura do Aterro
h_c	Altura Crítica do Aterro
h_g	Altura do arco.
IGS	Associação Brasileira de Geossintéticos
k_s	Módulo de reação de subleito
K_0	Coeficiente de empuxo em repouso
K_0^{nc}	Coeficiente de empuxo em repouso no estado normalmente adensado
m	Potência que controla a dependência do nível de tensão da rigidez no modelo Hardening Soil
MEF	Método dos Elementos Finitos
p_{ref}	Tensão de referência
p'_c	Parcela de tensão vertical transferida diretamente ao capitel
p'_c	Parcela de tensão vertical transferida diretamente ao tubo
p'_r	Parcela de tensão vertical transferida ao reforço geossintético
σ'_v	Tensão vertical efetiva
s	Distância de centro a centro das estacas
s_x	Espaçamento entre os eixos longitudinais de estacas adjacentes na direção longitudinal

s_y	Espaçamento entre os eixos longitudinais de estacas adjacentes na direção transversal
UnB	Universidade de Brasília
γ	Peso específico do material de aterro
J_k	Rigidez do reforço
ε_k	Deformação do reforço
T	Tração do reforço
W_T	Carga distribuída sobre o reforço
ν'	Coeficiente de Poisson
ν_{ur}	Coeficiente de Poisson para descarregamento e recarregamento
ϕ	Ângulo de atrito
ψ	Ângulo de dilatação
R_f	Razão de ruptura q_f/q_a
q_f	Tensão desviadora de ruptura
q_a	Tensão desviadora assintótica

1. INTRODUÇÃO

A construção de aterros rodoviários e ferroviários possui especificações rigorosas, especialmente no quesito de baixos recalques. Dessa forma, suas fundações precisam ser bem projetadas para que, com o impacto do tráfego, haja uma boa redistribuição de tensões para a fundação, garantindo a integridade da estrutura e evitando colapsos ou rupturas.

Um dos grandes desafios nessa área é a construção desse tipo de estrutura sobre solos moles ou solos de baixa resistência. No Brasil, solos moles estão presentes em grande parte do litoral brasileiro, especialmente nas regiões da Baixada Fluminense, Baixada Santista e em cidades como Recife, Porto Alegre e Florianópolis (Almeida e Marques, 2013). Há também presença de solos colapsíveis encontrados em regiões como o Centro-Oeste, Sudeste, Norte e Sul (Ferreira, 2007).

Diversas técnicas de melhoramento para solos moles são descritas por Almeida e Marques (2011), incluindo remoção do solo mole, sobrecarga no aterro, construção em estágios, drenos verticais, aterros estacados com geossintéticos, colunas granulares, aterros com materiais leves, bermas de equilíbrio e aterros reforçados. Dentre essas opções, destacam-se os aterros estacados com geossintéticos por serem favoráveis a cronogramas curtos e apresentarem diferentes arranjos e materiais, além de terem um custo relativamente baixo comparado a outras alternativas.

Um exemplo notável da aplicação de aterros estacados ocorreu na ferrovia Ferronorte, em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul. Em 1998, devido ao longo tempo necessário para a consolidação do solo e ao risco de recalques excessivos que poderiam comprometer o funcionamento adequado da ferrovia, optou-se por reformular o projeto original, adotando-se a solução de um aterro reforçado sobre estacas. A obra foi concluída no trecho do Rio Laje em maio de 1999, possibilitando a liberação imediata do trecho para o tráfego ferroviário. Já em São José dos Campos, São Paulo, a interligação entre as rodovias Presidente Dutra e Carvalho Pinto, atravessava uma área de solo saturado e orgânico, com baixa resistência. Para garantir a estabilidade da estrutura, foi adotado um aterro reforçado com geogrelhas na primeira etapa do projeto, finalizada em dezembro de 2000. Outro exemplo significativo ocorreu na rodovia BR-364, em Jataí, Goiás, onde a presença de solos de baixa capacidade de suporte exigiu soluções robustas para a reforma e adequação do trecho, com a execução finalizada em 2013 (Huesker, 2024). Esses casos

exemplificam a eficácia dos aterros estaqueados em obras de infraestrutura realizadas sobre solos de baixa resistência, assegurando estabilidade e durabilidade em contextos geotécnicos desafiadores.

Essa técnica também apresenta desafios no entendimento do mecanismo de transferência de carga, adicionando assim uma certa complexidade no seu dimensionamento. Por isso, normativas vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos, visando representar de maneira mais efetiva o mecanismo que ocorre dentro da estrutura. Assim, o uso de ferramentas numéricas tem se tornado cada vez mais relevante na contribuição para o dimensionamento estrutural.

A simulação numérica permite analisar os aspectos da interação entre solo, aterro e reforço. Essas ferramentas auxiliam de maneira específica na quantificação de aspectos dos geossintéticos, como resistência à tração, rigidez e fluência. São também essenciais para prever possíveis movimentações, recalques, deformações e tensões a que o aterro e a fundação estarão submetidos.

Esta pesquisa busca contribuir para o entendimento do mecanismo de transferência de carga por meio da modelagem numérica, com o objetivo de calibrar e validar modelos em concordância com dados experimentais. Assim, objetiva-se contribuir para a otimização de projetos e para a implementação mais eficaz de aterros estaqueados em solos moles, pavimentando o caminho para o desenvolvimento de uma normativa brasileira.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é contribuir para o entendimento do mecanismo de transferência de carga entre a cabeça do capitel reforçado com geossintético e a camada de distribuição, utilizando a modelagem numérica e um modelo constitutivo que represente adequadamente o comportamento do material de aterro.

2.2 Objetivo Específico

Para que se cumpra o objetivo geral, se estabelecem como objetivos específicos:

- Representar com precisão o comportamento mecânico do material de aterro, por meio da calibração e aplicação de um modelo constitutivo avançado, a partir da simulação numérica.
- Desenvolver um modelo numérico bidimensional capaz de simular o comportamento de sistemas de aterro estaqueado com reforço de geossintético, para compreender as interações entre a cabeça do capitel, a camada de distribuição de carga e o material de aterro.
- Implementar um programa computacional de dimensionamento com base em métodos analíticos consolidados, para aplicação no projeto de sistemas de fundações de aterros estaqueados com reforço geossintético.
- Realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos por meio da modelagem numérica, os métodos analíticos existentes e os dados experimentais disponíveis na literatura, para avaliar a acurácia e a aplicabilidade do modelo proposto.
- Avaliar a eficácia da transferência de carga entre a cabeça do capitel e a camada de distribuição por meio dos resultados gerados na modelagem numérica, para investigar os mecanismos envolvidos nesse processo e validar a consistência do modelo desenvolvido.

2.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Apresenta uma breve introdução a respeito do tema abordado.
- Capítulo 2: Trata do objetivo geral e dos objetivos específicos da presente pesquisa.

- Capítulo 3: Apresenta a revisão de literatura apontando aspectos importantes para o entendimento das características gerais dos aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. Neste capítulo, são explicados o tipo de estrutura e os elementos que compõem esses aterros. Em seguida, o capítulo revisa os métodos analíticos de dimensionamento, bem como os modelos físicos e numéricos que auxiliam nesse processo de dimensionamento.
- Capítulo 4: Enuncia o procedimento metodológico utilizado na presente pesquisa, onde são apresentados o modelo físico e o modelo numérico utilizados na pesquisa.
- Capítulo 5: Apresenta os resultados obtidos nos ensaios da modelagem numérica desenvolvida, seguidos das análises de dados realizadas em comparação aos métodos normativos de dimensionamento e os resultados experimentais.
- Capítulo 6: Finaliza o presente trabalho apresentando as considerações finais a respeito do que foi desenvolvido na pesquisa, bem como contribui com sugestões para possíveis trabalhos futuros.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo contém uma revisão bibliográfica que dará suporte para o desenvolvimento dos objetivos deste estudo. Sendo abordado os conceitos de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos, modelagem física em grande escala e modelagem numérica.

3.1 Características Gerais – Conceitos Básicos

3.1.1 Aterros Estaqueados

A técnica de aterros estaqueados é uma solução eficiente para regiões com presença de solos moles, que apresentam baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade. Também é utilizada em áreas com solos colapsáveis, onde o aumento de tensão e umidade na camada do solo pode causar recalques bruscos. Esta técnica combina soluções de terraplanagem convencional com fundação profunda, transmitindo os carregamentos do aterro para uma camada de solo competente. Seus principais objetivos são aumentar a capacidade de suporte do solo de fundação e minimizar ou eliminar os recalques excessivos que ocorreriam caso o aterro estivesse apoiado diretamente sobre o solo mole, garantindo assim maior estabilidade e segurança.

De acordo com a Figura 3.1, os elementos principais que compõem um aterro estaqueado reforçado são:

- Estacas e capitel: são elementos que podem ser feitos de concreto pré-moldado, concreto armado, aço ou até mesmo madeira tratada. Elas têm a função de transferir a carga do aterro para camadas mais profundas e competentes do solo, onde a capacidade de suporte é maior.
- Reforço: os elementos geossintéticos, como geotêxteis e geogrelhas, contribuem na distribuição da carga de forma uniforme e na redução dos recalques diferenciais. Além disso, eles melhoram a estabilidade global do aterro.
- Aterro: normalmente composto por solo compactado, que pode ser melhorado com a adição de materiais leves ou estabilizadores.

Esta combinação de elementos garante a eficiência da técnica, proporcionando uma solução robusta e segura para a construção de aterros em condições de solo desafiadoras.

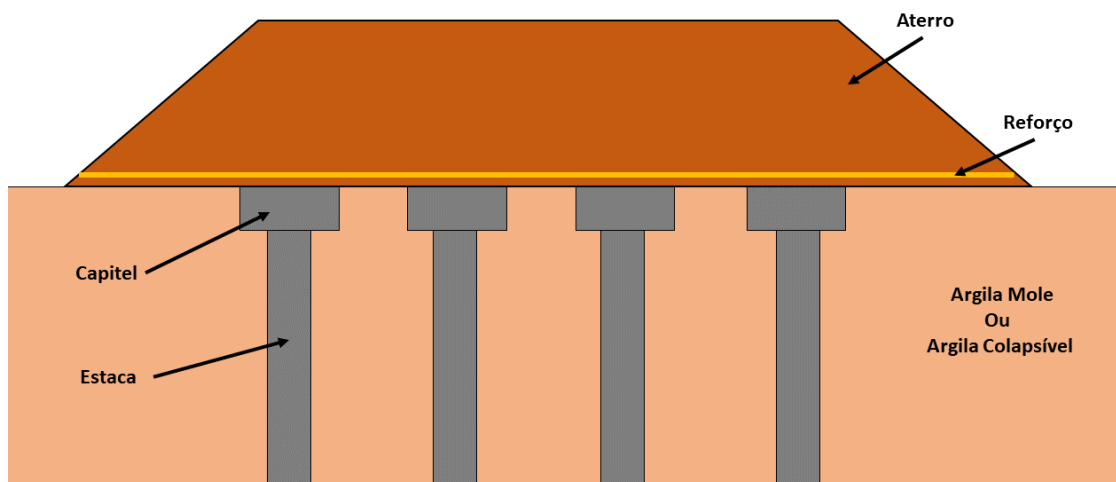


Figura 3.1 – Aterro Estaqueado Reforçado

Conforme Almeida e Marques (2013), esta técnica permite uma execução acelerada do aterro sem aguardar a consolidação do solo. Em contraste, métodos convencionais demandam mais tempo para o adensamento da camada de solo mole. Deste modo, além de reduzir o tempo construtivo, esta abordagem também minimiza recalques e movimentações no solo. Aumenta a capacidade de carga, permitindo a construção em solos que, de outra forma, não suportariam a carga. A combinação de estacas e geossintéticos proporciona uma solução durável e estável, que mantém sua integridade estrutural ao longo do tempo. Comparado com outras técnicas de melhoramento de solos, os aterros estaqueados com geossintéticos podem ser uma solução mais econômica, especialmente para grandes projetos.

Os solos reforçados com geossintéticos podem atuar tanto como reforço quanto como meio drenante para acelerar os recalques. Neste estudo, a aplicação do geossintético é focada no reforço, trazendo diversos benefícios: permite a construção de aterros mais altos com maior rapidez, ou até com taludes mais íngremes do que seria viável sem reforço. Além disso, otimiza a distribuição das tensões no solo de baixa resistência e potencializa significativamente a segurança da obra (Palmeira, 2018).

3.1.2 Geossintéticos

Geossintético é um produto de polimérico sintético ou natural, aplicado nas obras de engenharia geotécnica e de proteção ambiental, sendo um produto que auxilia nas soluções de diversos problemas geotécnicos por apresentar variadas funções dependendo

da maneira que o produto é fabricado. A exemplo: obras de terra (taludes, aterros, rodovias, ferrovias, aeroportos); obras hidráulicas (barragens, canais, diques, reservatórios); na área de saneamento ambiental (aterros sanitários, estações de tratamento de água e esgoto); na agricultura (drenagem de campos agrícolas, controle da erosão, proteção de tubulações); na mineração (impermeabilização de lagoas de rejeitos, estabilização de taludes); em outras obras como em remediação de solos contaminados e infraestrutura urbana.

De acordo com Associação Brasileira de Geossintéticos (IGS Brasil) e Palmeira (2020) os geossintéticos podem ser classificados genericamente em categorias dependendo do processo de fabricação (Figura 3.2):

- (a) Geotêxteis: são mantas contínuas de fibras ou filamentos, tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados, sendo flexíveis e permeáveis.
- (b) Geogrelhas: são materiais geossintéticos com forma de grelha, função predominante de resistência a tração.
- (c) Georredes: são materiais com aparência semelhante à das grelhas formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante. Possui alta porosidade ao longo do plano, sendo usada para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases
- (d) Geomembranas: são materiais impermeáveis, feitas de polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP) ou outros materiais.
- (e) Geocompostos: é a combinação de duas ou mais funções em um único produto, como drenagem e filtração.
- (f) Geocompostos argilosos (GCL's): são geocompostos fabricados com uma camada de bentonita geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligadas à uma geomembrana ou à uma única manta de geotêxtil.
- (g) Geotubos: são tubos poliméricos perfurados ou não usados para drenagem de líquidos ou gases.
- (h) Geocélulas: são arranjos tridimensionais relativamente espessos, constituídos por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto.
- (i) Geoexpandido: são blocos ou placas produzidos por meio da expansão de espuma de poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade. O geoexpandido é usado para isolamento térmico, como um material leve em

substituição a aterros de solo ou como uma camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre muros rígidos.

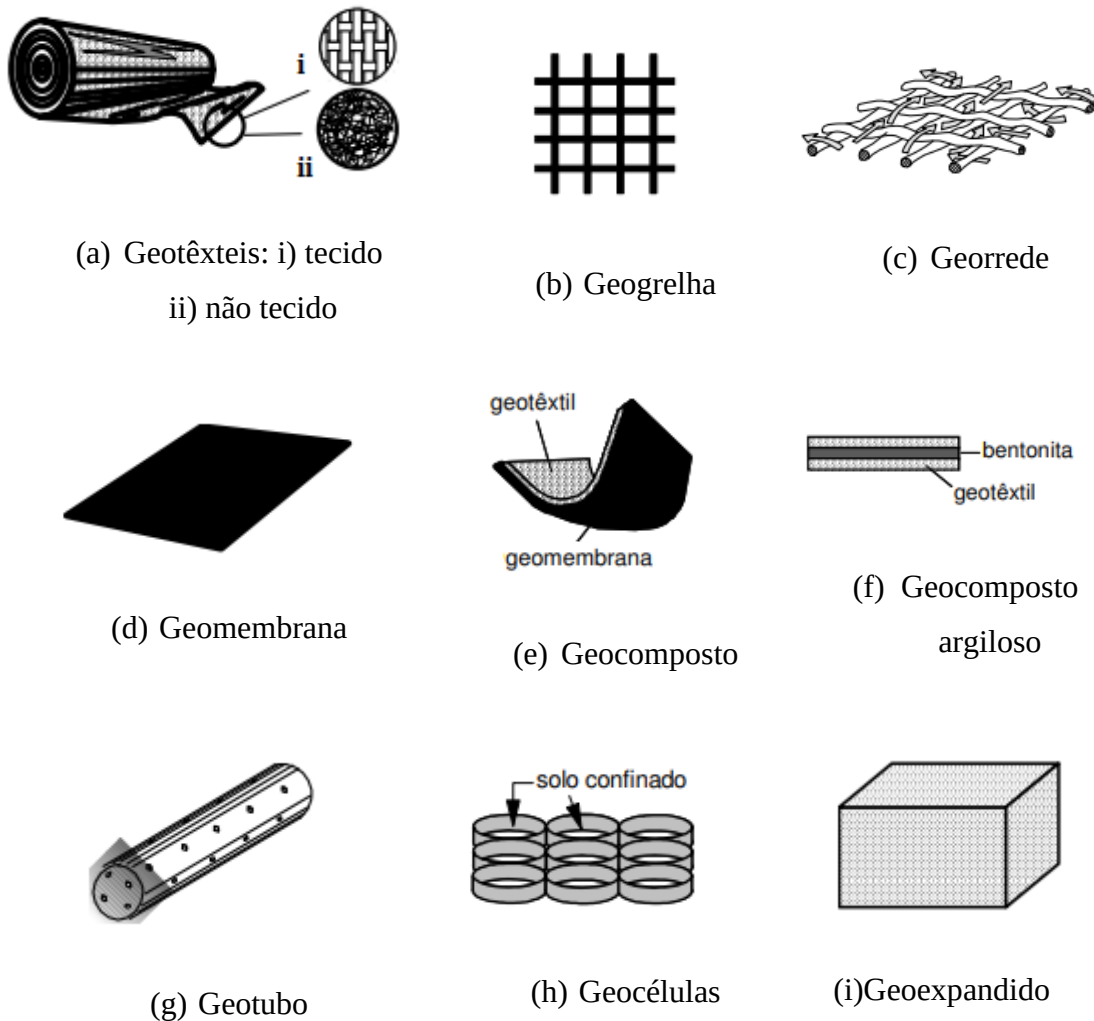


Figura 3.2 – Classificação dos Geossintéticos – IGS Brasil (Palmeira, 2020)

Os geossintéticos apresentam diversas funcionalidades e em alguns casos combinam mais de uma função, sendo as principais funções de acordo com Palmeira (2020, Figura 3.3):

- (a) Separação: o geossintético atua na separação de duas camadas de solo que têm distribuições de partículas diferentes. O geossintético também auxilia na prevenção do “bombeamento” de finos para o interior da camada granular permeável das estradas.

- (b) Filtração: o geossintético desempenha papel similar a um filtro de areia, permitindo a livre passagem de água através do solo enquanto retém as partículas sólidas.
- (c) Drenagem: facilitam o escoamento da água por meio de camadas de solo ou outros materiais, reduzindo a saturação e o risco de erosão.
- (d) Reforço: aumentam a resistência mecânica do solo, permitindo a construção de estruturas mais estáveis e seguras, como taludes, aterros e rodovias.
- (e) Barreira (Contenção de Fluidos/Gases): impedem a passagem da água, protegendo estruturas contra infiltração e garantindo a qualidade da água em reservatórios e aterros sanitários.
- (f) Proteção (Controle de Processos Erosivos): protegem o solo contra a erosão causada por vento e água, além de evitar o crescimento de vegetação indesejável.

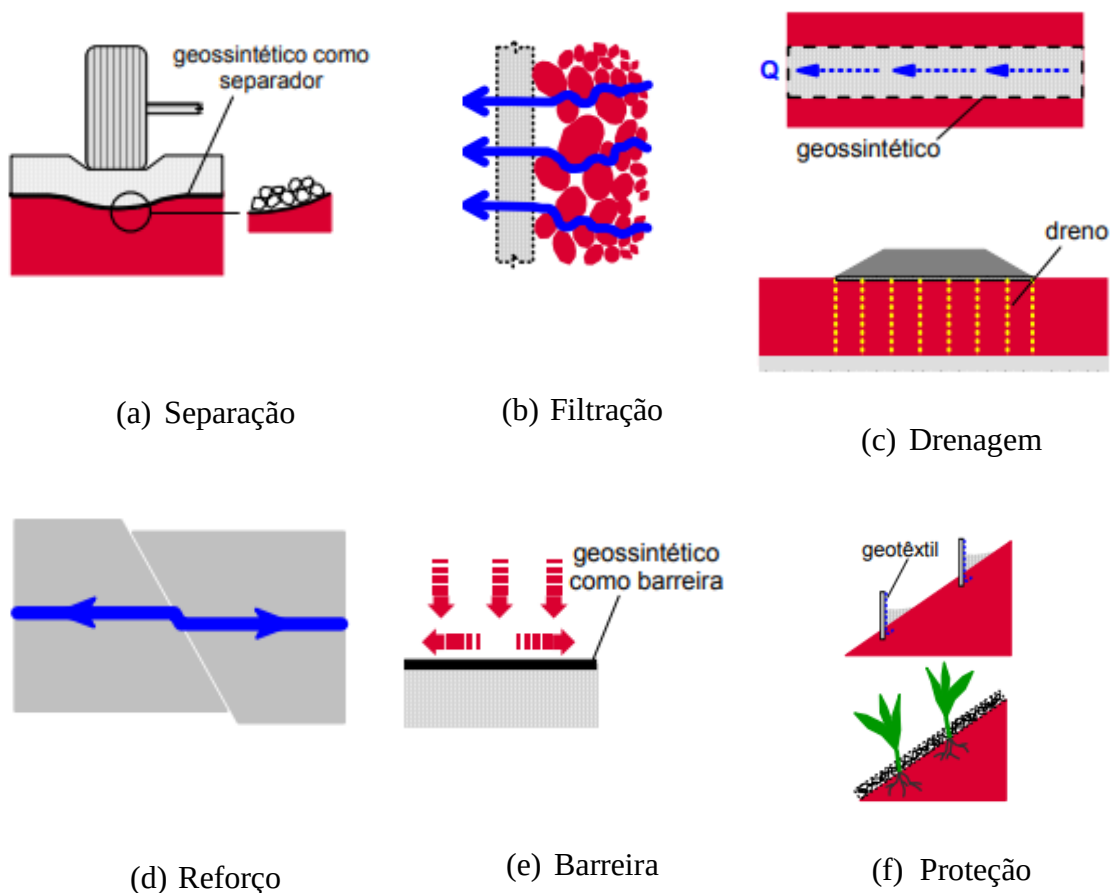


Figura 3.3 – Principais Funções do Geossintético -IGS Brasil (Palmeira, 2020)

Os geossintéticos apresentam diversas vantagens que os tornam uma boa escolha em projetos na área geotécnica. Sua alta resistência mecânica permite que suportem grandes cargas e deformações, tornando-os ideais para diversas aplicações. A durabilidade desses materiais é notável, pois resistem a intempéries, produtos químicos e ataques biológicos, garantindo uma longa vida útil. Além disso, a leveza dos geossintéticos facilita o transporte e a instalação, reduzindo os custos operacionais. A flexibilidade dos geossintéticos permite que se adaptem a diferentes formas e terrenos, enquanto sua permeabilidade possibilita a passagem da água e do ar quando necessário. Por outro lado, quando a impermeabilidade é necessária, os geossintéticos também podem impedir a passagem da água. Eles proporcionam soluções técnicas eficazes e econômicas, além de serem sustentáveis, já que alguns produtos são fabricados com materiais reciclados ou biodegradáveis.

O uso de solos reforçados com geossintéticos em projetos geotécnicos é uma prática consolidada que considera diversos aspectos essenciais para garantir a segurança e funcionalidade das estruturas

Quanto à orientação das forças, a prática comum é assumir que a força no reforço seja tangente à superfície de ruptura. Na escolha das propriedades dos materiais geossintéticos, os materiais com alta resistência e rigidez à tração, como geotêxteis tecidos, geogrelhas e geocompostos, são os preferidos. Geocélulas também são uma opção viável, atuando não apenas como reforço, mas também como uma "placa", proporcionando maior rigidez à base do aterro, o que favorece a diminuição de recalques diferenciais. Para projetos menores, onde a resistência à tração não é uma preocupação primordial e a deformabilidade não é crítica, geotêxteis não tecidos podem ser a escolha adequada. Quanto a composição do reforço permite entender a relação força-deformação-tempo dos reforços, garantindo a aplicação de valores corretos nas análises de resistência e rigidez à tração. (Palmeira, 2018).

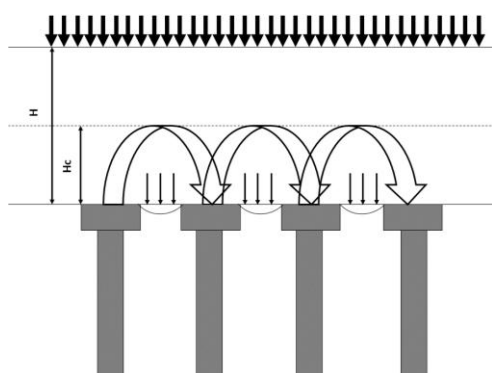
No entanto, os geossintéticos também apresentam algumas desvantagens. O custo inicial pode ser mais alto em comparação com materiais tradicionais, como concreto e aço. Além disso, alguns produtos podem sofrer degradação UV com a exposição à luz solar, necessitando de proteção adicional. A instalação de certos geossintéticos requer mão de obra especializada, o que pode aumentar os custos de implantação. Por fim, a produção e o descarte de geossintéticos podem ter impactos ambientais, dependendo do tipo de material utilizado e dos processos envolvidos. Portanto é fundamental consultar

um profissional especializado para a seleção e o dimensionamento e aplicação correta dos geossintéticos.

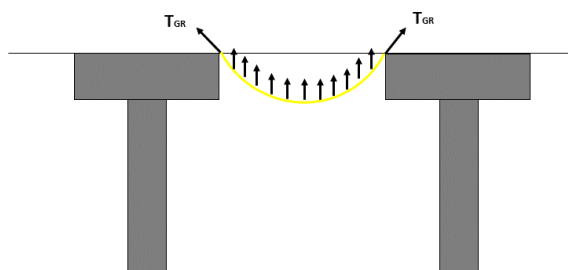
3.2 Métodos de Análise de Aterro Reforçado

Dentro da estrutura de um aterro estaqueado, é observado um fenômeno de redistribuição de tensões em decorrência do efeito de arqueamento. Este fenômeno é ilustrado na Figura 3.4 (a), que representa em vista lateral, um aterro estaqueado posicionado sobre um solo mole. As estacas que penetram no solo mole se estendem até uma camada de solo mais resistente localizada em profundidade. As linhas de tensão no desenho apresentam uma curvatura que evidencia a redistribuição da tensão vertical. Essas linhas são mais próximas nas zonas adjacentes às estacas, indicando uma maior concentração de tensão, enquanto se tornam mais espaçadas entre as estacas, representando zonas de menor rigidez. Este tipo de efeito começou a ser estudado e denominado por Terzaghi (1943).

Em casos em que a camada de aterro é reforçada com geossintéticos, surge um novo comportamento. O elemento de reforço, ao ser submetido a cargas, desenvolve forças de tração que direcionam essas cargas para as cabeças das estacas. Este fenômeno tem como consequência a redução das tensões no solo e é comumente referido como efeito membrana, conforme exemplificado na Figura 3.4 (b). Na ilustração, observa-se uma vista lateral de um aterro estaqueado que contém camadas intercaladas de reforço geossintético. As linhas de tensão nesta figura demonstram como as cargas são direcionadas, indicando áreas de baixa tensão entre as estacas devido à presença do geossintético, que atua como uma membrana para a redistribuição de cargas.



(a) Efeito de Arqueamento do Solo



(b) Efeito Membrana

Figura 3.4 – Distribuição de Tensões no Aterro

Conforme ilustrado na Figura 3.4 (a), a camada de distribuição de carga desempenha um papel crucial ao distribuir as cargas aplicadas na superfície para as cabeças das inclusões rígidas, ou capitéis. Esse mecanismo de distribuição atua minimizando as tensões no solo reforçado e, conseqüentemente, reduzindo os recalques excessivos (Briançon & Simon, 2012). A interação solo-estrutura e os mecanismos de transferência de carga em sistemas com inclusões rígidas representam complexidades notáveis que, até hoje, não são completamente compreendidas.

Para que o efeito de arqueamento se desenvolva efetivamente em um aterro estaqueado, é preciso que exista uma altura crítica. Essa altura é definida como o ponto a partir do qual a camada de distribuição de carga facilita a ocorrência do efeito de arqueamento. Assim, torna-se fundamental compreender o comportamento do material usado na camada de distribuição. Materiais granulares são frequentemente escolhidos por apresentarem propriedades que não variam significativamente mesmo em situações de saturação.

Os métodos analíticos foram desenvolvidos com o objetivo de descrever esse comportamento e quantificar seus efeitos para fins práticos de dimensionamento, sendo assim, incorporados nas normativas de engenharia.

A Norma Britânica (BS 8006, 2010) e a diretriz alemã (EBGEO, 2011) são as recomendações técnicas mais utilizadas na prática. Entretanto com o tempo outras normas e diretrizes tem ganhado notoriedade como a Norma de Projeto Holandesa (CUR 226, 2016), o Modelo Simplificado (Zhuang et al., 2014) e o Projeto ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides).

O Modelo Simplificado (Zhuang et al., 2014) propõe um método de dimensionamento que estima a tensão atuante sobre o reforço com base na teoria de arqueamento de Hewlett e Randolph (1988). Esse método é semelhante ao adotado no modelo britânico, porém inclui simplificações, tais como: o material de aterro é considerado homogêneo, isotrópico e sem coesão; o material de fundação é homogêneo, isotrópico e sua resposta deve ser linear para cada espessura; o reforço é tratado como homogêneo, isotrópico e apresenta comportamento linear; as estacas são consideradas suficientemente rígidas e não sofrem deformações; o atrito entre o solo de fundação e as

estacas é desconsiderado; e a razão entre a altura do aterro e o vão entre capitéis é superior a 0,5.

O Projeto Nacional ASIRI foi desenvolvido pelas universidades em conjunto com empreiteiros de obras públicas e empresas de engenharia na França, com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento de uma nova técnica de melhoria do solo. O projeto apresenta uma série de recomendações para a melhoria de solos de fundação por meio da inserção de inclusões rígidas verticais. Entre 2005 e 2011, foram realizadas atividades de pesquisa e estudos que evidenciaram a ausência de referências regulatórias adequadas no território francês. Diante disso, houve a necessidade de desenvolver e implementar diretrizes específicas e adaptadas a essa nova técnica. O Projeto Nacional ASIRI concentrou-se em projetar, conduzir e interpretar uma série de experimentos físicos e modelos numéricos, passo fundamental para compreender os mecanismos atuantes neste inovador sistema de fundação.

No Brasil, quando se trata da temática de aterros estaqueados reforçados os profissionais da área recorrem frequentemente a normas e recomendações técnicas originadas no cenário europeu. Deste modo, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) estabeleceu, em junho de 2022, a normativa DNIT 380/2022, que trata dos procedimentos para a utilização de geossintéticos em aterro sobre solos moles em obras rodoviárias. Essa normativa recomenda, para aplicação de geossintético como reforço, o método de dimensionamento alemão EBGEO (2011).

Os métodos analíticos e normativas existentes, embora apresentem diferenças entre os critérios de projeto, têm como objetivo comum de assegurar a estabilidade das estruturas, garantindo a segurança e eficiência das obras reforçadas com geossintéticos. Zornberg e Leshchinsky (2003) recomendam que os engenheiros adaptem as metodologias de projeto às condições locais, considerando a norma aplicável, os materiais disponíveis e o comportamento esperado do solo reforçado.

Esta pesquisa decidiu se aprofundar nos estudos dos modelos de dimensionamento mais utilizados nas práticas normalizadas pelos países europeus, sendo eles: a Norma Britânica (BS 8006, 2010), Norma Britânica modificada por Van Eeklen (BS 8006, 2011) a diretriz alemã (EBGEO, 2011) e a Norma de Projeto Holandesa (CUR 226, 2016).

De maneira geral, segundo Van Eekelen et al. (2012a, 2012b, 2013), as normativas seguem uma metodologia de dimensionamento de aterro estaqueado reforçado com geossintético em duas etapas para estimar os efeitos:

- O arqueamento do solo: calcula-se inicialmente a carga transferida diretamente para as estacas
- O efeito membrana do reforço: calcula-se a parcela de contribuição do geossintético no auxílio de redirecionamento da carga não transferida diretamente para as estacas.

A Figura 3.5 ilustra a distribuição dos efeitos estruturais em um aterro estaqueado rodoviário. As setas com a legenda "A" indicam o efeito de arqueamento; as setas com a legenda "B" representam o efeito membrana; e as setas com a legenda "C" denotam a parcela de carga que não é absorvida pelo método de dimensionamento, ficando dependente da capacidade de suporte do solo. Algumas normativas, contudo, não consideram esse último aspecto, desconsiderando a capacidade de suporte do solo devido à complexidade de sua mensuração. No entanto, um dimensionamento eficiente das parcelas A e B é suficiente para garantir a segurança do sistema, minimizando a influência da parcela C sobre a estabilidade global do aterro.

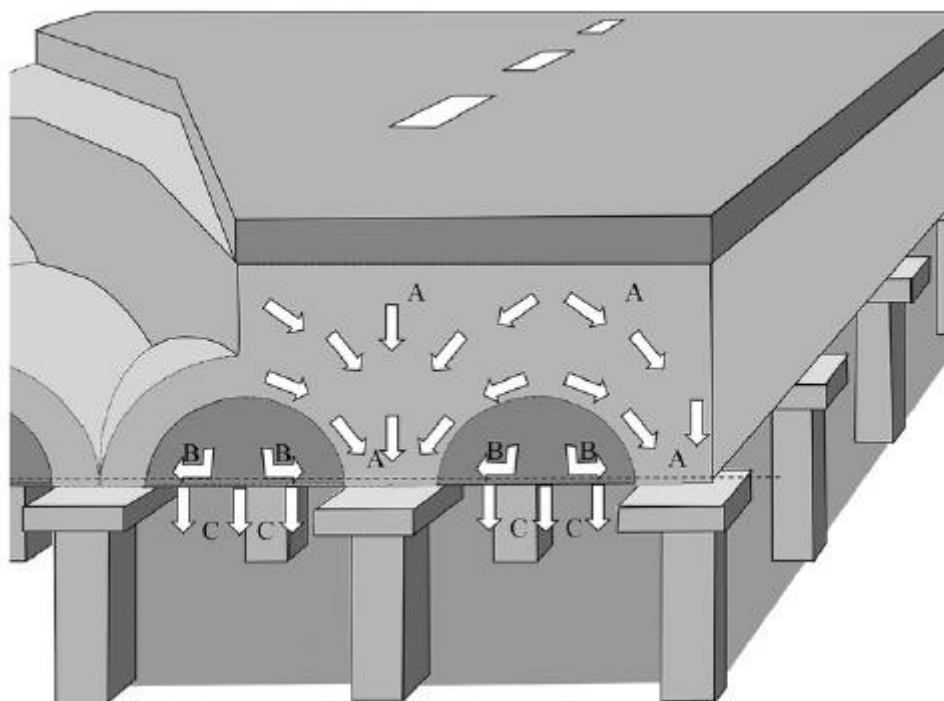


Figura 3.5 - Divisão de Cargas no Aterro Estaqueado Reforçado com Geossintético (Van Eekelen et al, 2011)

3.2.2 Teoria de Arqueamento de Terzaghi (1943)

A teoria de arqueamento de Terzaghi (1943) é uma abordagem fundamental na engenharia geotécnica, descrevendo como as tensões são redistribuídas no solo devido à presença de uma estrutura rígida. De acordo com Terzaghi (1943), o arqueamento é um dos fenômenos mais universais encontrados em solos, tanto no campo quanto no laboratório. O arqueamento é mantido por tensões de cisalhamento no solo, sendo mais presente em solos granulares.

Terzaghi (1943) exemplifica este fenômeno com a seguinte situação: se não fosse possível haver tensões de cisalhamento permanentes em uma areia, as sapatas na areia assentariam indefinidamente. Por outro lado, qualquer influência externa que provoque um recalque suplementar de uma sapata ou um movimento adicional de um muro de contenção sob forças estáticas inalteradas também reduziria a intensidade dos efeitos de arqueamento existentes, com as vibrações sendo a influência mais importante desse tipo. Em seu estudo, Terzaghi (1943) elaborou um experimento com uma caixa contendo areia e um alçapão na parte inferior. Quando o alçapão era aberto, a massa de solo tendia a se movimentar, formando uma superfície de ruptura, onde foi possível observar o efeito do arqueamento.

A teoria de arqueamento trata da redistribuição de tensões no solo devido à presença de uma estrutura rígida. Quando uma carga é aplicada ao solo, uma parte significativa dessa carga é transferida diretamente para a estrutura rígida, enquanto o restante é redistribuído através do solo ao redor. Essa redistribuição cria um efeito de "arqueamento" no solo, onde as tensões concentram nas regiões mais rígidas. Os principais conceitos da teoria são a redistribuição de tensões e a interação entre o solo e as estruturas rígidas, como estacas e muros de arrimo.

Esses conceitos tornaram-se amplamente aplicáveis no dimensionamento de estruturas geotécnicas. Em muros de arrimo, a teoria ajuda na compreensão da redistribuição de tensões atrás dos muros, reduzindo a pressão ativa. Em túneis e estruturas subterrâneas, ela é utilizada para prever a redistribuição de cargas do solo ao redor dos túneis. Em aterros estaqueados, a teoria explica como as tensões são transferidas para as estacas, minimizando recalques diferenciais.

Entretanto, a teoria de Terzaghi (1943) apresenta limitações devido à simplicidade do modelo. Ela não representa todas as complexidades do comportamento real do solo e

não considera a influência de fatores externos, como mudanças nas condições de umidade e temperatura, que podem afetar o comportamento do solo.

A teoria do arqueamento de Terzaghi (1943) continua sendo uma base essencial para a compreensão e análise de muitos problemas geotécnicos. Apesar de suas limitações, fornece uma visão valiosa sobre como as tensões são redistribuídas em solos interagindo com estruturas rígidas, auxiliando engenheiros a projetar soluções mais seguras e eficientes para uma variedade de desafios de engenharia.

3.2.3 Método Normativo Britânico (BS8006, 2010)

A Norma Britânica (BS8006, 2010) é considerada a mais conservadora em seu dimensionamento, por não levar em consideração a contribuição do subsolo. Para garantir que recalques diferenciais localizados não ocorram na superfície do maciço terroso, a norma recomenda que a razão entre a altura do aterro acima dos capitéis(H) e o espaçamento entre as faces laterais de capitéis adjacentes (sx) atenda à seguinte condição:

$$\frac{H}{(sx - a)} \geq 0,70 \quad (1)$$

O arqueamento completo ocorre quando a altura atinge a seguinte condição:

$$\frac{H}{(sx - a)} > 1,40 \quad (2)$$

Para a obtenção da distribuição das cargas do aterro pelo efeito do arqueamento a norma utiliza a abordagem de Marston & Anderson (1913). Os autores realizaram diversos experimentos para determinar o arqueamento acima de um tubo no solo de acordo com a Figura 3.6.

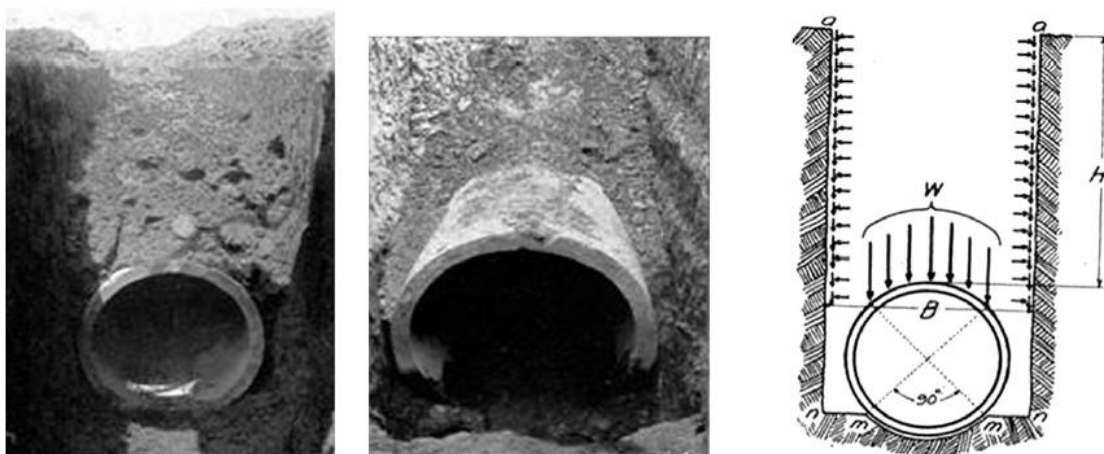


Figura 3.6 – Pesquisa Experimental de Martson&Anderson (1913)

A seguinte equação foi encontrada para a carga em um tubo infinitamente longo:

$$\frac{p'_c}{\sigma'_v} = \left[\frac{C_c a}{H} \right]^2 \quad (3)$$

Onde, p'_c é a parcela de tensão vertical transferida diretamente ao tubo; σ'_v é a tensão vertical média ($\gamma \cdot H$) na base do aterro (diretamente acima do tubo); C_c é o coeficiente de arqueamento; a é o diâmetro do tubo e H é a altura de aterro (sobre o tubo). Marston & Anderson (1913) determinaram o coeficiente de arqueamento para vários tipos de solo macio abaixo e adjacente ao tubo. A Tabela 3.1 apresenta as formulações para os valores do coeficiente de arqueamento de acordo com os tipos de estacas empregadas na Norma BS8006(2010).

Tabela 3.1 - Coeficiente de Arqueamento (C_c) para aterros estaqueados reforçados (BS8006, 2010)

Tipo de Estaca	Coeficiente de Arqueamento
Estacas rígidas com resistência de ponta	$C_c = 1,95 \left(\frac{H}{a} \right) - 0,18$
Estacas com resistência com atrito lateral e colunas granulares	$C_c = 1,50 \left(\frac{H}{a} \right) - 0,07$

Em seguida, calcula-se a carga distribuída atuante sobre a camada de reforço entre capitéis adjacentes (W_T).

Para o efeito do arqueamento parcial:

$$W_T = \frac{sx(f_{fs}\gamma H + f_q w_s)}{(sx^2 - a^2)} \left[sx^2 - a^2 \left(\frac{p'_c}{\sigma'_v} \right) \right] \quad (4)$$

Para efeito do arqueamento completo:

$$W_T = \frac{1,4sx f_{fs} \gamma (sx - a)}{(sx^2 - a^2)} \left[sx^2 - a^2 \left(\frac{p'_c}{\sigma'_v} \right) \right] \quad (5)$$

Onde, w_s é a sobrecarga uniformemente distribuída; γ é o peso específico do material de aterro; f_{fs} é um fator parcial de majoração de carga para o peso específico do solo; e f_q é um fator parcial de majoração de cargas externas aplicadas. Ambos os fatores de majoração e carga podem ser obtidos por tabelas da norma britânica (BS8006, 2010).

Outro método aplicado no dimensionamento normativo é o de Hewlett & Randolph (1988) que determina a eficiência de arqueamento como a parcela de carga do aterro transferida para os capitéis. A teoria deste método determina a eficiência de arqueamento (E) como a parcela de carga do aterro transferida para os capitéis. Portanto, a parcela da carga do aterro transferida para o reforço geossintético pode ser determinada como $(1 - E)$. Pode-se afirmar que, nesse sistema a ruptura pode ocorrer em duas localizações críticas: na coroa do arco ou nas bases do arco, conforme ilustrado na Figura 3.7.

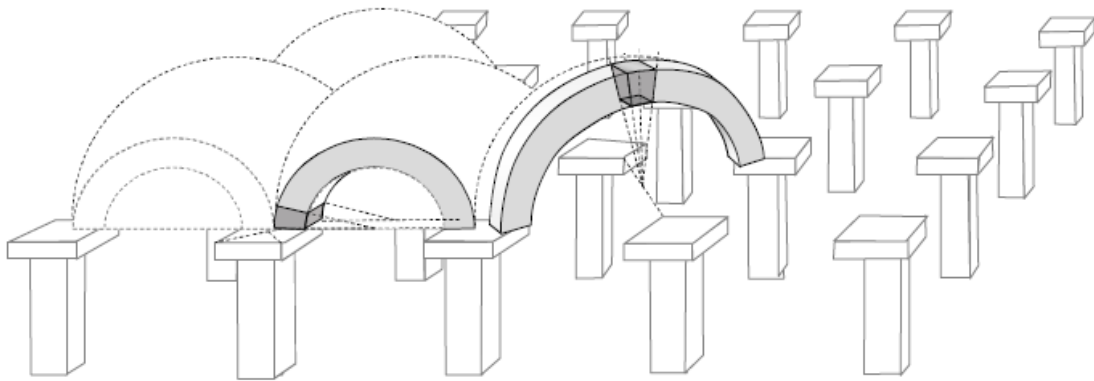


Figura 3.7 – Eficiência pelo Método Hewlett & Randolph (1988) – Ref. (Van Eekelen, 2015)

Este método é formulado da seguinte maneira:

$$E_{crown} = 1 - \left[1 - \left(\frac{a}{sx} \right)^2 \right] (A - AB + C)$$

Onde,

(6)

$$A = \left[1 - \left(\frac{a}{sx} \right)^2 \right]^{2(K_p - 1)}, B = \frac{sx}{\sqrt{2H}} \left(\frac{2K_p - 2}{2K_p - 3} \right), C = \frac{sx - a}{\sqrt{2H}} \left(\frac{2K_p - 2}{2K_p - 3} \right)$$

$$\text{Sendo, } K_p = \frac{1 + \text{sen}(\theta')}{1 - \text{sen}(\theta')}$$

$$E_{cap} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Onde,

(7)

$$\beta = \frac{2K_p}{(K_p + 1)(1 + \frac{a}{sx})} \left[\left(1 - \frac{a}{sx} \right)^{-K_p} - \left(1 + K_p \left(\frac{a}{sx} \right) \right) \right]$$

Após o cálculo é escolhido a eficiência mínima de arqueamento, E_{min} , sendo o menor valor entre E_{crown} e E_{cap} . Este valor é utilizado na formulação para determinar a carga máxima distribuída no reforço (W_T).

$$W_T = \frac{sx(f_{fs}\gamma H + f_q w_s)}{(sx^2 - a^2)} (1 - E_{min}) sx^2 \quad (8)$$

Van Eeklen (2011) considera em particular que a normativa britânica projeta um reforço geossintético relativamente forte para o caso de aterros mais baixos e, portanto, caro em comparação com outros modelos de projeto. Dessa forma, foi proposta uma modificação na norma para este tipo de caso no dimensionamento do efeito membrana. Se o BS8006 Modificado aplicar arqueamento completo, as forças de tração podem diminuir; portanto, essa abordagem deve ser aplicada com muito cuidado. Assim as formulações para o método BS8006 Modificado são:

- Arqueamento Parcial:

$$W_T = \frac{1}{2} (\gamma H + q)(sx + a)X \quad (9)$$

- Arqueamento Completo:

$$W_T = 0,7\gamma(sx^2 - a^2)X \quad (10)$$

Onde:

$$X = \frac{(sx^2 - a^2)(\frac{\sigma_{cap}}{\gamma H + q})}{(sx^2 - a^2)}$$

Portanto, uma vez determinada a carga distribuída (W_T) que atua sobre o reforço, para um reforço extensível, a carga de tração (T_{rp}) por metro executado, gerada no reforço resultante da W_T , deve ser

$$T_{rp} = \frac{W_T (sx - a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (11)$$

Sendo, ε a deformação do reforço.

3.2.4 Método de Recomendação Alemão (EBGEO, 2011)

A recomendação alemã é um método analítico que leva em consideração a contribuição do subsolo, o método é fundamentado na teoria de arqueamento apresentado por Zaeske (2001), no qual é utilizada a forma de arcos hemisféricos, relacionando o raio com a distância diagonal entre os eixos dos capiteis, conforme a Figura 3.8.

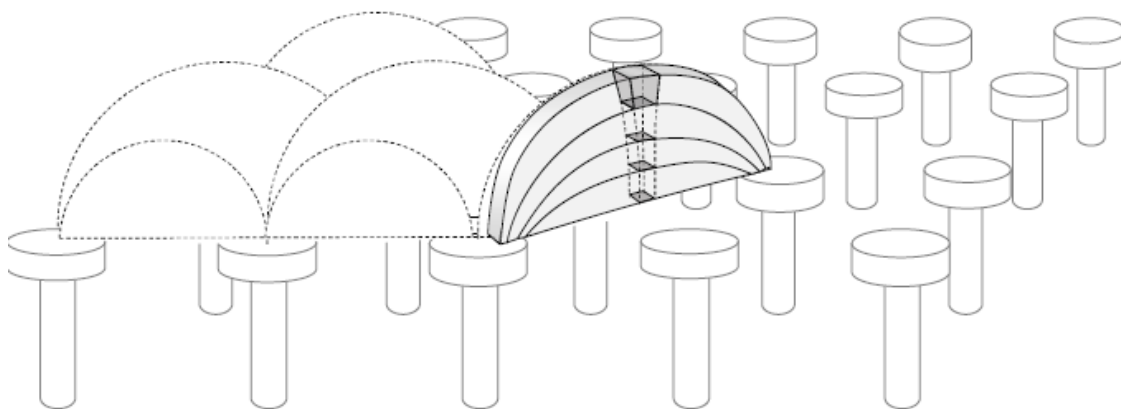


Figura 3.8 - Teoria do arqueamento de múltiplos arcos Zaeske (2001) – Ref. (Van Eekelen, 2015)

A EBGEO (2011) é recomendada para projeto de aterros sobre estacas que trabalham por ponta. Ainda existe a necessidade de elaboração adicional para o projeto de aterros sobre estacas que trabalham por atrito lateral. Como na normativa britânica (BS 8006,2010), por questões de segurança, também contém recomendações de fatores parciais para as cargas e para os parâmetros de resistência dos materiais, tais como aterro, estacas e reforço geossintético. Entretanto, a recomendação desses fatores é mais específica do que na BS8006(2010). Além de apresentar para diversas condições de aplicação, como durante a construção, após a construção e para casos específicos (como terremotos, por exemplo), este método leva em consideração as variáveis geométricas e materiais do aterro.

Para o dimensionamento deve atender a uma série de condições e recomendações específicas, conforme indicado na Figura 3.8 e Figura 3.9, onde devem ser observadas as seguintes condições em relação à distância de centro a centro das estacas (s), o diâmetro das estacas ou diâmetro equivalente do capitel (d_{eq}):

- a) Para cargas estáticas: $(s - d_{eq}) \leq 3 \text{ m}$;
- b) Para elevadas cargas móveis: $(s - d_{eq}) \leq 2,5 \text{ m}$;
- c) $d_{eq}/s \geq 0,15$;
- d) $h/(s - d_{eq}) > 0,8$, onde h representa a altura total do aterro acima do capitel;
- e) $h^* \geq (s - d_{eq})$, onde h^* é a altura do aterro de material granular sobre o capitel;
- f) Para elevadas cargas móveis: $h/(s - d_{eq}) > 2$;
- g) $0,5 < s_x/s_y < 2,0$;

h) O ângulo de atrito efetivo característico deve ser $\geq 30^\circ$.

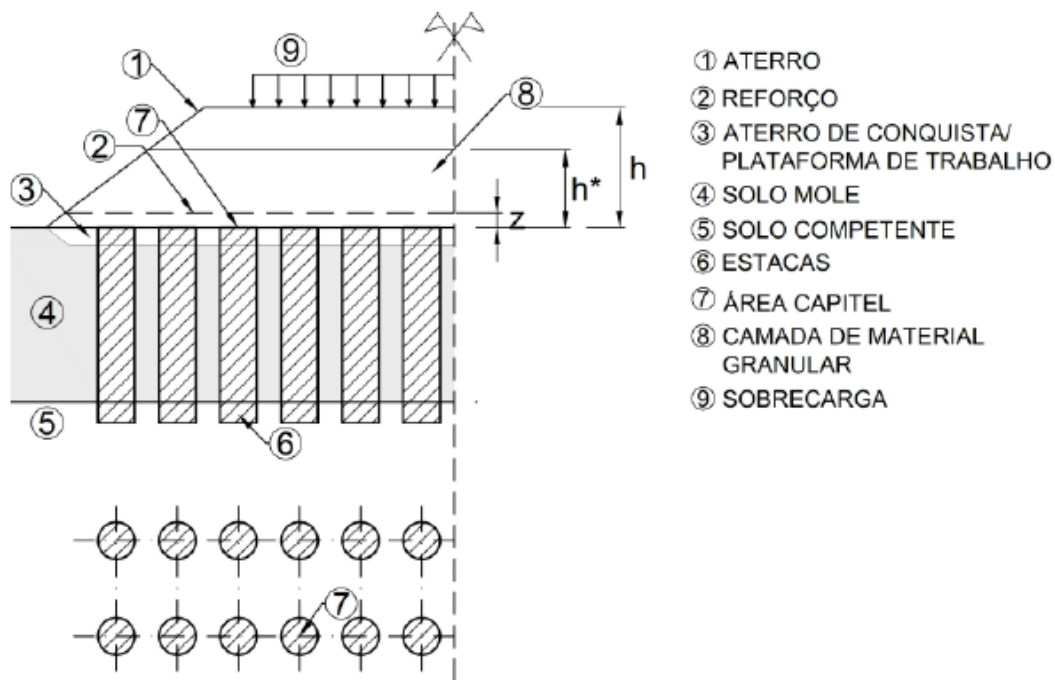


Figura 3.9 – Representação Esquemática do Aterro Sobre Estacas Reforçado (DNIT, 2022)

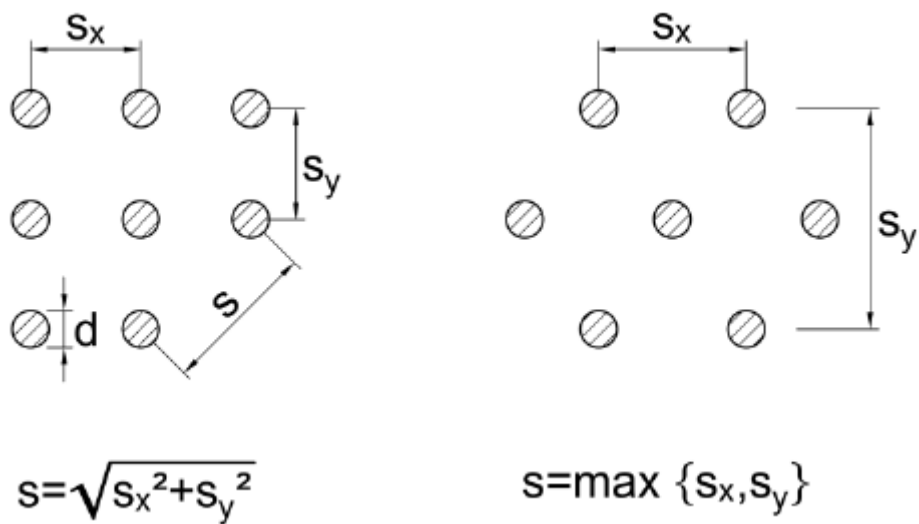


Figura 3.10 – Arranjo em planta do espaçamento entre estacas (DNIT, 2022)

A EBGeo (2011) recomenda, inicialmente, o cálculo da tensão entre os elementos de apoio. Após essa etapa, procede-se ao cálculo da tensão aplicada no capitel e nas estacas. Deste modo contempla as seguintes etapas de cálculo:

$$\sigma_{z0,k} = \lambda_1^\chi \left(\gamma_k + \frac{p_{G,k}}{h} \right) \left\{ h(\lambda_1 + h_g^2 \lambda_2)^{-\chi} + h_g \left[\left(\lambda_1 + \frac{h_g \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g \lambda_2)^{-\chi} \right] \right\} \quad (12)$$

Onde,

$$h_g \rightarrow h_g = \frac{s}{2} \text{ se } h \geq \frac{s}{2} \text{ ou } h_g = h \text{ se } h < \frac{s}{2}$$

$$K_{crit} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'_k}{2} \right)$$

$$\chi = \frac{d(K_{crit} - 1)}{\lambda_2 s}$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}(s - d)^2$$

$$\lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2}$$

Em que $\sigma_{z0,k}$ é a tensão vertical sobre a camada de reforço; $p_{G,k}$ o valor característico da sobrecarga na superfície do aterro; h a altura do aterro; d o diâmetro da estaca; φ'_k o valor característico do ângulo de atrito do solo do aterro; γ_k o valor característico do peso específico do material de aterro; e h_g a altura do arco.

A norma também apresenta ábacos para alguns casos de aterro não coesivo com determinados tipos de ângulo de atrito, a exemplo a Figura 3.9, com o ângulo de atrito igual a 30°.

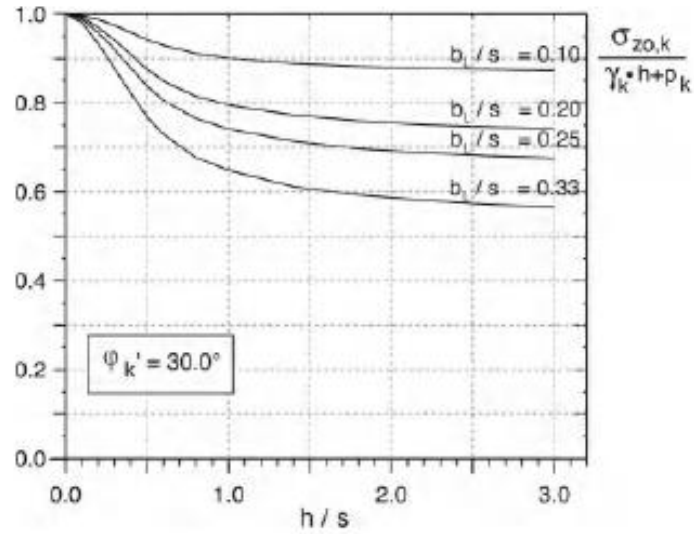


Figura 3.11 – Tensão vertical sobre o solo mole entre estacas para um aterro não coesivo com ângulo de atrito igual a 30° (EBGEO,2011)

O cálculo do esforço a tração no geossintético em cada direção (x ou y) depende do arranjo em planta das estacas. Neste estudo apresenta-se o arranjo retangular com simetria semelhantes para o eixo x e y, ou seja, $s_x = s_y$. Os valores das forças no reforço podem ser obtidos da seguinte maneira:

$$F_{x,k} = A_{Lx} \sigma_{z0,k} = F_{y,k} = A_{Ly} \sigma_{z0,k} \quad (13)$$

Onde,

$$A_{Lx} = \frac{1}{2}(s_x s_y) - \frac{d^2}{2} \tan^{-1}\left(\frac{s_y}{s_x}\right) \frac{\pi}{180^\circ}$$

$$A_{Ly} = \frac{1}{2}(s_x s_y) - \frac{d^2}{2} \tan^{-1}\left(\frac{s_x}{s_y}\right) \frac{\pi}{180^\circ}$$

Em que s_x e s_y é o espaçamento entre estacas, A_{Lx} e A_{Ly} são as áreas carregadas em planta que contribuem para o cálculo das forças verticais sobre as faixas nas direções x e y, respectivamente. Com o valor da força vertical (F_k) do reforço pode-se estimar a deformação (ε_k) por meio do ábaco presente em norma. E a partir do valor de deformação e da rigidez do reforço (J_k) utilizado é possível calcular a tração do reforço (T) na direção considerada.

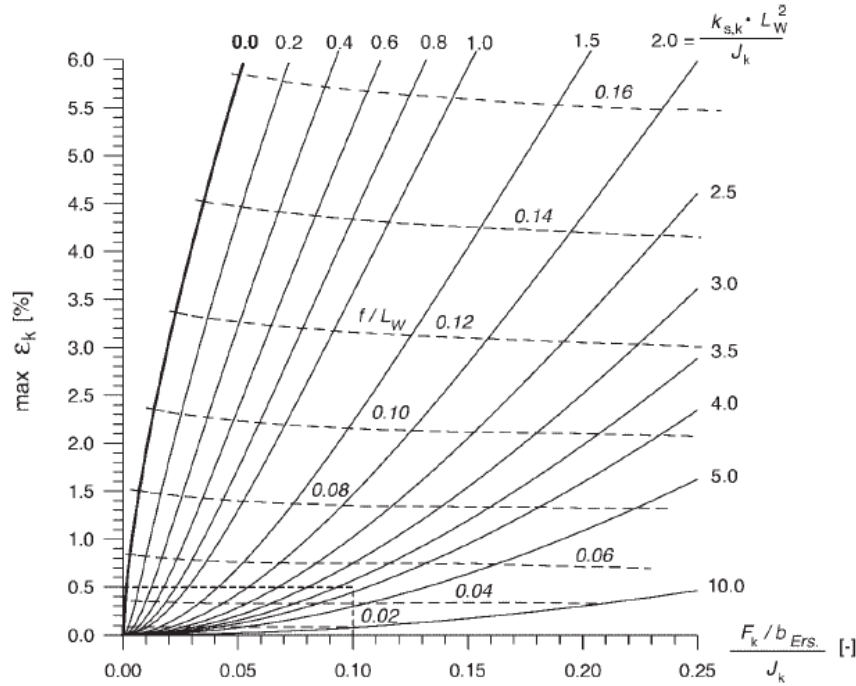


Figura 3.12 – Deformação de tração máxima do reforço (EBGEO,2011)

Sendo,

$$b_{Ers} = \frac{1}{2} d \sqrt{\pi} \quad (14)$$

$$T = \varepsilon_k J_k \quad (15)$$

3.2.5 Método Normativo Holandês (CUR 226,2016)

O método da Norma Holandesa utiliza a teoria de Van Eekelen (2015) e Van Eekelen et al. (2013; 2015), sendo uma evolução dos modelos propostos por Hewlett e Randolph (1988) e Zaeske (2001). Este modelo de equilíbrio de estado limite com arcos concêntricos busca oferecer uma representação mais precisa do arqueamento observado em experimentos, especialmente para aterros relativamente finos, em comparação com os demais modelos mencionados.

Uma das principais premissas deste modelo é que a introdução de geossintéticos em aterros estacados resulta em uma transferência de carga mais eficiente para as estacas, através de um mecanismo de arqueamento. Nesse processo, a carga é

majoritariamente exercida nas estacas e nas faixas do geossintético situadas entre elas, onde é distribuída de maneira aproximadamente triangular inversa. Esta abordagem difere dos métodos britânico e alemão, que adotam, respectivamente, uma distribuição de carga uniforme e uma distribuição triangular no efeito membrana do tracionamento do geossintético, conforme ilustrado na Figura 3.13.

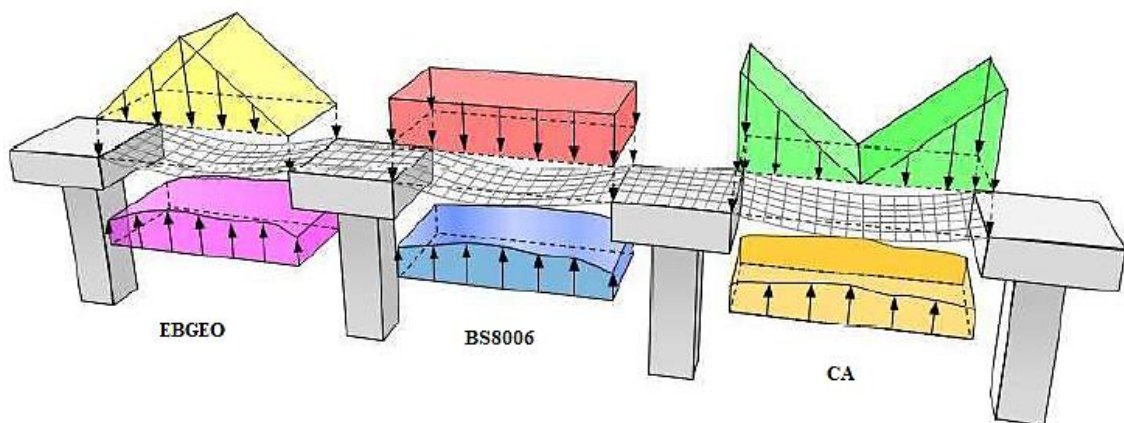


Figura 3.13 - Distribuição de carga no geossintético – Van Eekelen (2015)

O modelo de arcos concêntricos proporciona uma explicação física para o mecanismo de arqueamento, como demonstrado na dissertação de Van Eekelen (2015). Nesse contexto, é possível observar a influência de variáveis como a altura de preenchimento do aterro e o ângulo de atrito. A quantidade de arqueamento tende a aumentar com a consolidação do subsolo e a deflexão do geossintético.

O modelo dos Arcos Concêntricos segue uma metodologia em que, inicialmente, a carga é transferida ao longo de hemisférios 3D concêntricos em direção às faixas de geossintético, e posteriormente, através de arcos 2D concêntricos, em direção aos blocos, conforme ilustrado na Figura 3.14.

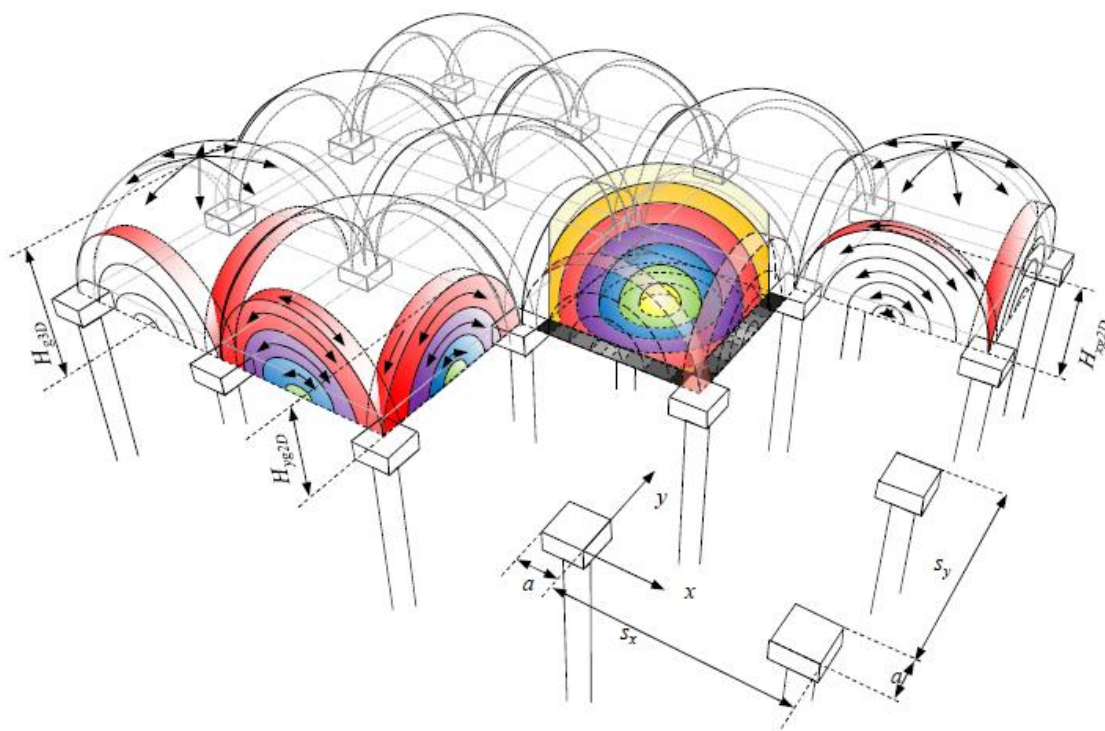


Figura 3.14 – Teoria dos Arcos Concêntricos - Van Eekelen (2015).

De forma mais detalhada, os arcos concêntricos 3D (hemisférios) são formados acima do quadrado delimitado por quatro estacas. Esses hemisférios distribuem a carga para fora em todas as direções, ao longo dos hemisférios, em direção às tiras de geossintético. O processo continua com a transferência adicional da carga ao longo dos arcos 2D situados acima das faixas de geossintético, em direção aos blocos. A Figura 3.15 demonstra, de maneira simplificada, o fenômeno 2D que ocorre entre duas estacas: à medida que o aterro é projetado, o efeito de arqueamento se intensifica até atingir a altura crítica necessária para a formação completa do arqueamento.

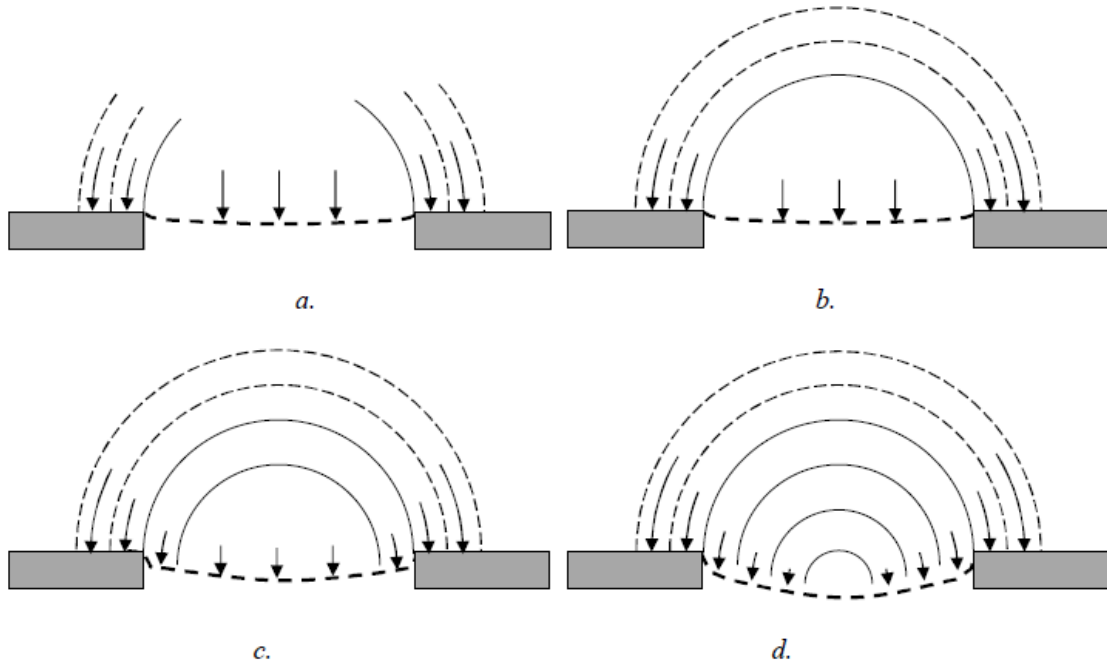


Figura 3.15 – Formação dos Arcos Concêntricos no Aterro estaqueado reforçado - Van Eekelen (2015).

O Modelo de Arcos Concêntricos, de maneira simplificada, para o cálculo do efeito arqueamento, segue em três etapas, de acordo com a Figura 3.16:

- a) Determinação da carga vertical total $F_{GRsquare}$ (em kN/pilha) exercida pelos hemisférios 3D em sua subsuperfície quadrada.

$$F_{GRsquare} = F_{GRsquare1} + F_{GRsquare2} + F_{GRsquare3} = \left(\frac{\gamma H + p}{\gamma H} \right) (F_{GRsq1p=0} + F_{GRsq2p=0} + F_{GRsq3p=0}) \quad (16)$$

Onde:

$$F_{GRsq1p=0} = \frac{\pi P_{3D}}{K_p} \left(\frac{L_{x3D}}{2} \right)^{2K_p} + \frac{2}{3} \pi Q_{3D} \left(\frac{L_{x3D}}{2} \right)^3$$

$$F_{GRsq2p=0} = {}_1F_{GRsq2} + {}_2F_{GRsq2} + {}_3F_{GRsq2} + {}_4F_{GRsq2}$$

Onde:

$${}_1F_{GRsq2} = \frac{2\pi P_{3D}}{2K_p} \left(2^{K_p} - 1 \right) \left(\frac{L_{x3D}}{2} \right)^3$$

$${}_2F_{GRsq2} = \frac{2\pi Q_{3D}}{3} \left(\sqrt[3]{2} - 1 \right) \left(\frac{L_{x3D}}{2} \right)^3$$

$${}_3F_{GRsq2} = \frac{P_{3D} 2^{2-2K_p} L_{x3D}^{2K_p}}{K_p} \left(-\frac{\pi}{2^{2-K_p}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \left(\frac{K_p-1}{n} \right) \right)$$

$${}_4F_{GRsq2} = \frac{1}{6} Q_{3D} L_{x3D}^3 \left(\sqrt{2} (1-\pi) + \ln(1+\sqrt{2}) \right)$$

$$F_{GRsq3p=0} = \gamma H \left((s_x - a)(s_y - a) - L_{x3D}^2 \right) \text{ se } L_{x3D}^2 < (s_x - a)(s_y - a)$$

$$F_{GRsq3p=0} = 0 \text{ se } L_{x3D}^2 \geq (s_x - a)(s_y - a)$$

Onde:

$$P_{3D} = \gamma K_p H_{g3D}^{2-2K_p} \left[H - H_{g3D} \left(\frac{2K_p-2}{2K_p-3} \right) \right] \text{ e } Q = K_p \frac{\gamma}{2K_p-3}$$

$$L_{x3D} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_x - a)^2 + (s_y - a)^2} \text{ se } H \geq \frac{1}{2} \sqrt{(s_x - a)^2 + (s_y - a)^2}$$

$$L_{x3D} = \sqrt{2} H_{g3D} \text{ se } H < \frac{1}{2} \sqrt{(s_x - a)^2 + (s_y - a)^2}$$

Calculo da Transferência de Carga:

$$F_{transferred} = \gamma H (s_x - a)(s_y - a) - (F_{GRsq1p=0} + F_{GRsq2p=0} + F_{GRsq3p=0})$$

$$p_{transferred} = \frac{F_{transferred}}{a(L_{x2D} + L_{y2D}) + a^2}$$

Onde:

$$L_{x2D} = s_x - a \text{ se } H \geq \frac{1}{2}(s_x - a)$$

$$L_{x2D} = 2H_{xg2D} \text{ se } H < \frac{1}{2}(s_x - a)$$

$$L_{y2D} = s_y - a \text{ se } H \geq \frac{1}{2}(s_y - a)$$

$$L_{y2D} = 2H_{yg2D} \text{ se } H < \frac{1}{2}(s_y - a)$$

e

$$H_{xg2D} = \frac{s_x}{2} \text{ se } H \geq \frac{s_x}{2}$$

$$H_{xg2D} = H \text{ se } H < \frac{s_x}{2}$$

$$H_{yg2D} = \frac{s_y}{2} \text{ se } H \geq \frac{s_y}{2}$$

$$H_{yg2D} = H \text{ se } H < \frac{s_y}{2}$$

b) Determinação da carga total $F_{GRstrips}$ (kN/estaca) nas tiras GR.

$$F_{GRstrip;p>0} = \left(\frac{\gamma H + p}{\gamma H} \right) \left(\begin{aligned} &2a \frac{P_{x2D}}{K_p} \left(\frac{1}{2} L_{x2D} \right)^{K_p} + \frac{1}{4} a Q_{2D} (L_{x2D})^2 + F_{GRstr2p=0} \\ &+ 2a \frac{P_{y2D}}{K_p} \left(\frac{1}{2} L_{y2D} \right)^{K_p} + \frac{1}{4} a Q_{2D} (L_{y2D})^2 + F_{GRstr2p=0} \end{aligned} \right) \quad (17)$$

Onde:

$$P_{x2D} = K_p H_{xg2D}^{(1-K_p)} \left[\gamma H + p_{transferred} - \gamma H_{xg2D} \left(\frac{K_p - 1}{K_p - 2} \right) \right]$$

$$P_{y2D} = K_p H_{yg2D}^{(1-K_p)} \left[\gamma H + p_{transferred} - \gamma H_{yg2D} \left(\frac{K_p - 1}{K_p - 2} \right) \right]$$

$$Q_{2D} = K_p \frac{\gamma}{K_p - 2}$$

Onde:

$$F_{xGRstr\ 2\ p=0} = \gamma H a (s_x - a - L_{x2D}) \text{ se } H \geq \frac{1}{2}(s_x - a)$$

$$F_{GRstr\ 2\ p=0} = 0 \text{ se } H < \frac{1}{2}(s_x - a)$$

$$F_{yGRstr\ 2\ p=0} = \gamma H a (s_y - a - L_{y2D}) \text{ se } H \geq \frac{1}{2}(s_y - a)$$

$$F_{GRstr\ 2\ p=0} = 0 \text{ se } H < \frac{1}{2}(s_y - a)$$

c) Determinação a carga total $F_{GRstrips}$ (kN/estaca) nas tiras GR.

$$A = F_{pile} = (\gamma H + p) s_x s_y - F_{GRsquare} - F_{GRstrips} \quad (18)$$

$$B + C = F_{GRsquare} + F_{GRstrips} \quad (19)$$

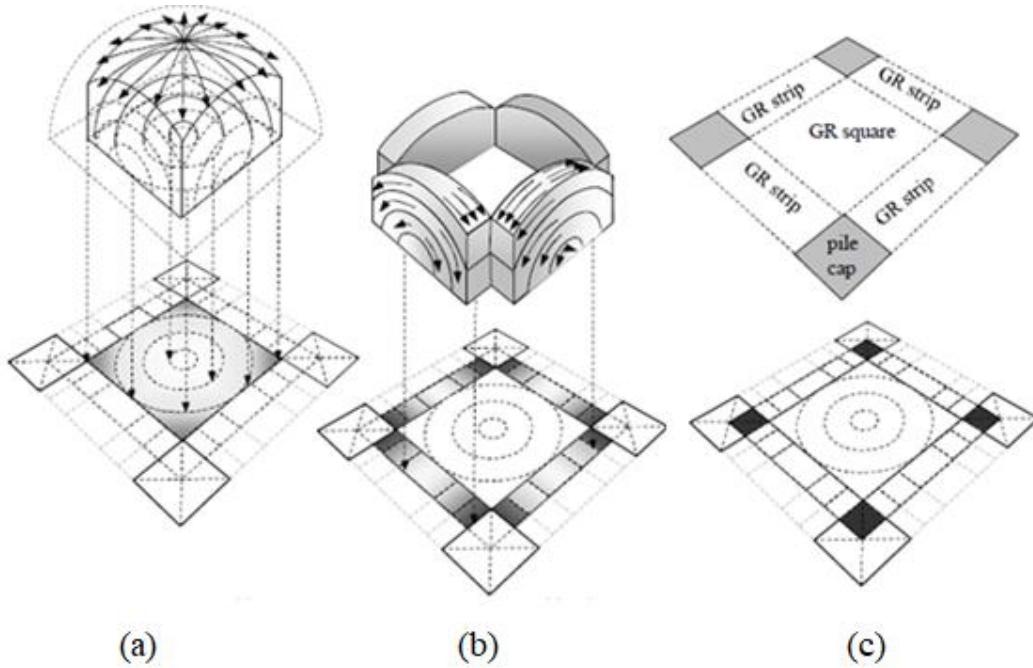


Figura 3.16 – Etapas de cálculo da combinação do hemisférico 3D com o arco 2D –

Van Eekelen (2015).

Cálculo da tração (T_H) e deflexão ($z(x)$) do geossintético de acordo com a distribuição de carga, adotando o método do triângulo invertido utilizado no modelo dos arcos concêntricos:

$$\frac{d^2}{dx^2} - \frac{K}{T_H} z(x) = \frac{2Q}{LT_H} x \quad (20)$$

Assumindo ($s_x = s_y$): $Q = \frac{B+C}{A_s}$

3.2 Modelagem física e numérica

Os modelos físicos e numéricos desempenham um papel fundamental na engenharia, fornecendo uma compreensão mais clara e precisa sobre o comportamento de sistemas complexos. Um modelo, em termos gerais, é uma representação simplificada de um determinado recorte de realidade. Ele é considerado adequado quando consegue prever, dentro de uma tolerância aceitável, o funcionamento do sistema que está sendo estudado. Na engenharia, a aplicação de modelos físicos em laboratório permite a simulação de cenários controlados que facilitam a obtenção de dados difíceis de acessar em condições reais, o que é essencial para a calibração e ajustes de modelos numéricos que posteriormente poderão ser aplicados a situações reais.

O desenvolvimento de modelos físicos apresenta vantagens importantes, como a possibilidade de reproduzir fenômenos complexos de maneira controlada. No entanto, também enfrenta uma série de desafios, principalmente no que se refere às questões de escala e precisão. A construção de um modelo físico, geralmente em escala reduzida, implica a necessidade de garantir que as variáveis relevantes sejam corretamente representadas, o que nem sempre é possível de maneira simples. A modelagem busca seguir a lei da semelhança buscando similaridade geométrica, mecânica, cinemática e dinâmica.

Um dos maiores desafios está relacionado à impossibilidade de replicar todas as variáveis de interesse em uma escala menor. Outros problemas surgem quando se tenta modelar fenômenos complexos, como aqueles que envolvem gradientes hidráulicos

elevados, interações solo-estrutura, ou atritos de base, que podem exigir técnicas e ajustes específicos. Além disso, a construção e a operação de modelos físicos em laboratório envolvem custos elevados e longos prazos, o que pode limitar sua utilização em projetos menores ou com orçamento restrito.

De acordo com Gomes (1993), os modelos físicos podem ser classificados em diferentes categorias, cada uma com suas particularidades:

- Modelagem física em condições normais de gravidade (1g). Essa abordagem convencional é amplamente utilizada em projetos geotécnicos, onde as dimensões do protótipo são reduzidas de maneira proporcional para simular as condições reais de campo. No entanto, este tipo de modelagem pode enfrentar limitações no que diz respeito à reprodução fiel de fenômenos que dependem da gravidade.
- Modelos bidimensionais com roletes cilíndricos. Esses modelos são usados para representar problemas que envolvem grandes deformações ou deslocamentos, como o caso de deslizamentos de terra ou falhas geotécnicas.
- Modelos sob gradientes hidráulicos elevados. Esse tipo de modelagem é aplicado para estudar o comportamento do solo ou de outros materiais sob a ação de fluxos de água intensos. O desafio aqui é garantir que o modelo possa representar de maneira adequada os gradientes encontrados em situações reais, o que pode ser particularmente complicado em experimentos em pequena escala.
- Modelos bidimensionais baseados em atrito de base. Nesse caso, o objetivo é representar problemas que envolvem a interação solo-estrutura, onde o atrito entre os elementos é um fator determinante. A dificuldade nesse tipo de modelagem é garantir que as condições de atrito sejam replicadas com precisão.
- Modelagem em queda livre ou em plano inclinado. Essa técnica é usada para estudar o comportamento de materiais ou estruturas quando submetidos a condições dinâmicas, como quedas ou deslizamentos. Um desafio importante aqui é a dificuldade de replicar, em pequena escala, a energia envolvida nos movimentos reais.
- Modelos em centrífugas. A modelagem em centrífugas é uma das técnicas mais avançadas para superar o problema de representação da gravidade. Ao simular as forças gravitacionais em um ambiente controlado, os modelos em centrífugas permitem o estudo de fenômenos que dependem diretamente da ação da

gravidade, como a estabilidade de encostas e a deformação de solos. No entanto, a operação de centrífugas envolve altos custos e complexidade técnica.

Enquanto os modelos físicos são extremamente úteis para validar conceitos e entender fenômenos complexos, o desenvolvimento de modelos numéricos tem ganhado relevância devido à sua flexibilidade, precisão e eficiência. Modelos numéricos são baseados em equações matemáticas que descrevem o comportamento de sistemas físicos, e podem ser resolvidos através de métodos computacionais. Eles permitem a análise de problemas complexos sem a necessidade de reproduzir fisicamente o sistema estudado.

Uma das principais vantagens dos modelos numéricos é a capacidade de ajustar rapidamente parâmetros e condições de contorno, algo que pode ser extremamente complicado e demorado em modelos físicos. No entanto, esses modelos dependem de uma calibração cuidadosa, muitas vezes baseada em dados obtidos a partir de modelos físicos. A combinação de ambos os tipos de modelagem (física e numérica) é uma prática comum na engenharia, onde os resultados de experimentos físicos são usados para refinar os modelos numéricos e, por sua vez, os modelos numéricos ajudam a prever comportamentos em larga escala.

Portanto, o desenvolvimento de modelos físicos e numéricos, quando realizados de maneira complementar, oferece uma abordagem poderosa para a resolução de problemas complexos na engenharia. Mesmo com as limitações inerentes a cada tipo de modelagem, a combinação dos dois proporciona uma ferramenta robusta para prever e analisar fenômenos que, de outra forma, seriam de difícil compreensão.

Os tipos de modelos numéricos comumente utilizados são o método dos elementos finitos, o método dos elementos discretos e o método das diferenças finitas, utilizando programas computacionais comerciais como Plaxis, FLAC, entre outros. Os modelos numéricos podem ser bidimensionais (axissimétricos ou estado plano de deformações) ou tridimensionais.

O método dos elementos finitos utiliza o processo de discretização do sistema em vários elementos para resolver equações diferenciais, substituindo um número infinito de variáveis por um número limitado de elementos com comportamento conhecido. Esse processo de discretização divide o meio em partes menores e menos complexas, simplificando assim os cálculos, o que pode requerer simplificações e aproximações.

Para elaborar isso, é necessário ter em mente a geometria do problema, ou seja, a definição das condições de contorno. A partir da geometria, é possível criar uma malha equivalente de elementos finitos. O design da malha pode ser influenciado por diversos fatores, incluindo descontinuidades geométricas, como cantos reentrantes ou rachaduras, interfaces entre materiais com diferentes propriedades e as condições de contorno aplicadas. Para essas zonas mais complexas, é preferível ter uma malha refinada com elementos menores. No entanto, à medida que o material se torna mais complexo, seu comportamento pode se tornar não linear.

Nos últimos anos, vários estudos em modelos físicos e numéricos sobre aterros estaqueados, reforçados e não reforçados, foram publicados. A Tabela 3.2 apresenta alguns desses estudos, que possuem diversos objetivos, como: estudar os principais parâmetros geométricos que influenciam o comportamento do sistema, investigar os mecanismos de transferência de carga, avaliar o desempenho de fundações com inclusão rígida para controle de recalques, analisar a influência do geossintético como elemento de reforço e propor melhorias no modelo analítico para maior concordância com os resultados experimentais e numéricos. Esses estudos têm gerado contribuições importantes para o desenvolvimento e aprimoramento da simulação numérica no dimensionamento de aterros estaqueados reforçados.

Tabela 3.2 – Estudos de modelos físicos e numéricos sobre aterros estaqueados reforçados e não reforçados

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
Chevalier, B., Villard, P., & Combe, G. (2011)	Modelo Numérico aplicando o método de Elementos Finitos e Diferença Finitas	Investigar os mecanismos de transferência de carga em estruturas de solo geotécnico com plataformas de preenchimento fino reforçadas por inclusões rígidas. Enfoque na modelagem dos mecanismos de transferência de carga que ocorrem na estrutura reforçada localizada sobre a rede de estacas.	- A inclusão de folhas de geossintético na base da camada granular aumenta a capacidade de redirecionar a sobrecarga para as estacas - Os mecanismos de transferência de carga em camadas granulares reforçadas por inclusões rígidas são complexos e dependem de vários fatores, incluindo a espessura da camada granular, a rigidez do solo mole e a presença de reforços geossintéticos. - As simulações numéricas indicam que a eficiência da transferência de carga aumenta com a espessura da camada granular e a rigidez do geossintético
Van Eekelen, S. J., Bezuijen, A., Lodder, H. J., & van Tol, E. A. (2012) -Part I	Modelo Físico reduzido em condições normais de gravidade	Realizar uma série de testes laboratoriais em 3D para investigar a distribuição de cargas, deformações e tensões em aterros sobre estacas reforçados com geossintéticos	- A consolidação do subsolo e o ângulo de atrito do material de enchimento influenciam significativamente o comportamento de arqueamento. Um ângulo de atrito mais alto resulta em maior arqueamento durante a consolidação - As diferenças de desempenho são mais pronunciadas entre diferentes tipos de material de enchimento (areia versus material granular). - Os testes demonstraram que o efeito de arqueamento e a carga suportada pelo reforço geossintético dependem da consolidação do subsolo e do ângulo de atrito do material de enchimento.

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
Van Eekelen, S. J., Bezuijen, A., Lodder, H. J., & van Tol, E. A. (2012) – Part II	Modelo Físico reduzido em condições normais de gravidade	Comparar os resultados de medições de testes laboratoriais em 3D com cálculos feitos usando o modelo analítico EBGEO (2010) e CUR 226 (2010). E propor melhorias no modelo analítico para melhor concordância com os resultados experimentais	- As modificações propostas para o EBGEO proporcionaram uma melhor previsão do comportamento de arqueamento e das tensões no geossintético - As simulações ajustadas mostraram uma redução significativa nas tensões calculadas, alinhando-se melhor com os resultados experimentais. - Este estudo destaca a importância de considerar a consolidação do subsolo e a distribuição de carga correta nos cálculos analíticos para obter previsões mais precisas do comportamento de aterros sobre estacas reforçadas com geossintéticos
Xing, H., Zhang, Z., Liu, H., & Wei, H. (2014).	Modelo Físico em condições normais de gravidade	Estudar o comportamento de plataformas de solo apoiadas em estacas, tanto com quanto sem reforço de geogrelhas, para melhorar a transferência de carga e reduzir recalques diferenciais.	- O uso de geogrelhas na plataforma de solo apoiada por estacas aumentou significativamente a eficiência do sistema, especialmente sob cargas maiores. O estudo valida o uso de geogrelhas para melhorar a transferência de carga e reduzir recalques diferenciais em aterros reforçados. - A eficácia do sistema com geogrelha foi 2,5% maior do que sem a geogrelha ao final dos testes. - A fricção negativa (skin friction) nas estacas foi menor no teste com geogrelha, indicando uma melhor distribuição de carga.
Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen,	Modelo Físico reduzido em	Validar modelos analíticos que descrevem o comportamento de aterros reforçados com	- O modelo de Arcos Concêntricos (CA) validou-se como uma ferramenta robusta para o projeto de aterros reforçados sobre estacas, fornecendo

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
A., & Van Tol, A. F. (2015)	condições normais de gravidade	geossintéticos apoiados em estacas, por meio de experimentos em modelo reduzido.	resultados mais precisos do que modelos anteriores, especialmente quando o suporte do subsolo é limitado. - A abordagem do modelo CA é recomendada para projetos que busquem maximizar a eficiência do reforço geossintético em aterros sobre solos moles. - Os resultados mostraram que para aterros mais altos e/ou estacas mais próximas, os assentamentos na superfície foram menores ou insignificantes.
Fagundes, D. F., Almeida, M. S., Thorel, L., & Blanc, M. (2017).	Modelo Físico em centrífuga	Analisar a influência de diferentes tipos de geometrias e rigidez dos geossintéticos nos mecanismos de transferência de carga e deformações em aterros sobre estacas reforçados com geossintéticos.	- A deflexão máxima dos geossintéticos foi analisada experimentalmente e comparada com previsões analíticas baseadas na norma britânica – BS8006. - A eficiência de transferência de carga aumentou com a inclusão de geossintéticos, especialmente em configurações com maior espaçamento entre estacas e menor altura do aterro. - A aplicação de geossintéticos é essencial para melhorar os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre estacas.
Fonseca, E. C., & Palmeira, E. M. (2019).	Modelo Físico reduzido em condições normais de gravidade	Investigar a precisão de diferentes métodos analíticos para o dimensionamento de aterros reforçados com geossintético sobre estacas. Sendo os métodos analíticos avaliados: Método Britânico (BS8006), Método Alemão (EBGEO), Método dos Arcos Concêntricos (modificado por van Eekelen) e outros métodos baseados em	- A precisão dos métodos depende do critério estatístico utilizado para avaliação. - Métodos como o BS8006 modificado e EBGEO proporcionam previsões mais precisas para a eficácia das estacas e deformações do reforço. - O método alemão apresentou superdimensionamento em algumas condições

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
		teorias de arqueamento e distribuição de cargas. Comparar as previsões desses métodos com os resultados de testes em grande escala.	- O estudo destaca a importância de selecionar o método analítico adequado com base na especificidade do projeto e nas condições do solo. - A instalação de geossintéticos resultou em arcos concêntricos elípticos, enquanto os aterros não reforçados mostraram padrões de deformação triangular e de assentamento igual com arco triangular. - O reforço basal de geossintéticos altera significativamente os padrões de deformação e o desenvolvimento do arqueamento do solo em aterros sobre estacas. - A rigidez do geossintético influencia o grau de arqueamento do solo, com materiais de menor rigidez resultando em maior arqueamento. - O estudo confirmou que a combinação do efeito de arqueamento e do efeito de membrana proporcionado pelo geossintético é eficaz na transferência de carga para as estacas, melhorando a estabilidade do aterro.
Rui, R., Han, J., Van Eekelen, S. J. M., & Wan, Y. (2019)	Modelo Físico Bidimensional(2D)	Investigar o desenvolvimento do efeito de arqueamento do solo em aterros sobre estacas, reforçados e não reforçados com geossintéticos.	- O estudo constatou que o uso de inclusões rígidas auxilia na redução de recalques devido a transferência de uma carga significativa dos solos para esses elementos. - O estudo também confirmou que interações complexas são desenvolvidas entre o solo reforçado, as inclusões e a camada de distribuição.
Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., & Camapum de Carvalho, J. (2019)	Modelo Numérico aplicando o método dos Elementos Finitos (2D e 3D)	Investigar o desempenho de fundações de inclusão rígida para controle de recalques considerando os solos característicos da cidade de Brasília	

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
Shen, P., Han, J., Zornberg, J. G., Morsy, A. M., Leshchinsky, D., Tanyu, B. F., & Xu, C. (2019).	Modelo Numérico aplicando o método das Diferença Finitas (2D e 3D)	Avaliar o desempenho de pilares de solo reforçados com geossintéticos, usando modelos numéricos 2D e 3D, para comparar como diferentes parâmetros afetam o comportamento desses pilares sob carregamento vertical.	- O comportamento desenvolvido na modelagem numérica foi semelhante ao observado em inclusões rígidas instrumentadas que faziam parte da fundação de uma estrutura industrial. - As fundações de inclusão rígida são mais eficientes quando o solo a ser reforçado é mais compressível e menos resistente porque a camada de distribuição transfere mais carga para a cabeça do elemento e menos carga para o solo reforçado. - O espaçamento entre as camadas de reforço teve uma influência mais significativa no desempenho dos pilares do que a rigidez do reforço. Camadas de reforço mais próximas resultaram em um aumento na rigidez global do pilar, menores deslocamentos laterais e tensões mais uniformemente distribuídas no reforço. - O modelo 3D captura com mais precisão os efeitos tridimensionais das interações entre os componentes do pilar, enquanto o modelo 2D oferece uma abordagem mais conservadora, com maior variação nas previsões de deslocamento e tensão.
Garcia, J. A. B., Rodríguez Rebolledo, J. F., dos Santos	Modelo Físico Bidimensional(2D)	Investigar o desenvolvimento do efeito de arqueamento do solo em aterros sobre estacas, reforçados e não reforçados com geossintéticos	- Geossintéticos com menor rigidez à tração resultaram em maior arqueamento do solo em comparação com aqueles com maior rigidez à tração.

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
Mützenber, D. V., Caicedo, B., & de Farias Neves Gitirana Jr, G. (2021)			- O reforço basal de geossintéticos altera significativamente os padrões de deformação e o desenvolvimento do arqueamento do solo em aterros sobre estacas. - A instalação de geossintéticos resultou em arcos concêntricos elípticos, enquanto os aterros não reforçados mostraram padrões de deformação triangular e de assentamento igual com arco triangular. - O estudo confirmou que a combinação do efeito de arqueamento e do efeito de membrana proporcionado pelo geossintético é eficaz na transferência de carga para as estacas, melhorando a estabilidade do aterro - A geogrelha tem como função principal ser um elemento de reforço rígido usado para melhorar a capacidade de carga do solo. O solo reforçado com geogrelha gera um mecanismo de intertravamento entre a grade e as partículas do solo, proporcionando essa melhoria da capacidade de carga do solo.
Mukherjee, S., & Babu, G. S. (2023)	Modelo Numérico aplicando o método das Diferença Finitas (3D)	Melhorar a precisão na previsão do comportamento dessas fundações por meio da criação de um modelo numérico tridimensional para a análise de fundações reforçadas com geogrelhas.	- O modelo numérico desenvolvido mostrou ser eficaz na simulação de fundações reforçadas com geogrelhas. As simulações numéricas estão em boa concordância com os dados experimentais, sugerindo que o modelo pode ser utilizado para uma variedade de aplicações geotécnicas
Brzeziński, K., & Michalowski, R. L. (2023).	Modelo Numérico aplicando o método dos	Avaliar a eficácia dos sistemas de suporte em aterros sobre estacas e o papel do arqueamento do solo na transferência de carga para as estacas.	- O sistema de suporte sem reforço geossintético atingiu uma eficácia de 80%, enquanto o sistema com geossintético apresentou eficácia superior a 90%. Isso

Referência	Tipo de Modelo	Objetivo do Estudo	Principais Contribuições
	Elementos Finitos (2D)		mostra que o geossintético melhora significativamente a transferência de carga para as estacas. - Foi observado que as tensões principais seguem trajetórias arqueadas, porém não formam os típicos "arcos" claros que são assumidos em muitos métodos de projeto. - A eficácia do sistema de suporte em aterros sobre estacas depende da altura do aterro e do espaçamento entre as estacas. A eficácia aumenta com o aumento da altura do aterro e diminui com o aumento do espaçamento entre estacas.

4. METODOLOGIA

Neste Capítulo são apresentados os materiais, processos e fontes de dados a serem avaliados na presente pesquisa.

A metodologia do projeto está dividida em quatro etapas principais, conforme descrito abaixo:

- **Etapa 0** - Ensaios Experimentais em Laboratório

Essa etapa envolveu a coleta de informações sobre a caracterização do material do aterro e do geossintético, visando à definição dos parâmetros iniciais e padrões de comportamento do solo e do geossintético no desenvolvimento do modelo numérico. Os dados foram obtidos a partir do modelo físico elaborado em laboratório por Melchior Filho (2022).

- **Etapa 01** - Definição da Malha de Estudo (2D)

Criação de um modelo numérico bidimensional axissimétrico, representando a estrutura de um capitel central com um vão preenchido por um material de aterro reforçado com geossintético. Definição dos parâmetros de entrada e condições de contorno para representar as condições reais do aterro semelhante ao modelo físico do Melchior Filho (2022).

- **Etapa 02** - Calibração do Modelo Constitutivo

A escolha do modelo constitutivo e o ajuste dos parâmetros foi realizado para que o modelo represente fielmente o comportamento observado nos ensaios laboratoriais, tanto para o material de aterro quanto para o geossintético. De acordo com o ensaio de cisalhamento elaborado por Melchior Filho (2022), essa abordagem visa assegurar a precisão do modelo.

- **Etapa 03** - Análise de Sensibilidade da Malha

Estudo da sensibilidade da malha do modelo em relação ao número de elementos (densidade da malha), avaliando a precisão e a confiabilidade dos resultados das simulações numéricas.

- **Etapa 04** - Programa de Dimensionamento dos Métodos Analíticos

Elaboração de um programa computacional para o dimensionamento da estrutura, com base nos métodos analíticos aplicados ao efeito do arqueamento e ao efeito

membrana. O objetivo é automatizar o processo de dimensionamento, apoiando a tomada de decisão e a otimização de projetos de aterros estaqueados.

- **Etapa 05** - Análise do Efeito do Arqueamento

Simulação do efeito do arqueamento no modelo numérico, quantificando a distribuição de tensões e sua aplicação no capitel central da estrutura. Também foi realizada uma avaliação da importância do geossintético como reforço estrutural, analisando sua contribuição no redirecionamento das tensões.

- **Etapa 06** - Comparação dos Resultados de Simulação com os Métodos Analíticos e Ensaio Laboratoriais

Comparação dos resultados obtidos para o efeito de arqueamento e o efeito de membrana, provenientes das simulações numéricas, com aqueles gerados pelos métodos analíticos e pelos ensaios laboratoriais. Essa comparação permite avaliar a precisão e a consistência dos modelos numéricos em relação às abordagens analíticas e experimentais, possibilitando a obtenção de conclusões relevantes sobre a aplicabilidade e as vantagens dos métodos numéricos no estudo de aterros estaqueados reforçados.

4.1 Modelo Físico

O modelo numérico foi calibrado e validado de acordo com resultados experimentais do modelo físico reduzido em condições normais de gravidade desenvolvido por Melchior Filho (2022) no Laboratório de Geotecnia do PPG/UnB.

4.1.1 Características Gerais

O equipamento, de acordo com a Figura 4.1 (a), simula o comportamento de um aterro formado por pedregulho, de aproximadamente 0,45m de espessura, apoiado em estacas quadradas de 0,2 m de lado e 0,5 m de espaçamento (entre eixos), e reforçado com diferentes tipos e configurações de geossintéticos. O aterro foi totalmente instrumentado de acordo com a Figura 4.1 (a) e (b) e enumerado abaixo:

- 05 (cinco) células de tensão total (CTT): para verificar o desenvolvimento do efeito de arqueamento do solo durante o alçamento do aterro;
- 01(uma) célula de carga (CC): para obter as cargas transferidas ao capitel central do modelo;
- 04 (quatro) transdutores de deslocamento linear (LVDT): para medir os recalques dos reforços na base do aterro;

- 03 (três) níveis de água (“Medidor hidráulico de recalques”) confeccionados especificamente para esta pesquisa: para medir os recalques superficiais.

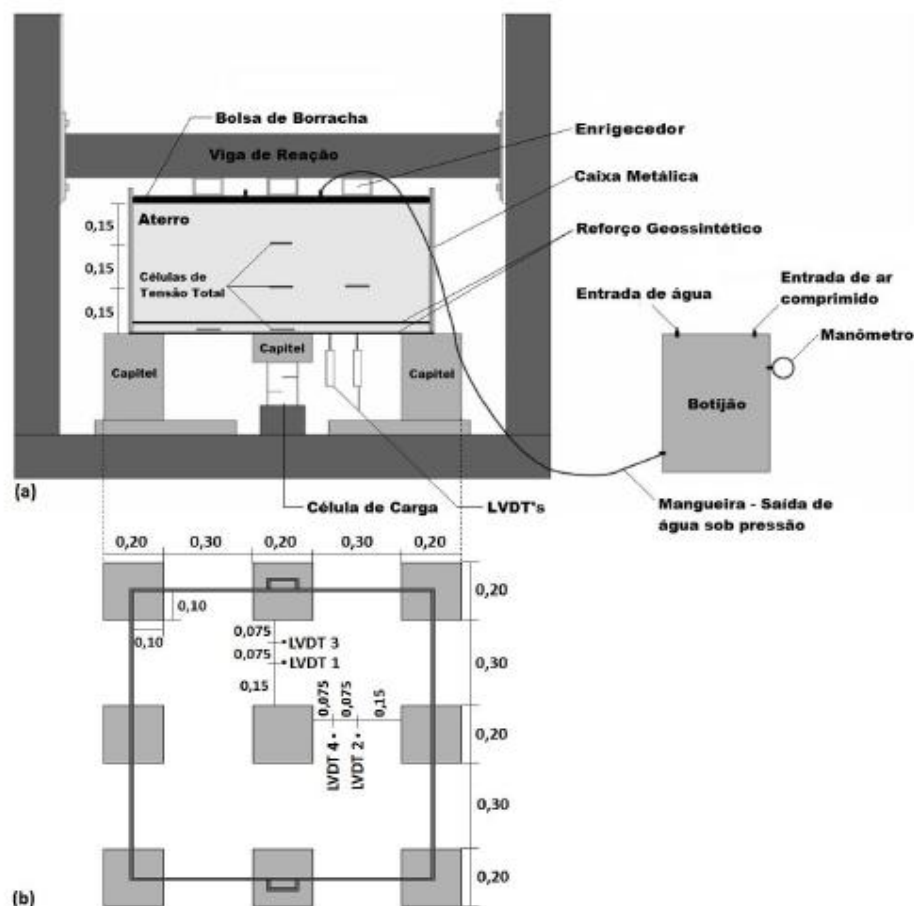


Figura 4.1 - Equipamento montado com seus elementos e instrumentos posicionados adequadamente: (a) Corte transversal; (b) Geometria em planta. - Dimensões em metros – (Melchior Filho, 2022).

O modelo físico reduzido desenvolvido por Melchior Filho (2022) foi idealizado em escala 1:5 e sob condições normais de gravidade, devido a fatores como redução de custos, agilidade na execução dos ensaios e maior controle das variáveis analisadas, quando comparado a ensaios em escala real. No entanto, devido à natureza do modelo reduzido, é necessário aplicar um fator de escala para representar adequadamente as situações reais de campo. Esse fator assegura que os valores obtidos sejam proporcionais, incluindo as tensões atuantes e os parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais empregados nos ensaios.

O fator de escala possui valores distintos, dependendo do parâmetro a ser ajustado, conforme apresentado na Tabela 4.1. Para a escala adotada nesta pesquisa (1:5), a relação entre os comprimentos do modelo e do campo é de 1/5, enquanto a relação entre as áreas

é dada por $1/5^2$, ou seja, as áreas do modelo são 25 vezes menores do que as áreas em escala real. Os ensaios com modelo reduzido realizados por Melchior Filho (2022) foram baseados em estudos anteriores disponíveis na literatura, tais como Zaeske (2001), Heitz (2006), Den Boogert (2011) e Fonseca & Palmeira (2018).

Tabela 4.1 – Fatores de Escala (Melchior Filho, 2022)

Parâmetro	Fatores de Escala (Modelo/Campo)
Comprimento	$1/x$
Área	$1/x^2$
Tensão	$1/x$
Força por unidade de comprimento(carga)	$1/x^2$
Rigidez à tração dos elementos de reforço	$1/x^2$
Recalque	$1/x$

Nota: x = fator de escala geométrico

4.1.2 Programa Experimental

Nesta pesquisa, foram utilizados dois tipos de reforços geossintéticos com o objetivo de avaliar a influência da rigidez à tração na eficiência de transmissão de cargas do aterro para os capitéis. Os geossintéticos adotados foram a microgrelha e o geotêxtil, sendo considerado o módulo de rigidez à tração correspondente à deformação de 5% ($J_{5\%}$) para os materiais estudados.

As propriedades dos reforços geossintéticos foram obtidas por meio de ensaios de resistência à tração em faixa larga, realizados conforme as recomendações da norma NBR ISO 10319 (2013). Foram utilizados seis corpos de prova com dimensões de 20 cm × 10 cm para cada direção de trabalho, com uma velocidade de deformação de 20%/min. Os ensaios foram conduzidos em uma prensa de tração do modelo DL2000 – EMIC (Figura 4.2). As gramaturas dos materiais geossintéticos foram determinadas segundo os procedimentos especificados na norma NBR ISO 9864 (2013).

Para o material do aterro, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica conforme as normas DNER–ME 083/98, NBR 12004 (1990), NBR 12051 (1991) e DNER–ME 081/98. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto

de médio porte, utilizando corpos de prova com dimensões de 300 mm × 300 mm × 175 mm (Figura 4.3), conforme a norma ASTM D 3080/98.



Figura 4.2 – Equipamento do ensaio de tração de faixa larga (Melchior Filho, 2022)



Figura 4.3 – Equipamento do Ensaio de Cisalhamento (Melchior Filho, 2022)

4.1.3 Propriedades dos Materiais

4.1.3.1 Geossintéticos

Os tipos de geossintéticos empregados foram a microgrelha e o geotêxtil não tecido. A microgrelha é um material de alta rigidez, composto por poliéster, com baixa fluência, enquanto o geotêxtil não tecido é um material de baixa rigidez, fabricado em polipropileno, com elevada fluência. Ambos os materiais são bidirecionais.

Os geossintéticos selecionados apresentaram valores de $J_{5\%}$ que permitem simular, em escala, os níveis de rigidez à tração dos reforços comumente empregados em obras reais. Vale ressaltar que os reforços adotados no modelo podem ser aplicados em situações práticas: a microgrelha é frequentemente utilizada como elemento de reforço em baixos níveis de carregamento, enquanto o geotêxtil não tecido é comumente empregado como camada de separação e proteção.

Nesta pesquisa, entretanto, ambos os materiais foram utilizados como reforços do modelo reduzido, a fim de simular condições reais de aterros estaqueados, respeitando as devidas escalas de modelagem discutidas anteriormente (Melchior Filho, 2022).

4.1.3.2 Aterro

O solo utilizado para o corpo do aterro foi um pedregulho mal graduado (de graduação uniforme), classificado como GP segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). As normas BS 8006 (2010), EBGE0 (2011) e CUR 226 (2016) recomendam a utilização de material granular até, pelo menos, na camada em que o efeito de arqueamento se desenvolve completamente.

4.1.4 Etapas do Ensaio

Primeiramente as paredes internas da caixa metálica foram lubrificadas com vaselina e filme PVC para reduzir a influência do atrito das paredes com o material granular do aterro. Antes da instalação do elemento de reforço, foram posicionados os LVDT's e a célula de carga. Em seguida, ocorreu a fixação do reforço geossintético na moldura metálica e a instalação do mesmo sobre os capitéis. Para os ensaios com 2 (duas) camadas de reforço, a instalação da segunda camada ocorreu após o preenchimento de 5 cm de altura do aterro, sendo engastada nas laterais internas da caixa metálica. O preenchimento de 45 cm de aterro foi feito em 3 (três) camadas de 15 cm altura. Após o

preenchimento das três camadas de aterro, instalou-se, sobre a superfície, a bolsa de borracha para a aplicação dos carregamentos uniformemente distribuídos, bem como os enrijecedores que conectam a bolsa com o sistema de reação. Aplicou-se, em seguida, pressões de 10, 25 e 40 kPa representando tensões equivalentes na base do aterro às que seriam provocadas por alteamentos de aproximadamente 1, 2 e 3 m.

4.2 Modelo Numérico

Nesta pesquisa, utilizou-se o software de elementos finitos PLAXIS (2023) para a análise de tensões, deformações e deslocamentos em problemas relacionados à engenharia geotécnica. O PLAXIS é amplamente reconhecido pela sua capacidade de gerar malhas automaticamente e modelar comportamentos complexos do solo.

4.2.1 Simulação do Geossintético

4.2.1.1 Modelo Constitutivo do Geossintético

Os geossintéticos utilizados para reforço foram simulados dentro da zona elástica do material, uma vez que o objetivo dos ensaios no modelo físico não era alcançar a ruptura, mas sim compreender o comportamento da distribuição de esforços na estrutura. Dessa forma, a propriedade principal considerada para os geossintéticos foi a rigidez axial (EA), responsável por sustentar as forças de tração.

No software PLAXIS, existe um elemento específico desenvolvido para representar esse comportamento: o elemento do tipo Geogrid. Esse elemento é capaz de simular estruturas delgadas com rigidez axial, porém sem rigidez à flexão, o que permite sustentar forças de tração, mas não de compressão.

O elemento tipo Geogrid apresenta dois graus de liberdade translacionais em cada nó (u_x , u_y). Quando elementos de solo de 15 nós são empregados, cada elemento da geogrelha é definido por 5 nós, enquanto elementos de geogrelha de 3 nós são usados em combinação com elementos de solo de 6 nós. Forças axiais são avaliadas nos pontos de tensão de Newton-Cotes. Esses pontos de tensão coincidem com os nós, de acordo com a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Elemento tipo Geogrid (Manual Plaxis, 2022)

4.2.1.3 Parâmetros Utilizados no Geossintético

O parâmetro utilizado no elemento Geogrid é a rigidez normal elástica (axial) - EA, cujos valores foram obtidos a partir das características fornecidas pelo fabricante e apresentadas na tese de Melchior Filho (2022) é adotado na faixa de 80kN/m a rigidez à 5% de deformação – J5%. Proporcionando uma resistência à tração de 4 kN/m.

4.2.1.2 Elementos de Interface

Elementos de interface também podem ser adicionados para permitir uma modelagem adequada na interação solo-estrutura. Interfaces podem ser usadas para simular, por exemplo, a fina zona de material submetida a tensões cisalhantes, no contato entre uma placa e o solo adjacente. Interfaces podem ser criadas próximas a elementos de placa ou geogrelha ou entre dois polígonos de solo.

A Figura 4.5 mostra como elementos de interface são conectados a elementos de solo. Ao usar elementos de 15 nós, os elementos de interface correspondentes são definidos por cinco pares de nós, enquanto para elementos de solo de 6 nós os elementos de interface correspondentes são definidos por três pares de nós. Na Figura 4.5, os elementos de interface são mostrados como tendo uma espessura finita, mas na formulação de elementos finitos as coordenadas de cada par de nós são idênticas, o que significa que o elemento tem uma espessura zero.

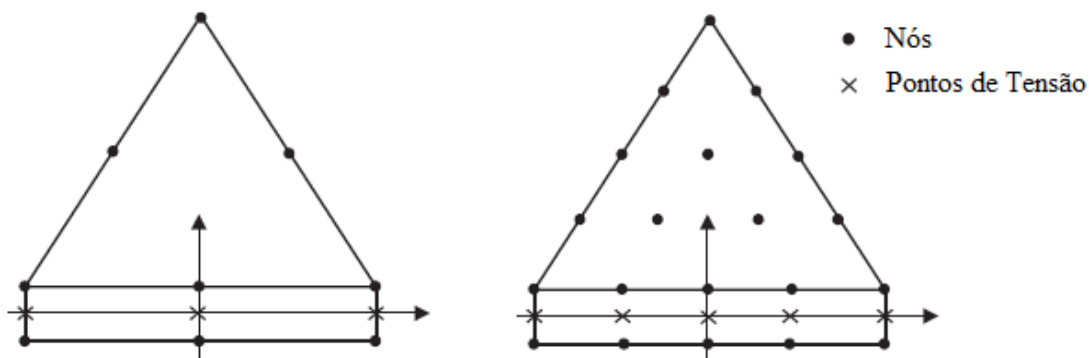


Figura 4.5 - Distribuição de nós e pontos de tensão em elementos de interface e sua conexão com elementos do solo. (Manual Plaxis, 2022)

A Figura 4.6 mostra que problemas de interação solo-estrutura podem envolver pontos que exigem atenção especial. Cantos em estruturas rígidas e uma mudança abrupta na condição de contorno podem levar a altos picos nas tensões e deformações. Elementos de volume não são capazes de reproduzir esses picos agudos e, como resultado, produzirão oscilações de tensão não físicas. Esse problema pode ser resolvido fazendo uso de elementos de interface, conforme mostrado na Figura 4.6.

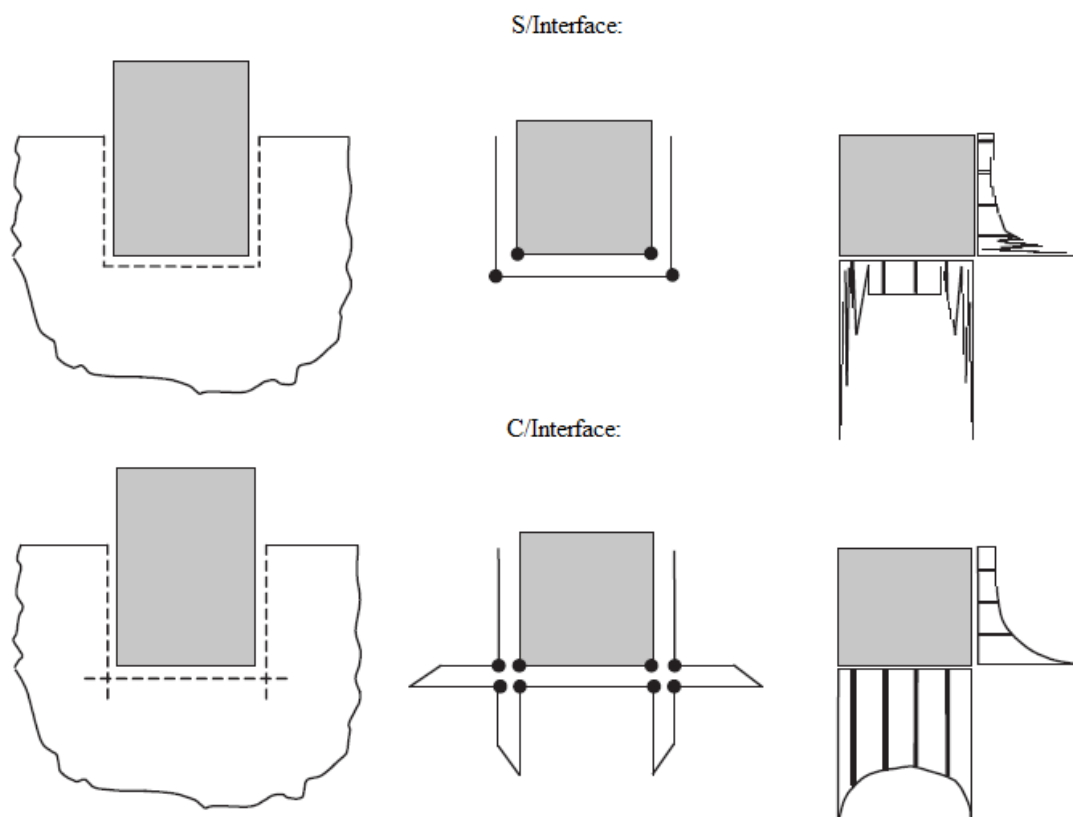


Figura 4.6 - Interação solo-estrutura sem e com interface (Manual Plaxis, 2022)

4.2.2 Simulação do Material do Aterro

4.2.2.1 Modelo Constitutivo

Para a simulação do material do aterro e do solo foi utilizado o modelo Hardening Soil (Schanz et al., 1999; Brinkgreve et al., 2015), pois é capaz de simular o comportamento de vários tipos de solos, tanto os coesivos como granulares. Reformula o modelo constitutivo hiperbólico com fundamentação na teoria da plasticidade e apresenta o desenvolvimento de dilatância (mobilizada antes de alcançar a ruptura). É um modelo com endurecimento isotrópico que reproduz com maior precisão o comportamento elasto-plástico. O critério de ruptura é o Mohr-Coulomb. Quando o solo é submetido a uma tensão desviadora primária este mostra uma redução no seu módulo de rigidez e desenvolve uma deformação plástica irreversível, endurecimento por cisalhamento. Quando o solo é sujeito a uma carga odométrica ou isotrópica este desenvolve deformações plásticas irreversíveis, endurecimento por compressão. Os parâmetros que precisam ser definidos para aplicação deste modelo constitutivo estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros para o Modelo Hardening Soil (Manual Plaxis, 2022)

	γ	kN/m ³	Peso Específico Aparente Seco	
Resistência	c	kPa	Coesão	
	ϕ	°	Ângulo de Atrito Interno	
	ψ	°	Ângulo de Dilatância	
Rigidez	E_{50}^{ref}	kPa	Módulo de rigidez secante de carregamento primário de referência	
	E_{ur}^{ref}	kPa	Módulo de rigidez de carregamento/descarregamento de referência	
	E_{eod}^{ref}	kPa	Módulo de rigidez odométrico de referência	
	m		Dependência da rigidez com o estado de tensão do solo	≈ 1 p/argila $\approx 0,5$ p/areia
Avançados	ν_{ur}		Coeficiente de Poisson (carregamento/descarregamento)	$\approx 0,2$
	p'_{ref}	kPa	Tensão de Referência	=100
	K_0^{nc}		Coeficiente de pressão lateral dos solos normalmente adensado	=1-sen(ϕ)
	R_f		Razão de ruptura, q_f / q_a	= 0,9

A respeito do peso específico do solo não é um parâmetro de resistência propriamente dito, mas está indiretamente relacionado à resistência do solo. O peso específico influencia a resistência do solo porque está relacionado à compactação e ao estado de tensões dentro do maciço. Solos mais densos (com maior peso específico seco) tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento devido ao aumento do intertravamento entre partículas. Deste modo o peso específico aparente seco adotado para os ensaios do Melchior Filho (2022) e na simulação numérica foi de $16,0 \text{ kN/m}^3$.

4.2.2.2 Obtenção de Parâmetros

Na etapa de definição das premissas e simplificações necessárias para o desenvolvimento da simulação numérica em 2D, foi utilizado o modelo físico elaborado em laboratório por Melchior Filho (2022). Inicialmente, foram propostos parâmetros para o modelo *Hardening Soil Model* (HSM), com base em ensaios laboratoriais e resultados publicados na literatura. A calibração dos parâmetros do material do aterro no modelo HSM foi realizada por meio de uma simulação explícita do ensaio de cisalhamento, seguindo as dimensões de $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$, conforme a norma ASTM D 3080/98. Na Figura 4.9, é apresentada a imagem do ensaio realizado no laboratório.



(a)



(b)

Figura 4.7 - Equipamento de cisalhamento direto: (a) preparação do ensaio; (b) após o cisalhamento do material de aterro. (Melchior Filho, 2022)

O ensaio de cisalhamento direto tem como principal objetivo a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, sendo particularmente recomendado para solos granulares. Trata-se de um ensaio relativamente simples e de baixo custo, amplamente utilizado em investigações geotécnicas. Após a preparação da amostra e a montagem do equipamento, o ensaio é conduzido em uma caixa metálica bipartida ao longo do plano horizontal. Inicialmente, a amostra passa por uma etapa de consolidação, durante a qual é aplicada uma força normal para atingir a pressão normal estipulada. Em seguida, uma força tangencial é aplicada, promovendo o deslocamento relativo das duas metades da caixa em direções opostas, a uma taxa de deformação constante, até a ruptura ocorrer ao longo do plano de cisalhamento, de acordo com a Figura 4.8. Durante o ensaio, são registrados os deslocamentos horizontal e vertical da amostra.

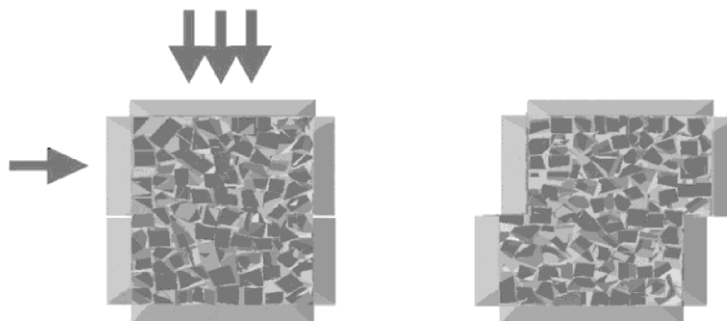
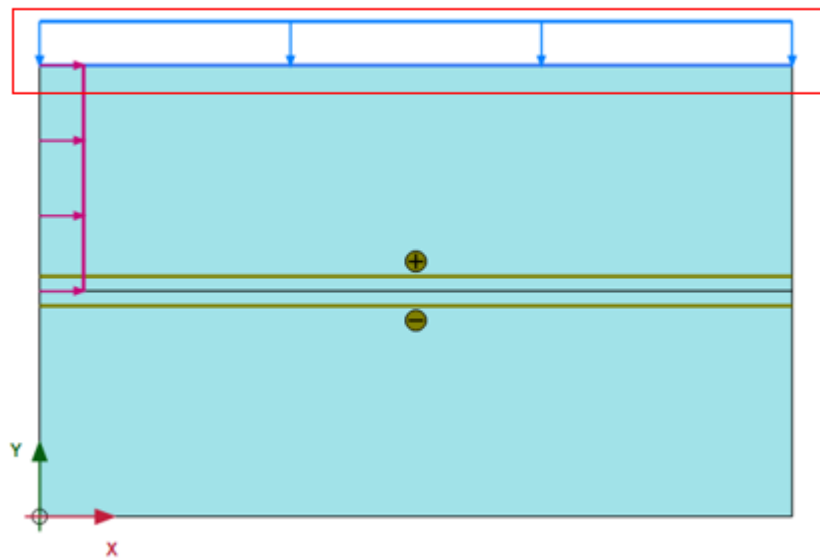


Figura 4.8 – Representação Esquemática do Ensaio de Cisalhamento Direto

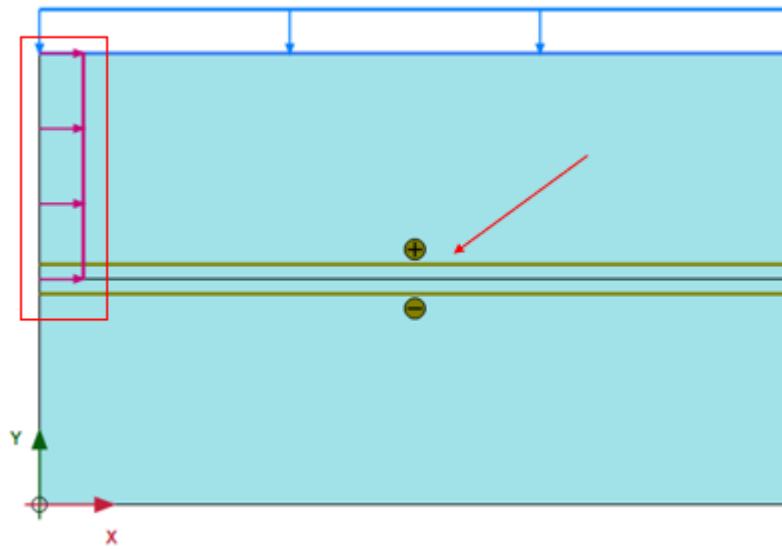
Para a simulação numérica do ensaio de cisalhamento direto, adotou-se o estado plano de tensões e condições de contorno semelhantes às do ensaio laboratorial. Na primeira etapa (Figura 4.9 a), correspondente à fase de consolidação, os movimentos horizontais foram restringidos, permitindo apenas o deslocamento vertical, simulando o adensamento do material. Em seguida (Figura 4.9 b), a interface foi ativada para representar o atrito entre partículas, e as condições de contorno da base foram fixadas. Diferentemente do ensaio físico, onde uma força tangencial é aplicada, na simulação foram impostos deslocamentos equivalentes à força tangencial laboratorialmente aplicada, permitindo a livre movimentação lateral das fronteiras superiores. Os gráficos resultantes, como o de Força Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (Figura 4.10 a) e o de Variação Volumétrica (Figura 4.10 b), demonstraram coerência com os ensaios experimentais, validando a metodologia adotada.

Etapa 1 :



(a)

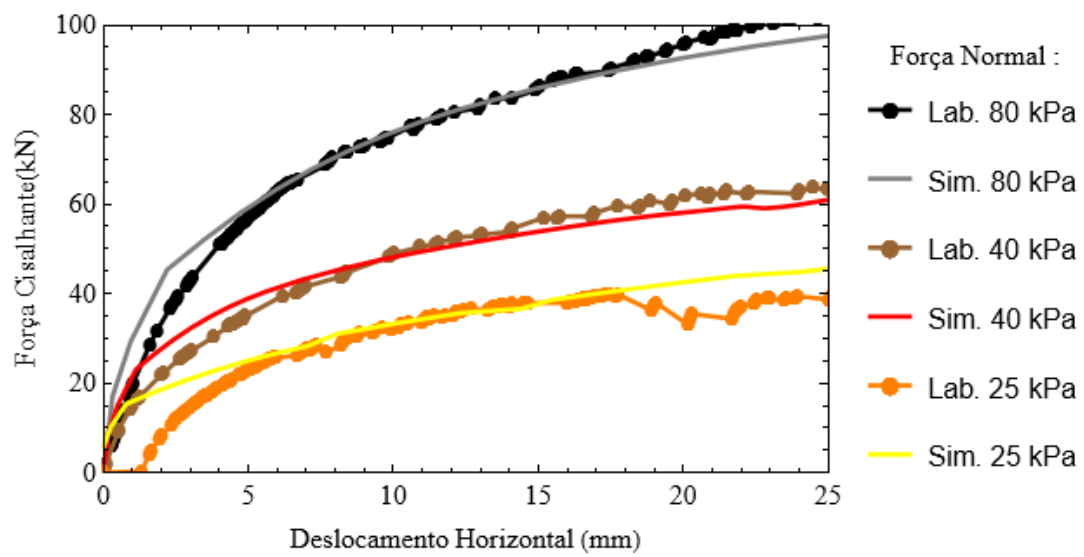
Etapa 2 :



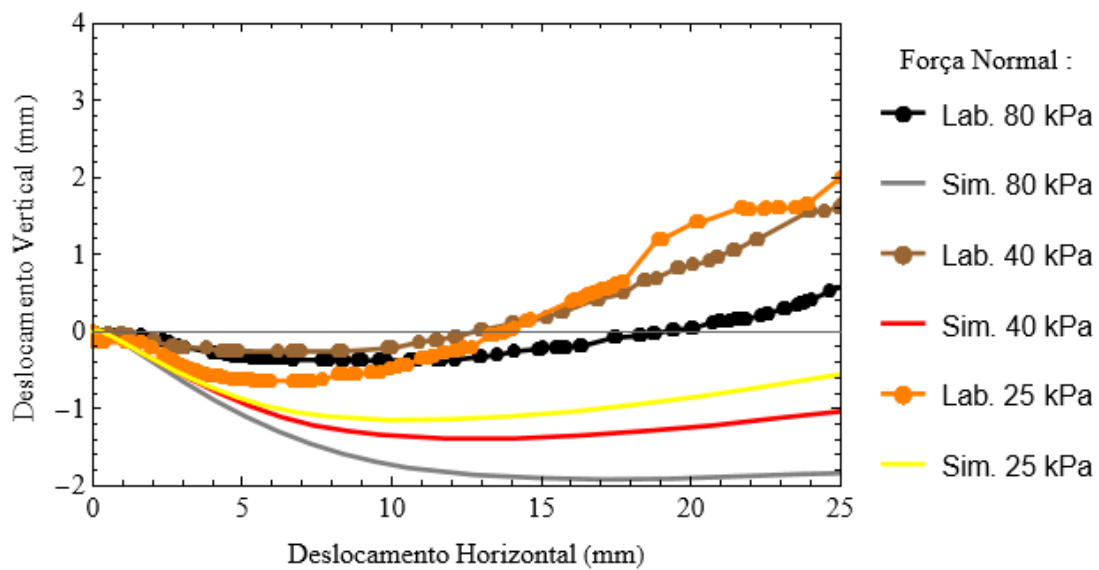
(b)

Figura 4.9 - Ensaio de Cisalhamento: (a) no laboratório, (b) simulação numérica.

A simulação numérica representou de maneira considerável o comportamento do material estudado, embora ainda existissem desafios para capturar plenamente fenômenos como a dilatância. A aplicação do modelo HSM demonstrou uma melhoria significativa na representação do comportamento observado em laboratório. Para o geossintético, adotou um modelo elástico, utilizando parâmetros de rigidez normal elástica com base nos ensaios laboratoriais realizados por Melchior Filho (2022).



(a)



(b)

Figura 4.10 - Ensaio de Cisalhamento em laboratório e modelagem numérica : (a) Tensão Cisalhante por Deslocamento Horizontal e (b) Variação Volumétrica

O objetivo desta simulação é calibrar o modelo constitutivo do aterro, garantindo que ele represente de forma mais realista o comportamento do solo analisado em

laboratório. Nesse contexto, a obtenção dos parâmetros para a simulação numérica seguiu as seguintes etapas:

1. Definição dos dados de entrada – Foram adotados os parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais, como peso específico e resistência ao cisalhamento, conforme os valores apresentados por Melchior Filho(2022).

2. Execução da simulação – O modelo numérico foi rodado e seus resultados comparados aos obtidos experimentalmente.

3. Ajuste dos parâmetros – Por meio de um processo iterativo de retroanálise, os parâmetros do modelo (módulo de rigidez, coesão, ângulo de atrito e dilatância) foram ajustados progressivamente até que a simulação reproduzisse com maior precisão os resultados experimentais.

Os parâmetros de rigidez foram inicialmente definidos com base em referências da literatura e refinados ao longo do processo de calibração. O parâmetro de dilatância também foi ajustado durante a simulação, assegurando que a resposta do modelo estivesse alinhada com o comportamento do solo. Os parâmetros avançados do modelo seguiram as recomendações do manual do PLAXIS, com exceção da tensão de referência, que foi ajustada para corresponder ao maior valor de tensão normal adotado no ensaio de cisalhamento laboratorial.

Os parâmetros finais do modelo constitutivo do aterro estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros do Modelo Constitutivo do Aterro

	Peso Específico Aparente Seco	γ	kN/m ³	16,0
Resistência	Coesão	c	kPa	0,1
	Ângulo de Atrito Interno	ϕ	°	43
	Ângulo de Dilatância	ψ	°	10
Rigidez	Módulo de rigidez secante de carregamento primário de referência	E_{50}^{ref}	MPa	10,0
	Módulo de rigidez odométrico de referência	E_{eod}^{ref}	MPa	8,0
	Módulo de rigidez de carregamento/descarregamento de referência	E_{ur}^{ref}	MPa	30,0
	Dependência da rigidez com o estado de tensão do solo	m		0,5
Avançados	Coeficiente de Poisson (carregamento/descarregamento)	ν_{ur}		0,2
	Tensão de Referência	p'_{ref}	kPa	100
	Coeficiente de pressão lateral dos solos	K_0^{nc}		0,32
	Razão de ruptura, q_f/q_a	R_f		0,9

4.2.3 Definição da Malha

O PLAXIS 2D discretiza o meio a partir de elementos triangulares quadráticos de 6 nós com integração numérica em 3 pontos de Gauss ou elementos de 15 nós com integração numérica em 12 pontos de Gauss. A escolha entre elementos de 6 ou 15 nós depende do tipo de análise e da precisão necessária. Ambos os tipos têm aplicações específicas em análises geotécnicas:

1. Elementos de 6 Nós:

- São elementos triangulares quadráticos que oferecem um bom equilíbrio entre precisão e eficiência computacional.
- Adequados para a maioria das análises geotécnicas, especialmente onde a precisão extremamente alta não é crítica.

- Têm uma capacidade melhor de modelar geometrias complexas e variações suaves nas propriedades do material, em comparação com elementos triangulares lineares (3 nós).

2. Elementos de 15 Nós:

- São elementos triangulares de ordem superior, proporcionando maior precisão, especialmente em casos de alta deformação ou onde as tensões variam significativamente.
- Recomendados para análises mais detalhadas e precisas, como em torno de zonas de ruptura, interfaces críticas ou regiões com variações abruptas de material.
- Tendem a ser mais computacionalmente intensivos, exigindo mais tempo de processamento e recursos.

Para este estudo, optou-se pelo uso de elementos de 6 nós devido ao seu equilíbrio entre precisão e eficiência computacional, atendendo adequadamente às necessidades das análises geotécnicas do problema em questão. Essa escolha permite modelar o comportamento do solo de forma precisa sem comprometer a eficiência do processo de simulação, garantindo resultados confiáveis e viáveis dentro dos recursos disponíveis.

4.2.3.1 Condições de Contorno

O modelo numérico representou de maneira simplificada o modelo físico desenvolvido por Melchior Filho (2022), deste modo as condições de contorno e de simetria foram semelhantes. Com as condições de contorno fixas na horizontal e livres na vertical para simular os recalques existentes em um aterro rodoviário. Na elaboração do modelo numérico adotou-se a premissa da equivalência entre capiteis quadrados e capiteis circulares, mantendo a superfície original. Assim, foi realizada a simulação na condição de axissimétrica, conforme ilustrado na Figura 4.11. No modelo também foi colocado um elemento de interface entre o geossintético e o aterro.

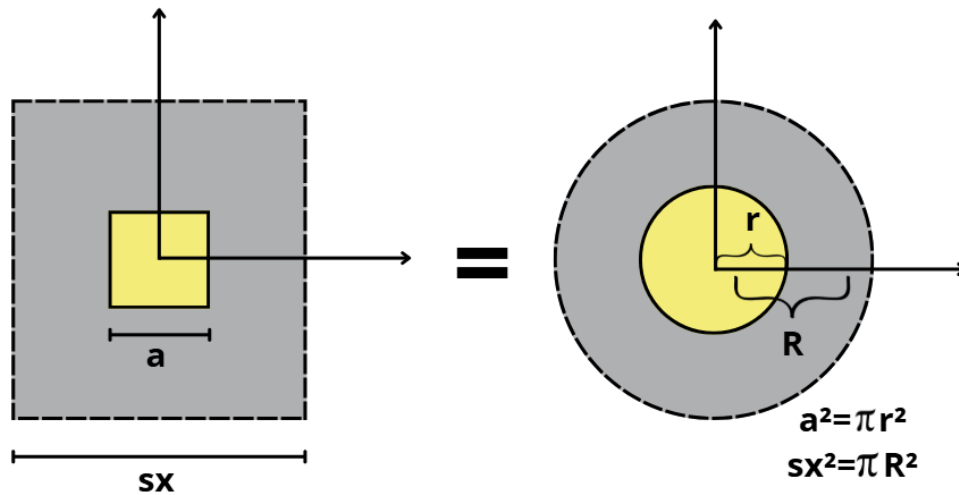


Figura 4.11 - Condições de Contorno Modelo 2D

Na Figura 4.12, é apresentada uma sequência de imagens que ilustra o ciclo completo da investigação, desde o modelo idealizado em campo (protótipo) até a idealização experimental e a simulação numérica. A Figura 4.12(a) mostra a estrutura de um aterro rodoviário, a aplicação prática do conceito, onde o solo compressível é reforçado com estacas. A Figura 4.12(b) apresenta o modelo físico elaborado por Melchior Filho (2022), que realizou os testes controlados para estudar o comportamento do aterro e validar teorias e modelos numéricos. A Figura 4.12(c) exibe o modelo numérico desenvolvido nesta pesquisa, que utiliza os dados experimentais obtidos no laboratório para validar e calibrar simulações, assegurando que as previsões teóricas correspondam ao comportamento real observado no ensaio e, consequentemente, no campo.

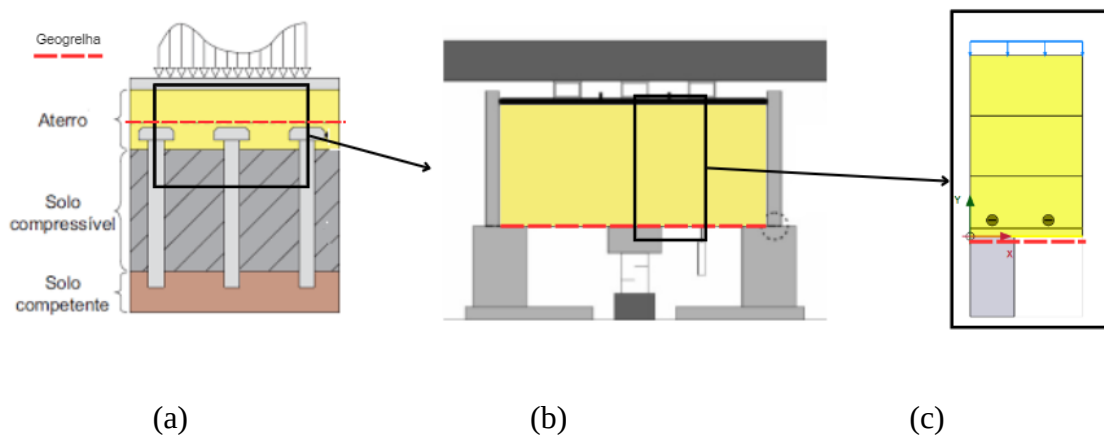


Figura 4.12 – Representação do Modelo Físico e Numérico – Vista Lateral

4.2.3.2 Etapas de Análise

O modelo numérico foi simulado em etapas, semelhante ao modelo físico, apresentando as fases construtivas do aterro com alteamentos de 15 cm. As fases foram denominadas fase 1 (15 cm), fase 2 (30 cm) e fase 3 (45 cm), seguidas pela aplicação de carregamentos na fase 4 (10 kN), fase 5 (25 kN) e fase 6 (40 kN).

Dos dados utilizados por Melchior Filho (2022) foi escolhida a microgrelha como material devido à sua capacidade de resistência à tração em campo, contrastando com o geotêxtil, que é mais voltado para proteção contra danos mecânicos. Para os dados de instrumentação, foram utilizados valores de CC, CTT 1, CTT 2, CTT 3, CTT 5, LVDT 2 e LVDT 4. Medidores de recalques hidráulicos e valores de CTT 4, LVDTs 1 e 3 foram descartados por não apresentarem resultados satisfatórios. A Figura 4.13 apresenta a localização das instrumentações aplicadas em laboratório, e de modo semelhante na simulação.

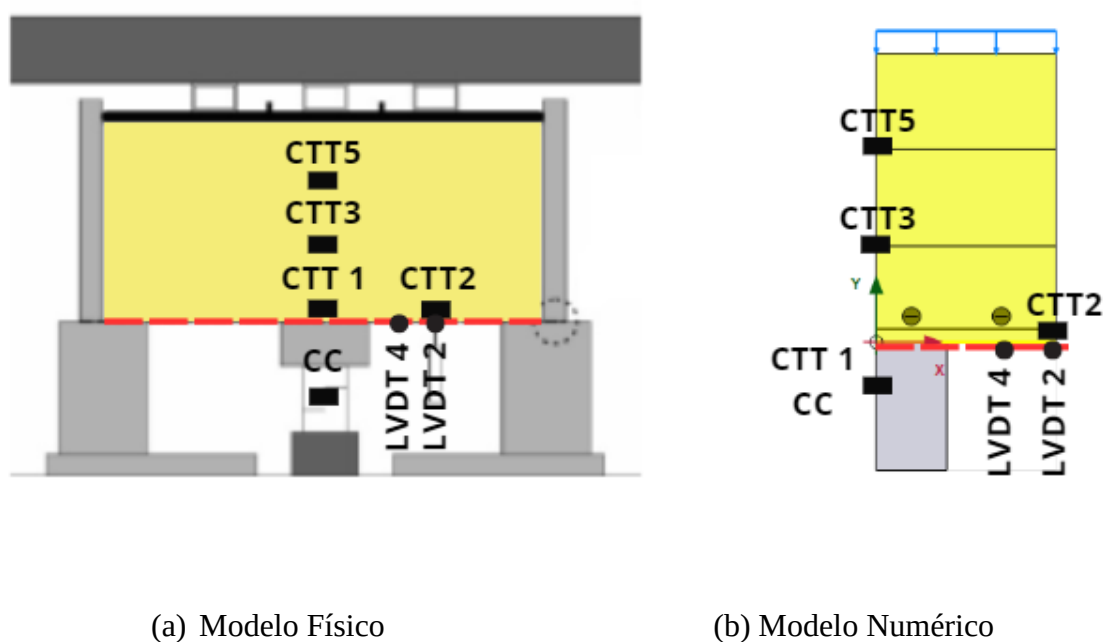


Figura 4.13 – Detalhamento da Instrumentação

4.2.3.3 Análise de Sensibilidade da Malha

A análise de sensibilidade da malha é uma técnica usada para avaliar a precisão e a confiabilidade dos resultados de simulações numéricas que envolvem malhas discretas.

A malha é a subdivisão do domínio de estudo em elementos menores nos quais as equações governantes são resolvidas.

Esta análise é realizada com o objetivo de verificar se a precisão dos resultados melhora ou estabiliza quando se aumenta a resolução da malha, ou se a malha escolhida é adequada para capturar os fenômenos físicos de interesse.

Deste modo, simulações foram realizadas usando diferentes refinamentos de malha, começando por malhas mais grosseiras (com menos elementos) e assim partindo para malhas mais finas (com mais elementos).

A análise de sensibilidade da malha foi conduzida com o objetivo de verificar a influência do refinamento da malha nos resultados numéricos obtidos, sobretudo nos deslocamentos verticais máximos. Foram testadas diferentes discretizações para dois casos de carregamento, denominados Caso A e Caso B, cujas geometrias são ilustradas na Figura 4.14 e Figura 4.15. A Figura 4.16 e Figura 4.17 mostram, respectivamente, os gráficos de deslocamento em função do número de nós para cada caso. Pode-se observar que, à medida que o número de nós aumenta, os deslocamentos tendem a se estabilizar, caracterizando a convergência da solução.

No Caso A (Figura 4.16), nota-se que a convergência ocorre de forma mais precoce, com valores de deslocamento praticamente constantes a partir de 2000 nós. Esse comportamento sugere que, nesse cenário, o refinamento da malha exerce menor impacto sobre a distribuição de tensões e deformações, indicando que a geometria e as condições de contorno produzem um regime de resposta relativamente suave, no qual pequenas variações na discretização não alteram significativamente os resultados.

Já no Caso B (Figura 4.17), observa-se uma convergência mais tardia, exigindo uma malha com pelo menos 4000 nós para estabilização dos deslocamentos. Esse comportamento é coerente com a presença de regiões com maior concentração de tensões e possível plastificação de elementos, o que demanda um refinamento mais acentuado para captura adequada dos gradientes de deformação. Isso é reforçado pelas imagens de malha representadas nas Figura 4.14 e 4.15, onde se vê claramente a diferença no nível de refinamento entre os modelos utilizados na análise de sensibilidade.

Assim, com base nos resultados obtidos, adotou-se uma malha com no mínimo 4000 nós para todas as simulações subsequentes, de modo a garantir a convergência da solução e a precisão necessária nos deslocamentos para ambos os casos. Tal escolha

representa um equilíbrio entre a confiabilidade dos resultados e o custo computacional. Por fim, destaca-se que a sensibilidade à malha parece estar associada a diferentes fatores em cada caso analisado: enquanto no Caso A a precisão está mais ligada ao cálculo dos deslocamentos em regime elástico, no Caso B a influência da plastificação dos elementos exige maior refinamento para representação acurada do comportamento não linear do sistema.

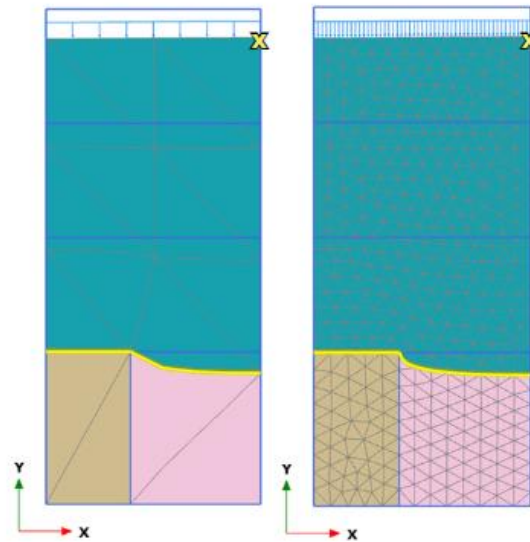


Figura 4.14 – Estudo do Caso A

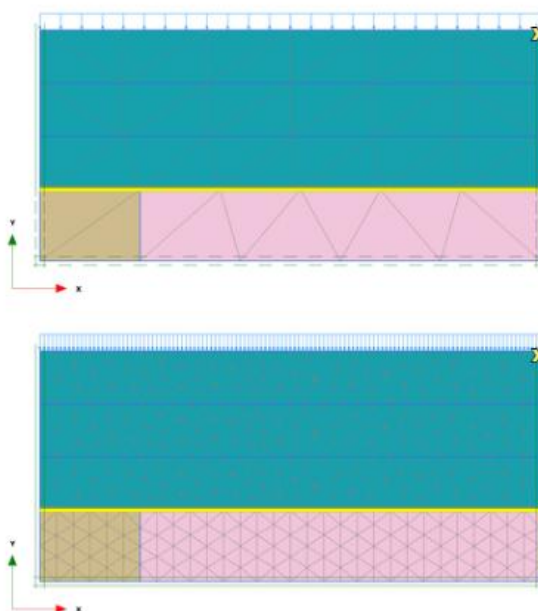


Figura 4.15 – Estudo do Caso B

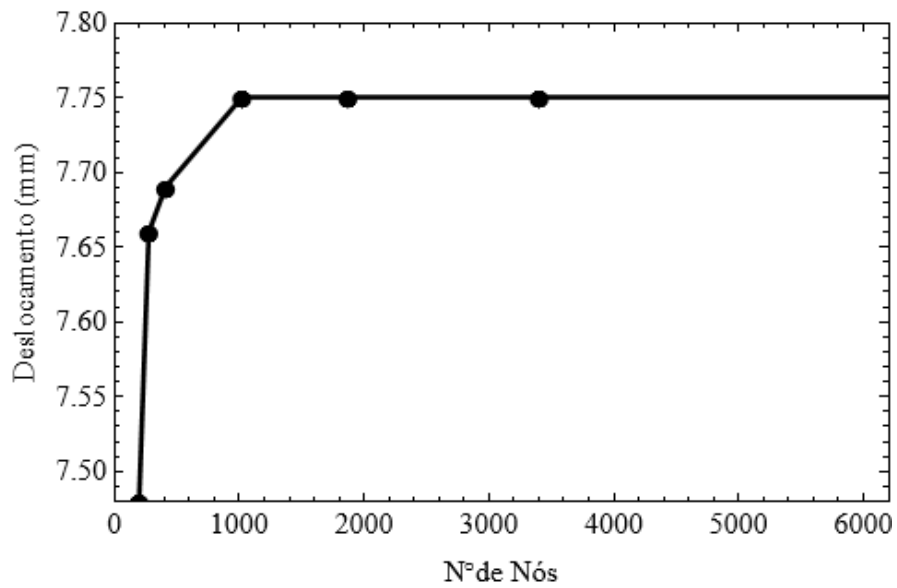


Figura 4.16 – Análise de Sensibilidade da Malha - Caso A

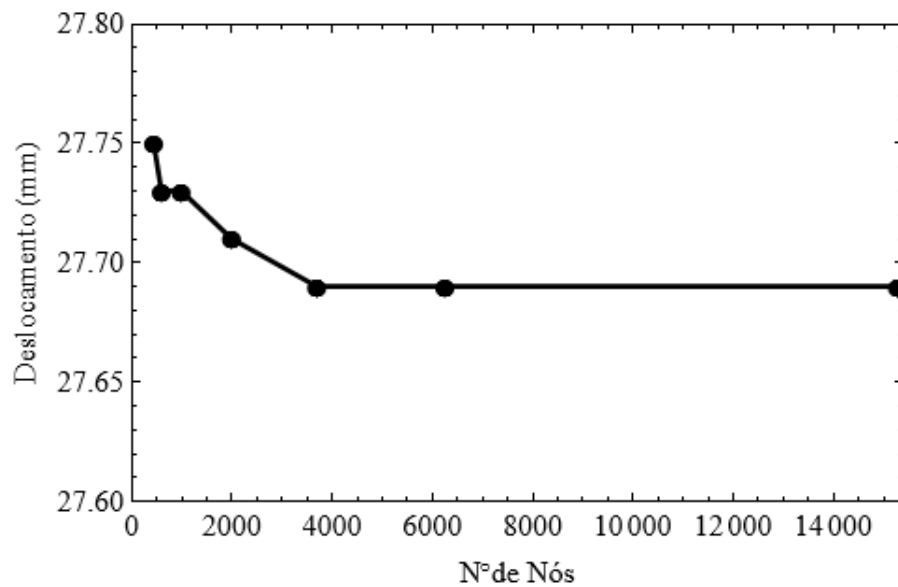


Figura 4.17 – Análise de Sensibilidade da Malha - Caso B

A análise de sensibilidade da malha é uma etapa crítica na validação de simulações numéricas. Ela ajuda a garantir que os resultados sejam precisos e robustos, independente da discretização espacial utilizada na malha. Isso aumenta a confiança nas previsões feitas com base em modelos numéricos.

4.2.4 Análise Paramétrica Normativa

4.2.4.1 Cálculos Analíticos em Wolfram Mathematica

Os cálculos referentes aos métodos analíticos para o dimensionamento de aterros estaqueados e reforçados foram realizados por meio do software Wolfram Mathematica. Trata-se de uma ferramenta avançada, amplamente utilizada para: cálculos matemáticos, modelagem, análise de dados, simulações, programação e visualização. Desenvolvido pela Wolfram Research, fundada por Stephen Wolfram, o software é amplamente empregado em áreas científicas e educacionais, de engenharia e pesquisa.

O Wolfram Mathematica se destaca pela capacidade de realizar cálculos algébricos e matemáticos exatos, bem como aproximações numéricas, além de oferecer visualização gráfica avançada, incluindo gráficos 2D e 3D, histogramas e visualizações interativas.

Nesta pesquisa, foi desenvolvido um programa específico na linguagem Wolfram Mathematica, com o objetivo de realizar os cálculos necessários, gerar gráficos e promover análises comparativas entre os métodos analíticos descritos nas seguintes normativas (detalhados no item 3.2 deste trabalho):

- Norma Britânica (BS 8006, 2010) – BS;
- Diretriz Alemã (EBGEO, 2011) – EBGEO;
- Norma de Projeto Holandesa (CUR 226, 2016) – CA.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados provenientes dos ensaios do modelo físico e numérico, permitindo uma análise abrangente e fundamentada.

4.2.4.2 Casos de Análise

O programa desenvolvido teve como objetivo analisar a resposta de cada método de dimensionamento normativo, avaliando a sua proximidade com os resultados obtidos em laboratório e por meio de simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Para isso, foram realizadas análises paramétricas a fim de investigar a influência de diferentes variáveis do material e geométricas presentes no processo de dimensionamento normativo, a saber:

- Peso específico aparente do aterro;
- Ângulo de atrito do aterro;
- Espaçamento e diâmetro das estacas.

5. RESULTADOS

Este Capítulo contém os resultados referentes às simulações numéricas, as análises paramétricas dos modelos analíticos e as comparações dos modelos físico, numérico e analítico desenvolvidos nesta pesquisa.

5.1 Simulação Numérica do Modelo Físico

5.1.1 Tensões no Interior do Aterro

Assim como os ensaios realizados no modelo físico, as condições foram também simuladas no modelo numérico. Com a calibração dos parâmetros constitutivos dos materiais, os valores obtidos foram comparados com o objetivo de observar o comportamento do sistema. Para aprofundar a análise, foi realizada uma regressão estatística, permitindo avaliar as relações entre os resultados experimentais e numéricos.

Os resultados mostram a relação entre a tensão vertical (σ) em função da razão da altura do aterro com a distância entre as estacas (H/d), obtidas por meio das células de tensão localizadas na região acima do capitel central em cada camada de compactação: CTT 1 (Figura 5.1), CTT 2 (Figura 5.2), CTT 3 (Figura 5.3) e CTT 5 (Figura 5.4). Essas medições permitiram uma análise detalhada do comportamento das tensões em diferentes níveis, proporcionando uma base robusta para a validação do modelo numérico.

O valor de H foi definido, como:

$$H = h + \frac{P}{\gamma}$$

onde h é a altura do aterro no modelo (0,15, 0,30 e 0,45 m), P a sobrecarga aplicada na superfície do aterro (10, 25 e 40 kPa) e γ o peso específico do aterro (16 kN/m³)

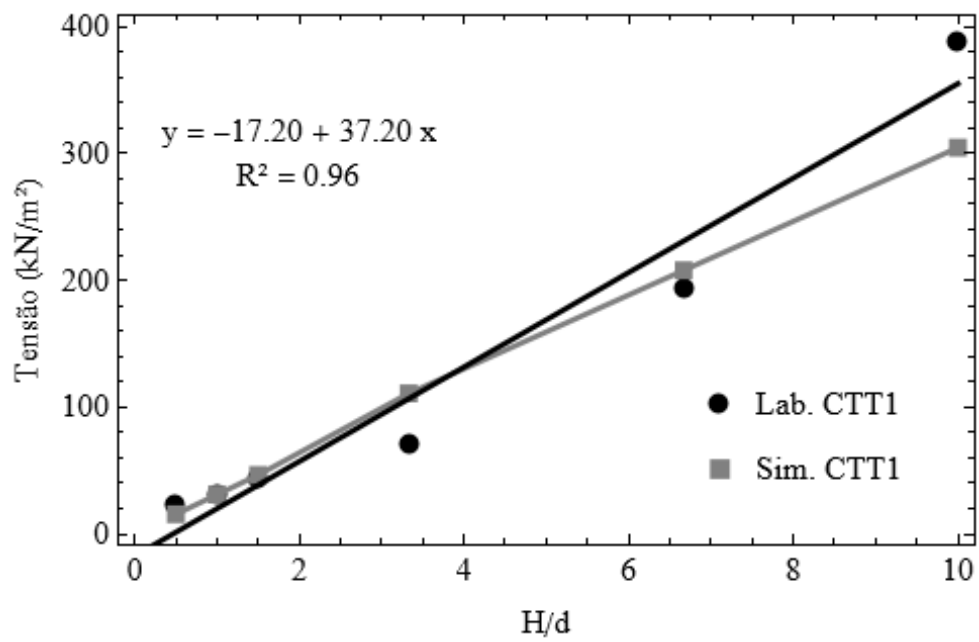


Figura 5.1- Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT1

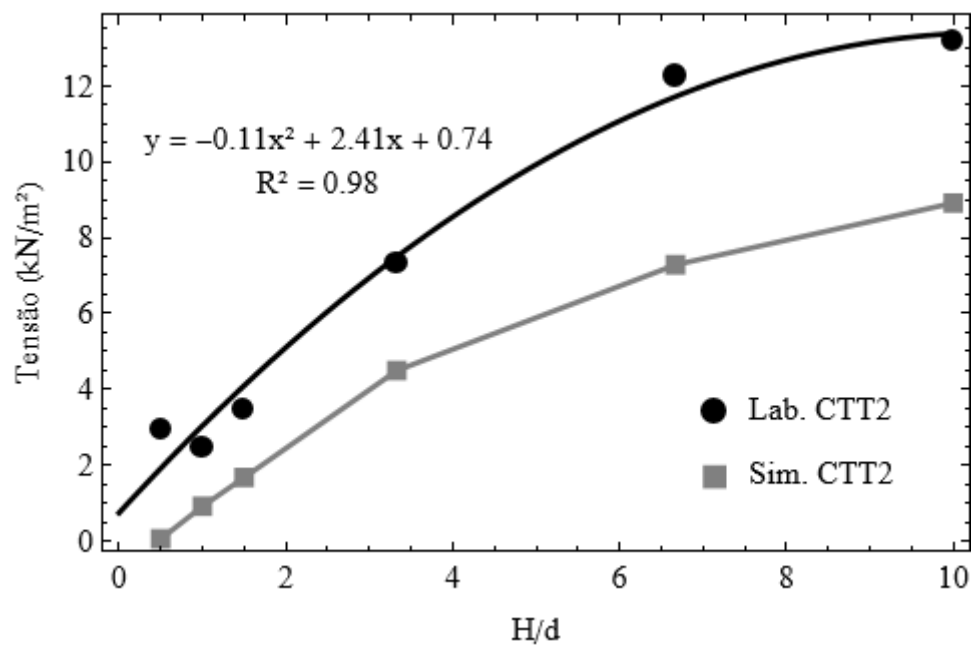


Figura 5.2 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT2

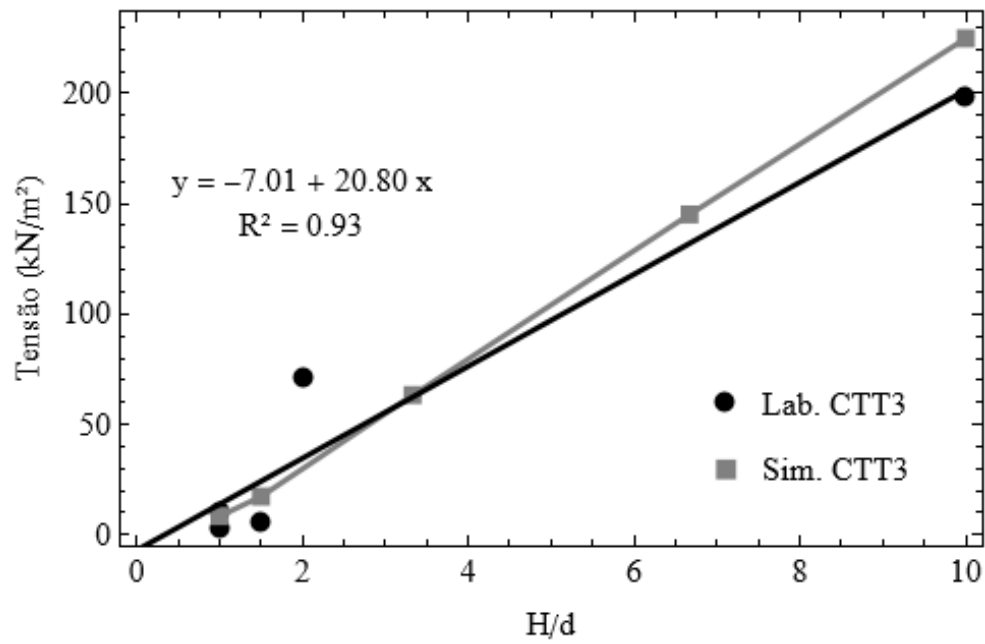


Figura 5.3 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT3

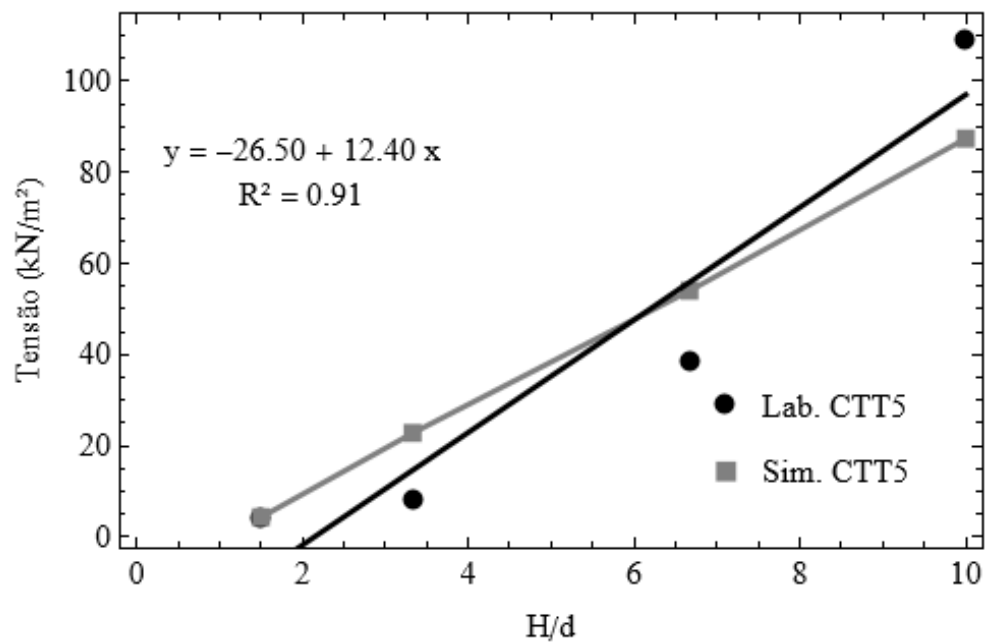


Figura 5.4 - Resultado da Simulação Numérica da Célula de Carga CTT5

5.1.2 Carga na Cabeça da Estaca

A análise da concentração de forças na cabeça da estaca é fundamental para verificar a ocorrência do efeito de arqueamento, permitindo avaliar o nível de carga que está sendo concentrado nessa região. A tendência observada é o aumento na concentração

de forças na cabeça das estacas, o que evidencia o cumprimento da função principal desse tipo de estrutura: aliviar as tensões sobre os solos de baixa resistência.

Na Figura 5.5, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas e dados laboratoriais, permitindo uma comparação detalhada entre os métodos e validando o comportamento esperado do sistema.

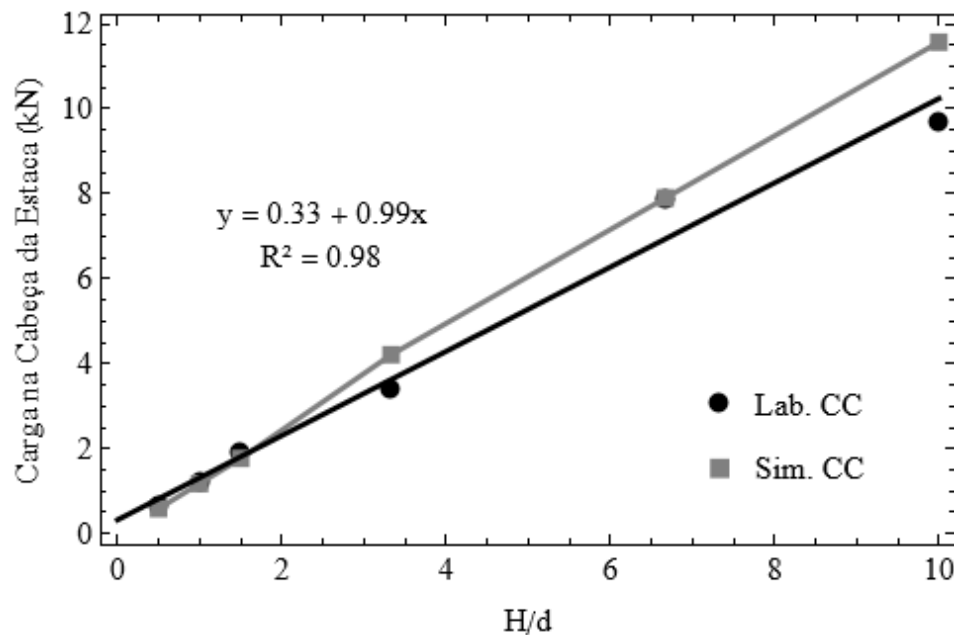


Figura 5.5 - Resultado da Simulação Numérica da Carga na Cabeça da Estaca

5.1.3 Deslocamentos Verticais

A mensuração dos deslocamentos verticais desempenha um papel crucial na compreensão do efeito de membrana, permitindo avaliar como o material geossintético se comporta ao longo das diferentes etapas do processo construtivo e durante sua utilização. Este tipo de análise é essencial para compreender a interação entre o reforço e o material de aterro, bem como a redistribuição de cargas ao longo da estrutura.

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados da simulação numérica, que reproduzem o comportamento observado nos ensaios laboratoriais, fornecendo uma validação cruzada dos dados obtidos e permitindo uma análise detalhada do desempenho do sistema.

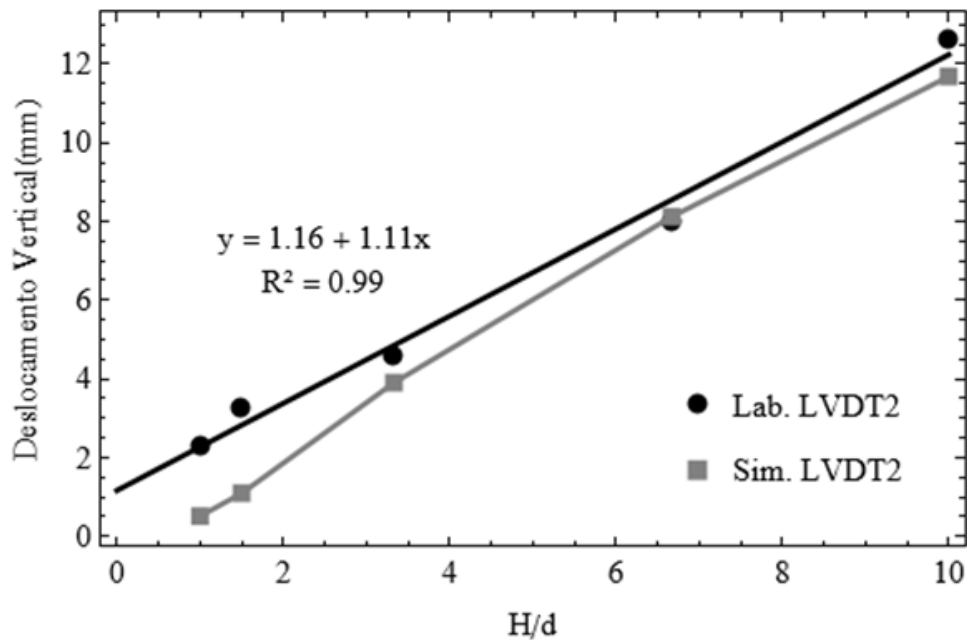


Figura 5.6 – Resultado da Simulação Numérica do LVDT2

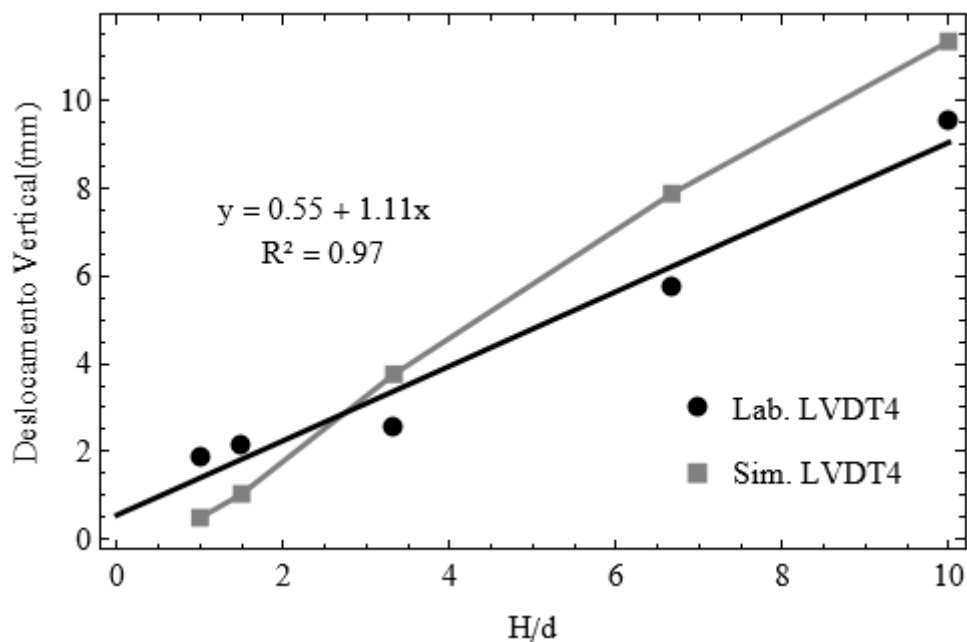


Figura 5.7 – Resultado da Simulação Numérica do LVDT4

5.1.4 Análise do Efeito de Arqueamento

Foi realizada uma análise considerando a presença de uma camada de solo na simulação numérica. Este estudo enfoca o comportamento do aterro estaqueado em relação à transferência de carga que ocorre na camada granular do aterro. Ou seja, o foco desta pesquisa não leva em consideração a capacidade de reação do solo, assim como no dimensionamento do método britânico, permitindo uma comparação igualitária dos métodos normativos.

Entretanto o solo tem uma capacidade de reação, mesmo que mínima ao qual influência na eficiência da redistribuição de tensões pelo efeito do arqueamento. Deste modo demonstra a importância da presença do reforço no auxílio das redistribuições de tensões.

A Normativa Holandesa (CA) e a Recomendação Alemã (EBGEO) apresentam um módulo de reação de subleito (k_s) em seus cálculos, que representa uma estimativa da capacidade de reação do solo. Esse módulo é obtido pela razão entre o módulo de elasticidade (E) do solo e a espessura da camada do subleito, considerando que ele é homogêneo. Quando se trata de um material com diversas camadas com diferentes módulos de elasticidade, essa razão deve ser calculada por meio de uma divisão ponderada das espessuras.

De acordo com Coduto *et al* (1994) o módulo de elasticidade (E) do solo mole varia de 1,5 MPa a 10 MPa. Deste modo, a Figura 5.8 mostra graficamente a relação entre a tensão vertical (σ em kN/m²) na cabeça da estaca em função de H/d , para diferentes valores do módulo de reação do subleito(k_s). Neste gráfico, é possível observar que:

- A linha marrom tracejada ($k_s = 0$ MPa/m) representa uma condição teórica onde não há a presença do solo, caracterizando o caso extremo de eficiência máxima do aterro estaqueado reforçado. A tensão aumenta linearmente com a altura do aterro. Esse é o caso desenvolvido em laboratório por Melchior Filho (2022) e estudado nesta pesquisa.
- Os pontos roxos ($k_s = 1,25$ MPa/m) indicam um material com baixa rigidez. A tensão também aumenta com a altura do aterro, mas os valores são próximos, porém ainda menores em comparação ao caso teórico ($k_s = 0$ MPa/m). Entretanto, para os casos extremos de simulação numérica na análise de eficiência, fez-se necessário o acréscimo dessa camada de solo mole.
- Os pontos verdes ($k_s = 7,5$ MPa/m) representam um material formado por solo mole, de acordo com o Coduto *et al* (1994). Os valores de tensão são mais baixos que nos casos anteriores, indicando que o material adsorve maior carga ao aumentar a altura do aterro.
- Os pontos rosas ($k_s = 50$ MPa/m) representa a faixa máxima de rigidez que um solo mole pode apresentar de acordo com a literatura (Coduto *et al*,1994).

Portanto o gráfico demonstra como a tensão vertical na cabeça da estaca muda sua magnitude em função de k_s . Em resumo, este gráfico é útil para entender como a rigidez de um material, representada pelo módulo de elasticidade e sua espessura, afeta a distribuição de tensões pelo efeito arqueamento. Materiais mais rígidos apresentam menor variação na tensão com a altura do aterro, enquanto materiais mais flexíveis apresentam maior variação. Demonstrando ser um método aplicável para solos moles.

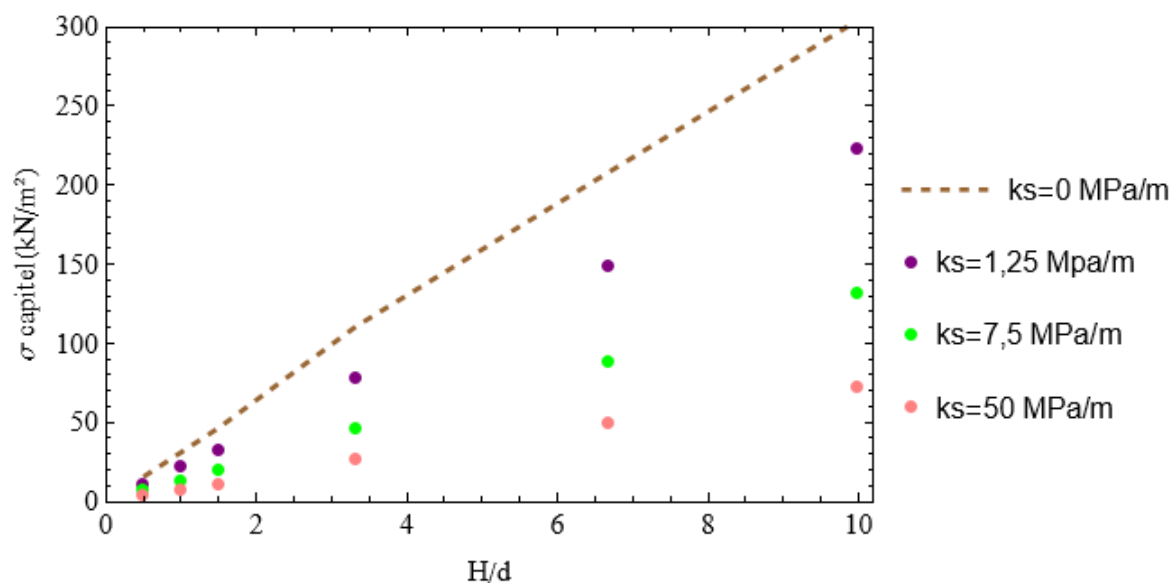


Figura 5.8 – Distribuição de tensão na cabeça da estaca para diferentes valores do módulo de reação do subleito(k_s).

No modelo numérico axissimétrico 2D, desenvolvido com base no modelo físico reduzido de Melchior Filho (2022), é possível observar graficamente, na Figura 5.9, a distribuição de tensões geradas pelo efeito de arqueamento na cabeça da estaca. Neste modelo, o módulo de reação do subleito não foi considerado.

Outro aspecto importante analisado no efeito de arqueamento são os deslocamentos da estrutura, uma vez que um dos principais objetivos desse tipo de estrutura é minimizar os recalques diferenciais. O reforço geossintético, por meio do efeito de membrana, contribui significativamente para a redução dos deslocamentos. Na Figura 5.10, os deslocamentos, na ordem de 8 milímetros, estão concentrados na parte superior do aterro (representadas em áreas vermelhas), onde a carga aplicada gera compressão significativa. À medida que as tensões são transferidas para as estacas, observa-se uma dissipação lateral, com redução gradual na intensidade das tensões, representada pela transição das cores de vermelho para amarelo, verde e, finalmente, azul nas extremidades inferiores.

Essa visualização é essencial para compreender como a carga aplicada influencia a deformação da estrutura, permitindo ajustes no projeto para mitigar problemas como recalques diferenciais ou falhas estruturais. A Figura 5.11 apresenta os deslocamentos ocorridos no geossintético, enquanto a Figura 5.12 ilustra a contribuição do efeito de membrana no redirecionamento das tensões ao longo do corpo do aterro.

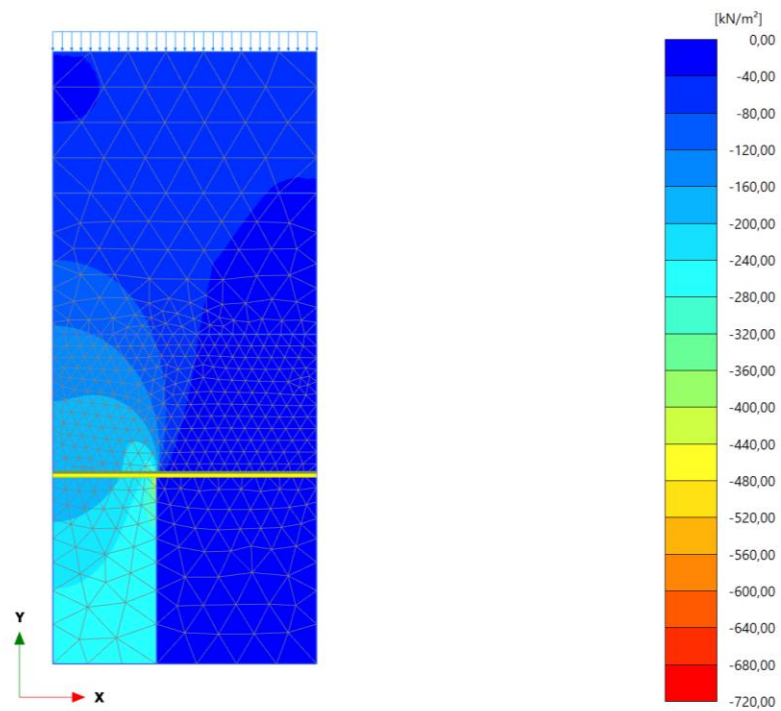


Figura 5.9 – Simulação do Modelo Numérico Axissimétrico 2D das distribuições de tensões

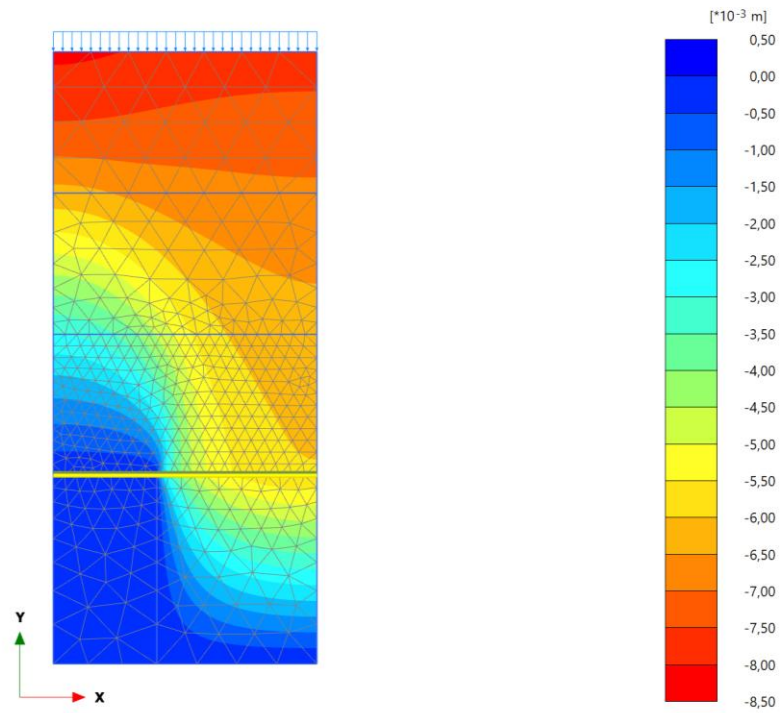


Figura 5.10 – Deslocamentos no corpo do Aterro

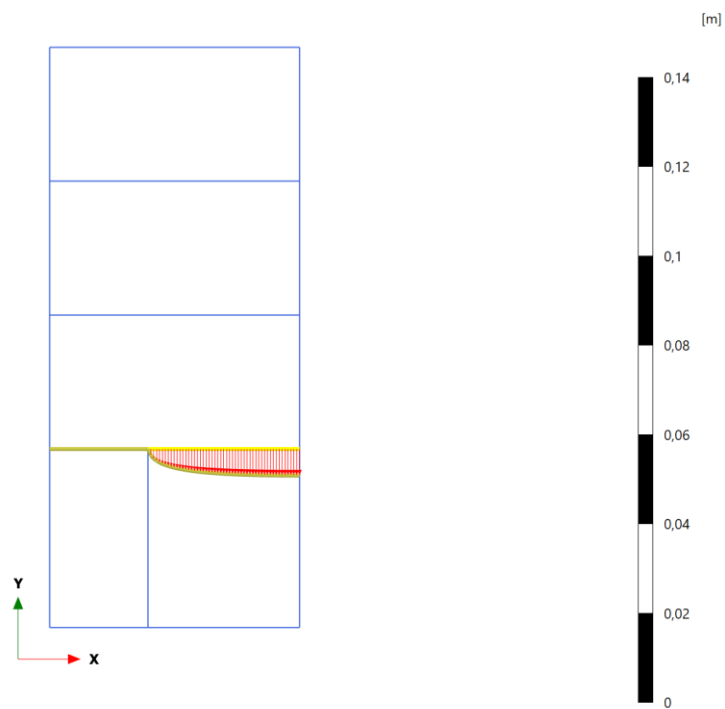


Figura 5.11 – Deslocamento no Geossintético

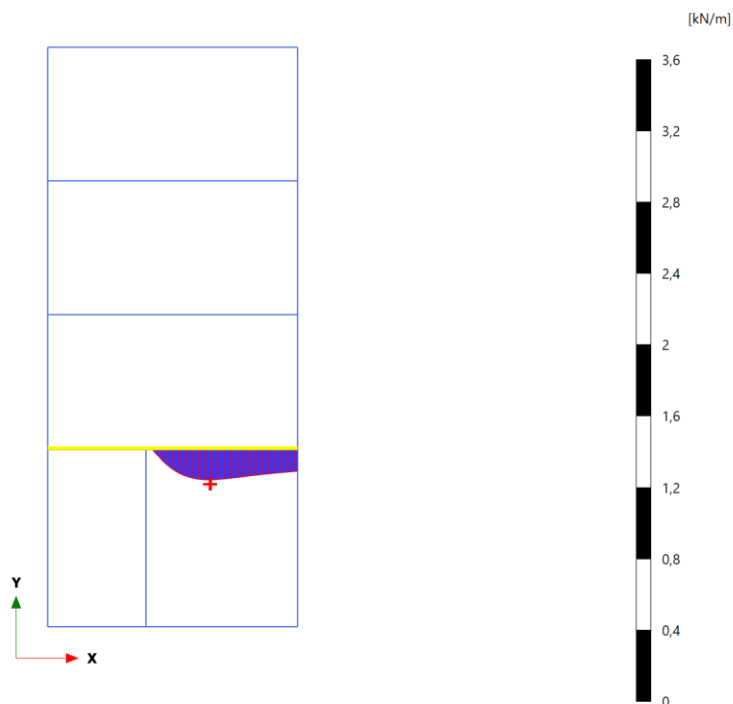


Figura 5.12 - Força Axial atuando no Geossintético

5.2 Análise Paramétrica Normativa

Neste tópico estão os resultados das análises paramétricas de algumas variáveis presentes nos métodos analíticos descritos nas seguintes normativas:

- Norma Britânica (BS 8006, 2010) – BS;
- Diretriz Alemã (EBGEO, 2011) – EBGEO;
- Norma de Projeto Holandesa (CUR 226, 2016) – CA.

5.2.1 Peso Específico Aparente do Aterro

Inicialmente, foi analisada a influência do peso específico do material de aterro sobre o comportamento do efeito de arqueamento e sua relação com o carregamento na cabeça da estaca. As Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam os resultados dessa análise para cada método analítico avaliado, com as seguintes constatações:

- O peso específico demonstrou um comportamento linear, com pequenas variações nos resultados entre diferentes valores.

- O método EBGEO destacou-se por apresentar os valores mais elevados de tensões na cabeça do capitel, sugerindo ser o método com as respostas de tensões mais acentuadas.

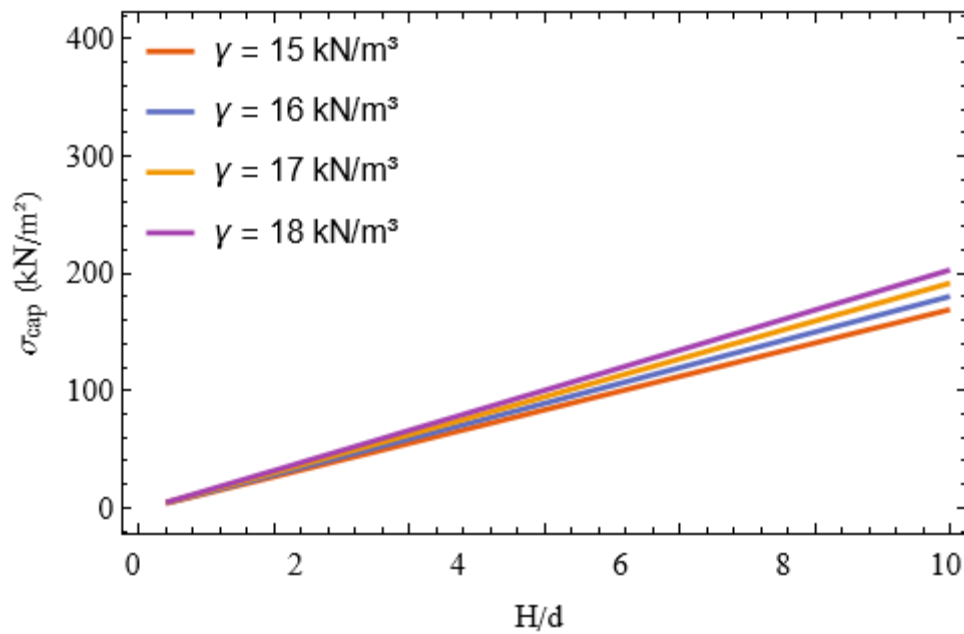


Figura 5.13 – Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico BS 8006 (2010)

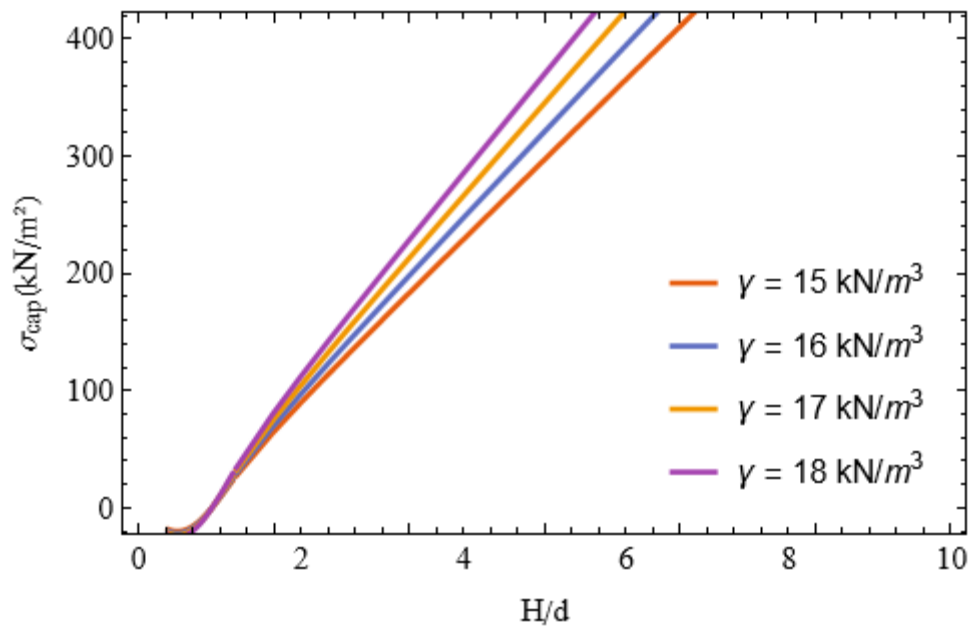


Figura 5.14 - Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico EBGEO (2011)

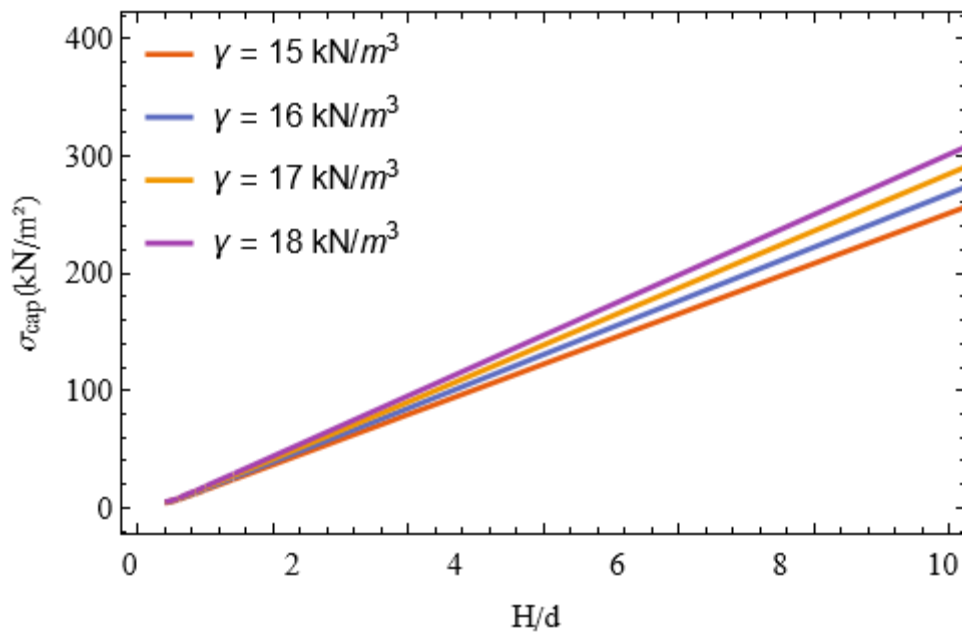


Figura 5.15 - Influência da Variável Peso Específico pelo método analítico CUR 226(2016) - CA

5.2.2 Ângulo de Atrito do Aterro

Outra variável analisada foi a influência do ângulo de atrito do material de aterro sobre o comportamento do efeito de arqueamento e sua relação com o carregamento na cabeça da estaca. As Figura 5.16 e Figura 5.17 apresentam os resultados dessa análise para cada método analítico avaliado, com as seguintes constatações:

- No método BS, o dimensionamento não considera o ângulo de atrito do material em seus cálculos para o efeito do arqueamento, o que representa uma limitação para a modelagem precisa das tensões associadas a esse efeito. Terzaghi (1943) já afirmava que o atrito entre partículas é um parâmetro fundamental, pois influencia as tensões de cisalhamento dentro do solo e é crucial para o efeito de arqueamento.
- Observa-se que o ângulo de atrito acima de 30° (faixa característica de solos granulares), demonstrou um comportamento com pequenas variações nos resultados entre diferentes valores de altura do aterro.

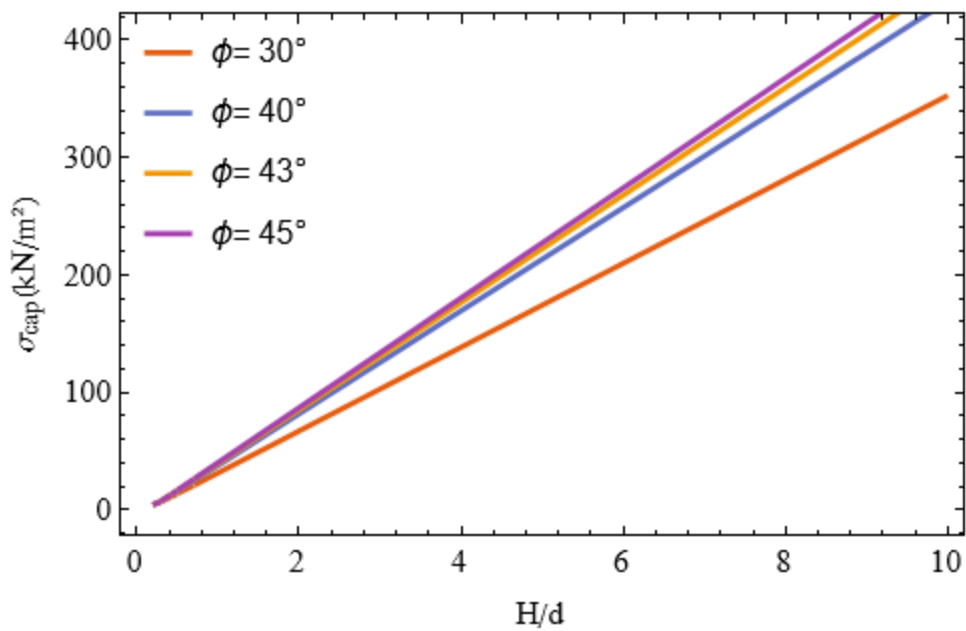


Figura 5.16 – Influência da Variável Ângulo de Atrito no método analítico EBGEO (2011)

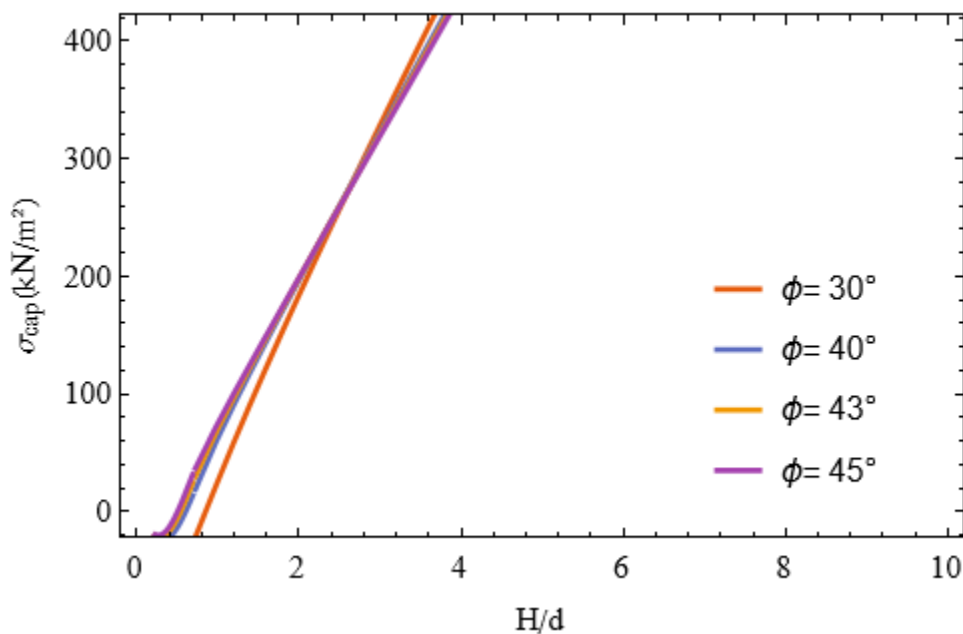


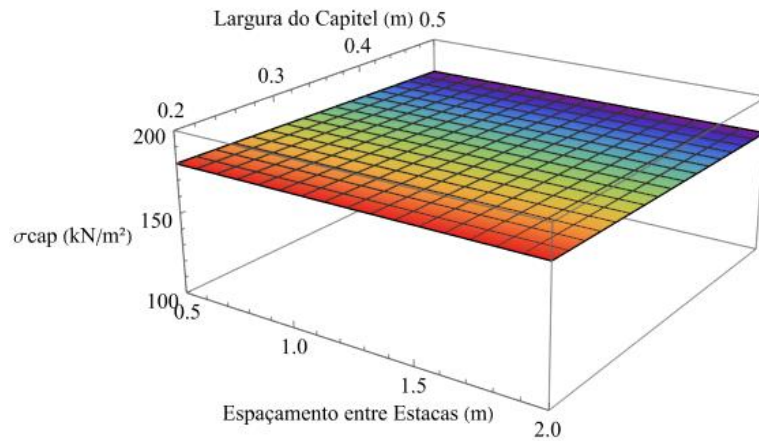
Figura 5.17 - Influência da Variável Ângulo de Atrito no método analítico CUR 226(2016) - CA

5.2.3 Espaçamento e Diâmetro da Estaca

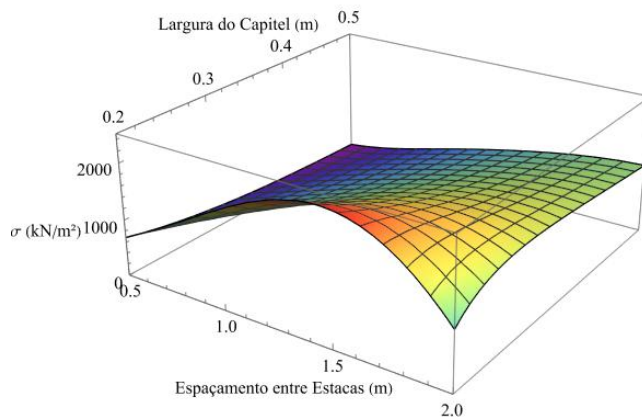
Para análise do dimensionamento da estrutura foi estudado a interação conjunta de duas variáveis geométricas: a largura do capitel (a) e o espaçamento entre estacas (s_x), demonstrando como essas variáveis influenciam a eficiência do efeito de arqueamento em cada normativa.

Observa-se que são interações complexas, já que cada método de dimensionamento apresenta particularidades em seus cálculos, resultando em diferentes

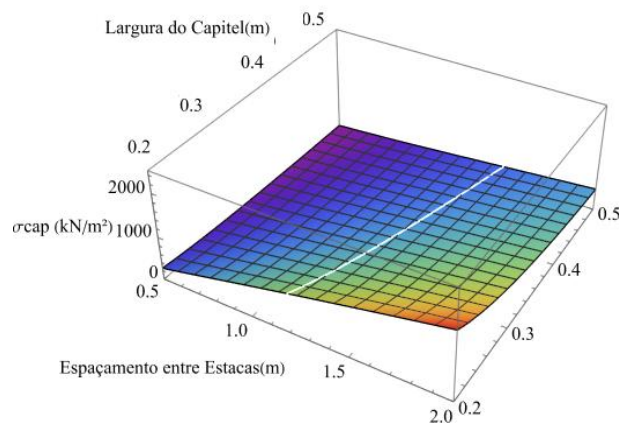
valores. Para melhor visualização qualitativa desses efeitos, superfícies tridimensionais foram geradas (Figura 5.18), permitindo analisar a sensibilidade da tensão em função das variáveis geométricas.



(a) Método Britânico



(b) Método Alemão



(c) Método Holandês

Figura 5.18 – Visão 3D dos Métodos de Dimensionamento

A Figura 5.19 e Figura 5.20 apresentam comparações gráficas entre os resultados do modelo numérico e os métodos analíticos (BS, CA e EBGEOM). Já a Tabela 5.1 resume os valores de tensão para diferentes combinações de largura de capitel e espaçamento entre estacas. Nela, observa-se que o aumento da largura do capitel (a) e a diminuição do espaçamento (sx) resultam, em geral, em maiores valores de tensão nas estacas, indicando uma maior eficiência do efeito de arqueamento. Para a comparação dos resultados de dimensionamento, foi adotada uma altura de aterro de 3 metros, conforme os valores utilizados na tese de Melchior Filho (2022).

Além disso, os resultados demonstram que as variáveis geométricas têm influência mais significativa sobre a distribuição de carga no corpo do aterro do que as características do próprio material de aterro.

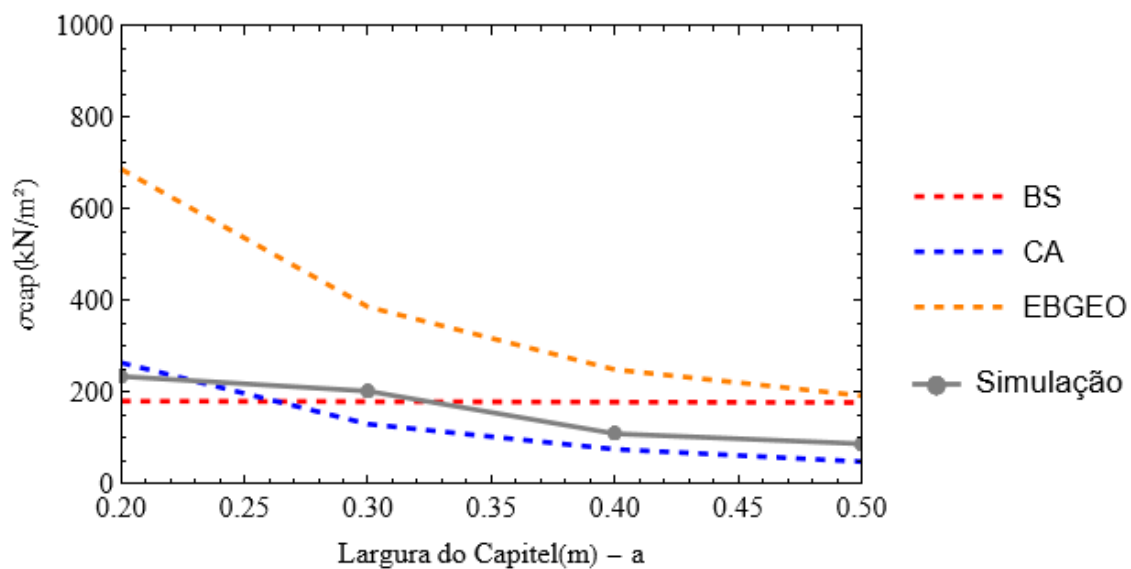


Figura 5.19 - Tensão no Capitel vs Largura do Capitel - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico

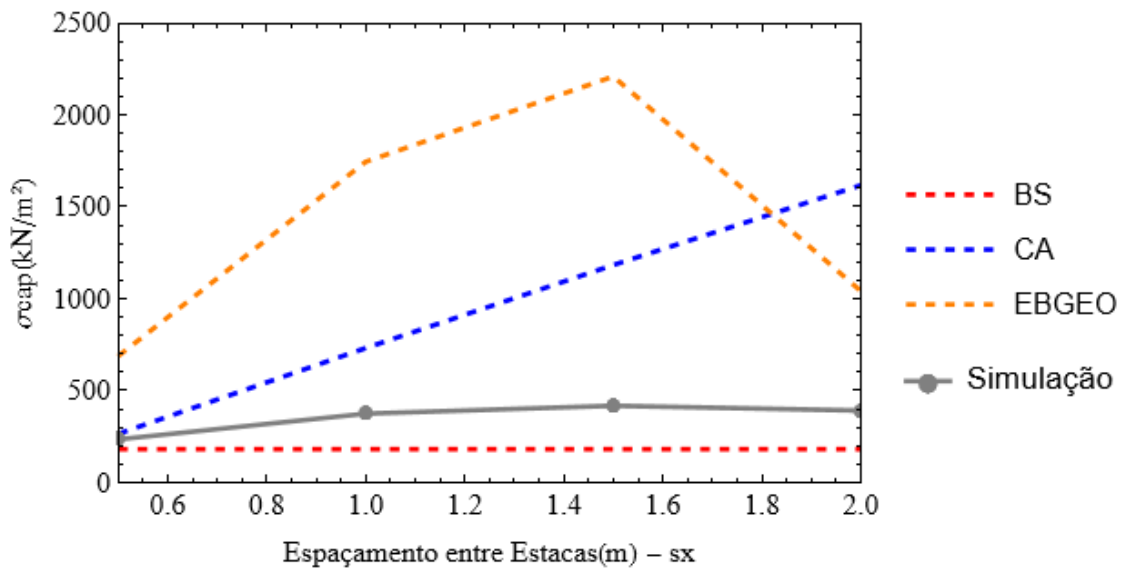


Figura 5.20 – Tensão no Capitel vs Espaçamento entre Estacas - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico

Tabela 5.1 – Valores da Tensão no Capitel vs Variação Geométrica - Comparação Simulação Numérica e Métodos Analítico

sx (m)	a (m)	$\sigma_{cap} (kN / m^2)$			
		Simulação	BS	CA	EBGEO
0.5	0.2	234	180	264	687
0.5	0.3	202	179	130	386
1.0	0.2	435	180	731	1745

5.3 Modelo Físico *versus* Numérico *versus* Normativo

Esta seção apresenta os resultados analíticos dos métodos normativos e os resultados simulados. Inicialmente apresentando os resultados do efeito arqueamento, após o efeito membrana.

5.3.1 Carga na Cabeça da Estaca

A Figura 5.21 apresenta o gráfico da relação entre a força desenvolvida no capitel central (F, em kN) e a razão da altura com a distância entre as estacas (H/d), comparando os métodos analíticos, simulação numérica e os dados experimentais de laboratório. Permitindo avaliar a consistência e a precisão dos diferentes métodos na representação do comportamento estrutural. Do gráfico é possível comentar o seguinte:

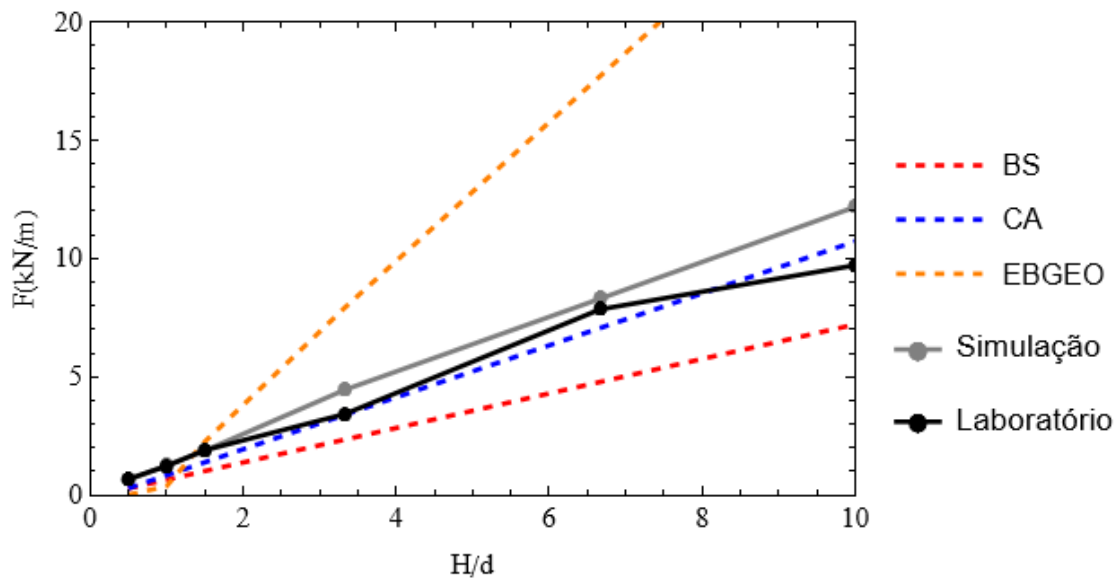


Figura 5.21 –Efeito do Arqueamento: Carga na Cabeça da Estaca versus a razão da altura com a distância entre as estacas (H/d)

- A linha vermelha tracejada (BS) refere-se ao método britânico (BS8006, 2010). A linha possui uma inclinação mais suave, resultando em menores previsões de força aplicada no capitel central em comparação com os outros métodos ao longo de todas as alturas.
- A linha azul tracejada (CA) refere-se ao método de arcos concêntricos (CUR 226, 2016). A força aplicada aumenta de forma linear, mostrando uma inclinação constante. Este método apresenta valores intermediários de força em comparação com os outros métodos.
- A linha laranja tracejada (EBGEO) refere-se ao método alemão (EBGEO, 2011). A linha começa com uma inclinação acentuada, indicando um rápido aumento da força com a altura, especialmente na faixa onde o arqueamento está se consolidando ($H/d < 1,5$). Após esse ponto, a inclinação da linha se torna mais suave. Este método prevê as maiores forças no capitel central.
- Os pontos cinza (Simulação) representam os resultados da simulação numérica. A força aplicada aumenta de forma linear com a altura, apresentando uma inclinação similar à do CA, mas ligeiramente superior. A simulação prevê forças intermediárias entre os valores calculados pelos métodos EBGEO e CA.
- Os pontos pretos (Laboratório) representam os dados experimentais obtidos em laboratório. Esses pontos estão dispersos ao longo das linhas, mostrando uma boa correlação com a simulação numérica e o método CA. No entanto, há uma

discrepância significativa em relação ao método EBGeo para alturas menores, onde o método superestima as forças.

Principais constatações:

- O método britânico (BS) apresenta as menores previsões de força aplicada no dimensionamento do efeito do arqueamento.
- O método de arcos concêntricos (CA) e a simulação numérica mostram previsões de força mais consistentes e próximas dos dados de laboratório.
- O método EBGeo prevê as maiores forças aplicadas no capitel central, especialmente para alturas menores, o que pode indicar uma abordagem conservadora, conforme constatado também em estudos como os de Van Eekelen et al. (2012) e Fonseca & Palmeira (2019).
- Os dados experimentais de laboratório parecem corroborar mais com as previsões da simulação numérica e do método de arcos concêntricos, sugerindo que esses modelos podem fornecer estimativas mais precisas para este tipo de análise.

Deste modo a Figura 5.21 destaca as diferenças nas previsões de força aplicada no capitel central entre os diferentes métodos, com uma clara indicação de que os resultados experimentais estão mais alinhados com a simulação numérica e o método de arcos concêntricos.

5.3.2 Tração no Reforço

A faixa de valores de tração de um reforço geossintético em um aterro estaqueado reforçado depende de vários fatores, incluindo o tipo de geossintético utilizado, as características da carga aplicada, a altura do aterro, e as propriedades do solo. No caso de geogrelhas, a resistência à tração pode variar amplamente, entre 50 e 400 kN/m, dependendo do tipo de material utilizado e do processo de fabricação. Geotêxteis, em contrapartida, geralmente apresentam uma faixa de resistência à tração inferior, variando entre 20 e 200 kN/m. Em projetos de engenharia, essas especificações devem ser ajustadas considerando tanto simulações computacionais quanto ensaios práticos *in loco*, a fim de refletir as condições reais de aplicação. Adicionalmente, a maioria dos projetos incorpora fatores de segurança para compensar a degradação gradual dos materiais ao longo do tempo, especialmente em ambientes onde o geossintético está exposto a agentes químicos ou elevados níveis de umidade. Esses fatores de segurança tendem a aumentar os valores de tração projetados, podendo adicionar entre 1,5 a 2 vezes o valor inicialmente calculado.

As faixas de resistência à tração também variam em função da altura do aterro, conforme descrito a seguir: para aterros de menor porte, a faixa de resistência pode ser reduzida para 50 a 100 kN/m; para aterros de porte médio, a faixa recomendada é entre 100 e 200 kN/m; e para aterros altos, valores de tração superiores a 200 kN/m são geralmente aplicáveis.

Em aplicações práticas, como na reforma da rodovia BR-364 em Jataí, Goiás, foram utilizadas geogrelhas bidirecionais com resistência à tração de 200 kN/m. Em outro exemplo, no trecho da ferrovia no Rio Laje, em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul, foram empregadas geogrelhas com resistência nominal de 400 kN/m na direção principal e 150 kN/m na direção transversal, em virtude da complexidade da obra.

Para este estudo específico, o modelo numérico baseia-se em dados obtidos a partir do modelo físico reduzido desenvolvido por Melchior Filho(2022), cuja escala se aplica à faixa de aterros de menor porte.

A Figura 5.22 apresenta o gráfico da tração no geossintético (T , em kN/m) em função da razão entre a altura do aterro e a distância entre as estacas (H/d), comparando os métodos analíticos, simulação numérica e dados experimentais. Devido à complexidade de medição desse efeito e a dificuldade de estimativa em laboratório durante execução do ensaio, a tração foi calculada por meio de ensaios de tração de faixa, antes das execuções dos ensaios, para compreender a resistência a tração do geossintético estudado obtendo valores de tração máxima na ordem de 13kN/m a 15kN/m. Demonstrando assim a importância da simulação numérica diante as complexidades de um ensaio laboratorial. Obtendo as seguintes constatações:

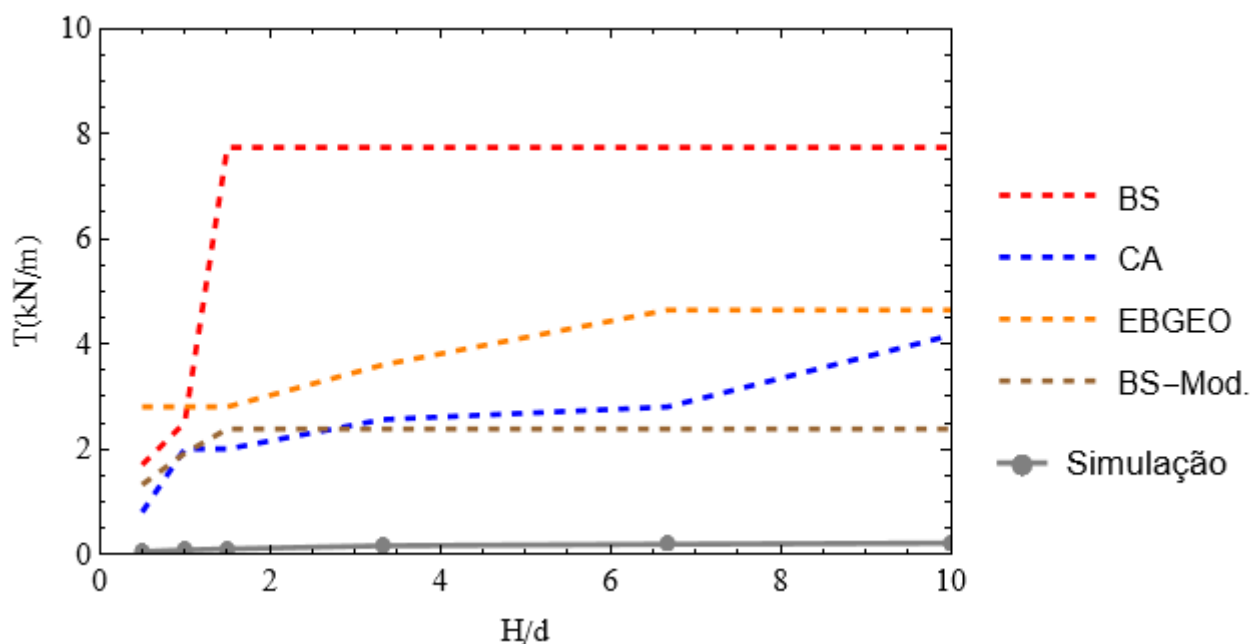


Figura 5.22 – Efeito Membrana: Tração no Geossintético versus a razão da altura com a distância entre as estacas (H/d)

- A linha vermelha tracejada (BS) refere-se ao método britânico (BS8006, 2010), que aumenta a tração até atingir a altura crítica, onde se forma o arqueamento completo de acordo com o método, estabilizando-se em torno de $T = 5 \text{ kN/m}$.
- A linha azul tracejada (CA) refere-se ao método de arcos concêntricos (CUR 226, 2016) e a linha laranja tracejada (EBGEO) ao método alemão (EBGEO, 2011), que apresentam um comportamento nos valores de tração próximos a $T = 3 \text{ kN/m}$.
- A linha marrom tracejada (BS -Modificado) refere-se ao método britânico modificado por Van Eeklen, onde se forma o arqueamento completo de acordo com o método, estabilizando-se em torno de $T = 1,2 \text{ kN/m}$.
- Os pontos cinza (Simulação) demonstram valores com uma tração próxima de $T = 0,8 \text{ kN/m}$. Sendo um resultado inferior aos dados obtidos nos modelos numéricos e nos dados laboratoriais.

Deste modo o modelo numérico desenvolvido apresenta desempenho satisfatório na representação do mecanismo de transferência de carga em sistemas de aterro estaqueado com reforço de geossintético. No entanto, a simulação do efeito membrana — responsável pela mobilização da tração no geossintético — mostrou-se menos precisa, indicando que abordagens baseadas em modelos discretos, capazes de representar o comportamento de partículas individualmente, podem oferecer melhores resultados nesse aspecto.

5.3.3 Eficiência

O modelo numérico apresentado permitiu o estudo do comportamento estrutural sob diversas circunstâncias. Após os ajustes realizados no modelo numérico e sua comparação com os modelos físicos e analíticos, foi possível validar a veracidade de seu comportamento. Esta seção é dedicada ao estudo da influência do espaçamento entre estacas na eficiência do sistema, com base no modelo numérico desenvolvido.

De acordo com Hewlett & Randolph (1988), conforme descrito no tópico 3.2.3, o método britânico de dimensionamento de aterros estacados reforçados, adotado pela norma BS8006-1, define a eficiência de arqueamento (β) como a fração da carga total do aterro que é efetivamente transferida para os capitéis das estacas, em oposição àquela que permanece sustentada pelo solo entre as estacas. Essa eficiência é expressa pela seguinte relação:

$$\beta = \frac{\sigma_{cap}}{\sigma_{total}}$$

- σ_{cap} é a tensão vertical média transmitida aos capitéis, e
- σ_{total} é a tensão total na base do aterro, considerada como $\sigma_{total} = \gamma H$, sendo o γ peso específico do aterro e H sua altura.

Este conceito é fundamental para avaliar a capacidade do sistema de concentrar a carga nos capitéis, promovendo o chamado efeito de arqueamento. No presente trabalho, esse parâmetro é adotado como base para comparação entre os diferentes métodos normativos analisados, uma vez que todos compartilham premissas fundamentais semelhantes — como a desconsideração das contribuições do solo mole subjacente e o foco exclusivo no comportamento do aterro na região entre os capitéis, onde ocorre a redistribuição das tensões.

Na Figura 5.23, são apresentados os resultados da eficiência do sistema no modelo numérico em comparação com os modelos analíticos e físicos, com as seguintes observações:

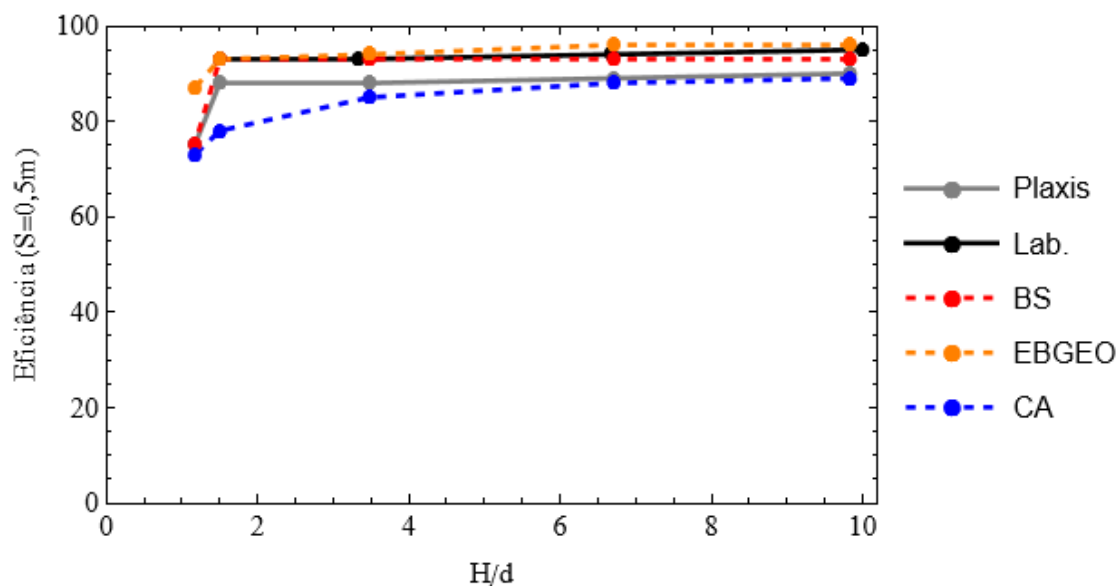


Figura 5.23 – Eficiência do Modelo

- A eficiência aumenta rapidamente para todos os métodos até atingir o efeito de arqueamento completo, estabilizando-se posteriormente, com pequenas diferenças entre os métodos.
- Os métodos BS e EBGEO apresentam valores ligeiramente mais altos nos estágios iniciais do gráfico de eficiência (para $H/d < 2,5$), mas convergem com os demais métodos à medida que os valores de H/d aumentam.
- O método CA exibe os menores valores de eficiência, com diferenças mais pronunciadas em valores menores de H/d .
- As curvas obtidas pelo modelo numérico (Plaxis) e pelos dados de laboratório (Lab.) são próximas, indicando uma boa correlação entre o modelo numérico e os resultados experimentais.
- É possível observar que a eficiência do sistema atinge um platô quando o arqueamento completo é formado.
- As diferenças entre os métodos refletem as particularidades de cada abordagem, sejam elas experimentais, analíticas ou numéricas.

Na Figura 5.24, analisa-se o comportamento do modelo numérico quando o espaçamento entre as estacas é variado, mantendo-se fixos os valores das demais variáveis. Essa análise permitiu identificar os impactos do espaçamento na eficiência do sistema, com as seguintes constatações:

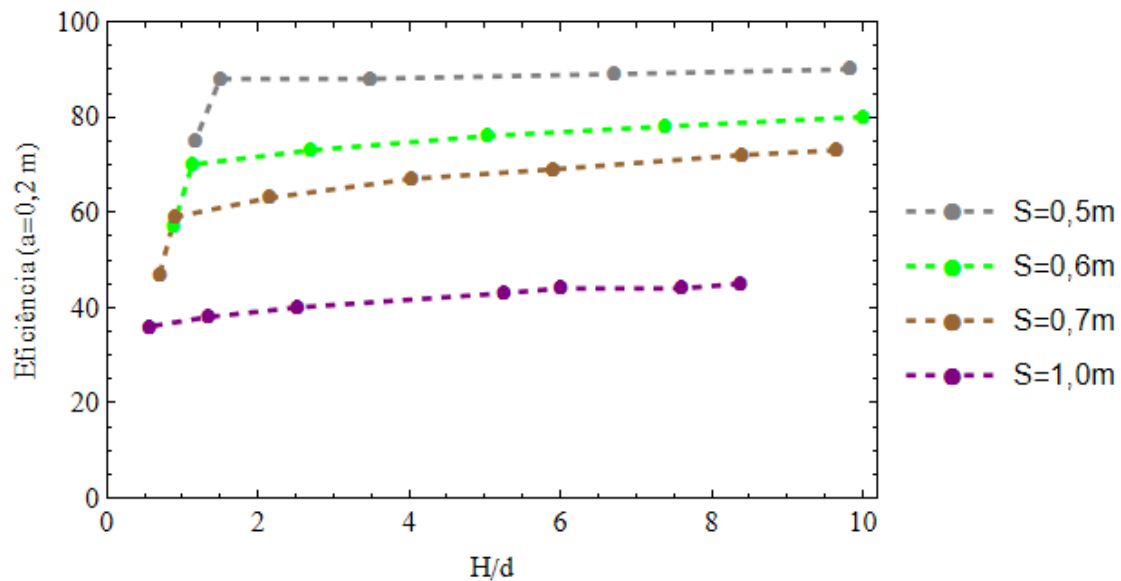


Figura 5.24– Eficiência do Modelo para diferentes espaçamentos entre estacas

- Assim como na Figura 5.23, a eficiência aumenta até atingir o efeito de arqueamento completo, estabilizando-se em seguida. No entanto, maiores espaçamentos resultam em menores valores de eficiência.
- Espaçamentos menores favorecem maior eficiência no sistema analisado, com a eficiência máxima observada em espaçamentos de $S = 0,5$ m.
- Para relações geométricas de $H/d < 2$, a eficiência é mais sensível às variações. À medida que H/d aumenta, a eficiência cresce até atingir a estabilização, sendo esta estabilização mais rapidamente alcançada para espaçamentos menores. Para espaçamentos maiores, a estabilização ocorre em $H/d > 5$, devido à formação do efeito de arqueamento completo.

6. CONCLUSÕES

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta essencial para análises geotécnicas, proporcionando um ambiente adequado para estudos detalhados sobre o comportamento de estruturas em diversos tipos de solos. Sua capacidade de integrar modelos constitutivos avançados e simular complexas interações solo-estrutura, solo-aterro e solo-geossintético o torna uma escolha apropriada para investigações nessa área.

A seleção cuidadosa de um modelo constitutivo que represente adequadamente o comportamento do material é fundamental para assegurar a qualidade dos resultados numéricos. A complexidade desses modelos, especialmente os mais avançados, demanda uma atenção especial à validação e calibração dos numerosos parâmetros envolvidos. A precisão e confiabilidade dos resultados dependem diretamente da qualidade desses parâmetros, ressaltando a importância de uma abordagem rigorosa na definição e ajuste destes.

Este estudo calibrou por meio de um ensaio numérico o material de aterro reforçado, atendendo satisfatoriamente ao objetivo de obter um modelo constitutivo avançado que permita uma simulação numérica mais representativa de aterros estacados reforçados. Investigou-se a eficiência do efeito de arqueamento e a influência de variáveis geométricas e materiais em aterros reforçados com estacas, utilizando modelagem numérica e análise experimental. A seguir, são apresentados apontamentos extraídos de acordo com as simulações realizadas e na comparação com métodos normativos:

- **Eficácia da Simulação Numérica:** as simulações numéricas empregadas demonstraram ser ferramentas eficazes na previsão do comportamento estrutural dos aterros reforçados, alinhando-se de maneira satisfatória com os dados experimentais, especialmente em relação ao método de arcos concêntricos. A representação numérica apresentou maior precisão em capturar fenômenos como o efeito membrana, proporcionando uma estimativa mais segura para o dimensionamento estrutural.
- **Definição da Malha:** a análise de sensibilidade demonstrou que a precisão das simulações é sensível ao refinamento da malha. Para o Caso A, a convergência foi observada com 2000 nós, enquanto o Caso B exigiu uma malha de 4000 nós. Isso reforça a necessidade de um dimensionamento adequado para cada cenário, garantindo robustez nos resultados e reduzindo o potencial de erros nas previsões.

- Impacto do Módulo de Reação de Subleito (k_s): a análise do efeito do arqueamento com diferentes rigidezes de solo indicou que a eficiência do fenômeno diminui à medida que o solo se torna mais rígido. Materiais mais flexíveis resultaram em maior variação de tensão com a altura do aterro, enquanto materiais mais rígidos promoveram uma distribuição mais uniforme.

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam a importância de integrar métodos numéricos, analíticos e experimentais para compreender o comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. A partir das análises realizadas, foram destacados os seguintes pontos principais:

a) Efeito de arqueamento:

- O modelo numérico demonstrou boa consistência com os dados laboratoriais e métodos analíticos, especialmente com o método de arcos concêntricos (CA).
- O método britânico (BS) apresentou previsões conservadoras, enquanto o método alemão (EBGEO) superestimou os valores para alturas menores, o que pode ser atribuído à sua abordagem mais cautelosa.
- A validação cruzada entre os dados numéricos e experimentais reforçou a precisão dos modelos simulados.
- O modelo numérico desenvolvido demonstrou desempenho satisfatório na representação do mecanismo de transferência de carga em sistemas de aterro estaqueado com reforço de geossintético.

b) Tração no reforço geossintético:

- A análise da tração nos geossintéticos destacou a complexidade de estimar esse parâmetro em laboratório, evidenciando a importância das simulações numéricas para preencher lacunas nas medições experimentais.
- Observou-se baixa precisão na simulação do efeito membrana, mecanismo associado à mobilização da tração no geossintético. Essa limitação sugere que modelos discretos, capazes de representar o comportamento individual das partículas do solo e do reforço, podem ser mais adequados para simular com maior fidelidade o efeito membrana.

c) Eficiência do Sistema

- A eficiência do sistema mostrou-se diretamente influenciada pelo espaçamento entre estacas. Espaçamentos menores favoreceram maior eficiência, enquanto maiores espaçamentos resultaram em reduções consideráveis.
- Para relações geométricas $H/d < 2$, a eficiência é mais sensível às variações, estabilizando-se para $H/d > 5$, em especial com espaçamentos maiores.
- A correlação entre o modelo numérico e os dados de laboratório demonstrou a robustez do modelo desenvolvido, validando sua aplicação para diferentes cenários estruturais.

Os resultados ressaltam o papel do modelo numérico como uma ferramenta essencial para análises de estruturas reforçadas, especialmente na compreensão do efeito de arqueamento e na avaliação de variáveis críticas, como a tração nos geossintéticos e o espaçamento entre estacas. A integração de métodos numéricos, analíticos e laboratoriais proporciona uma abordagem mais precisa e segura, contribuindo para o avanço das práticas de engenharia geotécnica.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a importância do método dos elementos finitos (MEF) na análise de aterros reforçados e na compreensão do efeito de arqueamento. No entanto, algumas lacunas ainda podem ser exploradas em pesquisas futuras para aprofundar e expandir o conhecimento sobre o tema. Com base nas conclusões alcançadas, sugerem-se os seguintes tópicos para investigações posteriores:

1. Modelagem do solo mole subjacente:

- Simular o solo abaixo da camada de reforço utilizando materiais compressíveis e de baixa resistência, considerando o fator de escala, para avaliar sua influência na transferência de cargas e no comportamento global do aterro reforçado.

2. Modelagem tridimensional (3D) do sistema:

- Utilizar softwares de elementos finitos para desenvolver uma modelagem tridimensional do ensaio, permitindo a comparação entre os resultados da simulação 3D e aqueles obtidos nas análises bidimensionais e experimentais.
- Avaliar a influência da tridimensionalidade no comportamento do reforço geossintético, especialmente na distribuição de tensões e deformações ao longo da estrutura.

3. Análise da influência de fatores climáticos e variações ambientais:

- Investigar o impacto de ciclos de umedecimento e secagem sobre a eficiência do sistema de reforço, analisando possíveis alterações na resistência e na rigidez dos materiais utilizados.
 - Simular a influência de diferentes níveis de lençol freático e sua variação sazonal na estabilidade do aterro reforçado.
4. Aperfeiçoamento dos critérios normativos:
- Analisar a aplicabilidade de diferentes fatores de segurança utilizados nos métodos normativos, especialmente no dimensionamento do reforço geossintético e no espaçamento entre estacas.

Essas sugestões de pesquisa permitirão um avanço significativo no entendimento e no dimensionamento de aterros reforçados, contribuindo para a otimização de projetos geotécnicos e para a melhoria das diretrizes normativas aplicáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 10319: **Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga**. 11 p. Rio de Janeiro, 2013.
- Almeida, M.S.S. & Marques, M.E.S. (2011). **Construction methods in Brazilian extremely soft soils**. Pan–Am CGS Geotechnical Conference.
- Almeida, M. S. S. & Marques, M. E. S. (2013). **Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils**. Taylor & Francis, London, UK.
- Brzeziński, K., & Michalowski, R. L. (2023). **System efficacy and diffused arching in embankments supported by piles**. In *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet* (pp. 1098-1107). CRC Press.
- Briançon, L. & Simon, B. (2012). **Performance of pile-supported embankment over soft soil: Full-scale experiment**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, pp. 551-561.
- Brinkgreve, R., Swolfs, W., and Engin, E. (2015). **PLAXIS user's manual-version 6.1**. Balkema. Rotterdam. The Netherlands
- BS 8006–1. (2010). **Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills**. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.
- Chevalier, B., Villard, P., & Combe, G. (2011). **Investigation of load-transfer mechanisms in geotechnical earth structures with thin fill platforms reinforced by rigid inclusions**. *International Journal of Geomechanics*, 11(3), 239-250
- Coduto, Donald P., Yeung, Man-Chu R., Kitch, William A. (1994). **Geotechnical Engineering: Principles and Practices**. Editora Pearson Prentice Hall.794p.
- CUR 226. (2016). **Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments**. Eds.: S.J.M. van Eekelen & M.H.A. Brugman. Revision of the Design Guideline CUR226. (In English). SBRCURnet & CRC press, Delft, in press, ISBN 9789053676240.
- Den Boogert, T.J.M. (2011). **Piled embankments with geosynthetic reinforcement - numerical analysis of scale model tests**. M.Sc. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 202 p.
- DNIT–PRO 380/22. **Utilização de geossintéticos em aterros sobre solos moles para obras viárias**. 22p. Brasília – DF.
- EBGEO (2011). **Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements** – EBGEO. Germany. ISBN 978-3-433-60093-1.
- Fagundes, D. F., Almeida, M. S., Thorel, L., & Blanc, M. (2017). **Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments**. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), 1-10.

- Ferreira, R. S. M. (2007). **Collapsible and swelling soils: An overview of Brazil**. In: Proceedings of Brazilian symposium on unsaturated soils, Vol 6, N°2007, p. 593-618.
- Fonseca, E.C.A. (2017). **Estudo Experimental do Comportamento de Aterros Estaqueados Reforçados com Geossintéticos**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-129/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.
- Fonseca, E.C.A. & Palmeira, E.M. (2018). **An evaluation of the accuracy of design methods for geosynthetic reinforced piled embankments**. Geosynthetics International.
- Garcia, J. A. B., Rodríguez Rebolledo, J. F., dos Santos Mützenber, D. V., Caicedo, B., & de Farias Neves Gitirana Jr, G. (2021). **Experimental investigation of a load-transfer material for foundations reinforced by rigid inclusions**. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 147(10), 04021110.
- Hewlett, W.J. & Randolph, M.F. (1988). **Analysis of piled embankments**. Ground Engineering, April 1988, Volume 22, Number 3, pp. 12–18.
- Heitz, C. (2006). **Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern**. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19 (em Alemão).
- Huesker (2024). **Casos de Obra – Volume I**. <https://www.huesker.com.br/noticias/detail-view/e-book-casos-de-obras/>
- Marston, A. & Anderson, A.O. (1913). **The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe**. Bulletin No. 31, Engineering Experiment Station.
- Melchior Filho, J. (2022). **Estudo da interação solo–reforço geossintético em aterros estaqueados por meio de ensaios de grandes dimensões**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135 p
- Mukherjee, S., Sivakumar Babu, G.L., 2023. **Three-dimensional numerical modeling of geogrid reinforced foundations**. Comput. Geotech. 158, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105397>
- Palmeira, E.M. (2020). **Classificação dos Geossintéticos**. Apostila, Associação Brasileira de Geossintéticos. <https://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/04/1.pdf>
- Palmeira, E.M. (2020). **Funções do Geossintético**. Apostila, Associação Brasileira de Geossintéticos. <https://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/04/2.pdf>
- Palmeira, E.M. (2018). **Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

- Plaxis (2022). **Tutorial Manual - Plaxis 2D**. https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0107989
- REBOLLEDO, J. F. R., LEÓN, R. F. P. & CARVALHO, J. C. (2019a). **Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília**. *Soils and Rocks* 42(1): 61-74.
- Rui, R.; Han, J.; van Eekelen, S.J.M. & Wan, Y. (2018). **Experimental Investigation of Soil–Arching Development in Unreinforced and Geosynthetic–Reinforced Pile–Supported Embankments**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 145. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943–5606.0002000
- Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, B. G. (1999). **The Hardening Soil Model: formulation and verification**. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 years of PLAXIS*, Balkema.
- Shen, P., Han, J., Zornberg, J. G., Morsy, A. M., Leshchinsky, D., Tanyu, B. F., & Xu, C. (2019). **Two and three-dimensional numerical analyses of geosynthetic-reinforced soil (GRS) piers**. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 352-368.
- Terzaghi, K. (1943). **Theoretical Soil Mechanics**. 3ª edição, Nova York, John Wiley & Sons.
- Van Eekelen, S.J.M. (2016). **The 2016–update of the Dutch Design Guideline for Basal Reinforced Piled Embankments**. *Procedia Engineering*. vol. 143, p. 582–589. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.077.
- Van Eekelen, S.J.M. (2015). **Basal Reinforced Piled Embankments**. PhD thesis Technical University of Delft, Holanda. 274p. ISBN 978-94-6203-825-7.
- Van Eekelen, S.J.M.; Bezuijen, A. & van Tol, A.F. (2015). **Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments**. *Geotextiles and Geomembranes*. 43:1, pp. 56 – 81.
- Van Eekelen, S.J.M.; Bezuijen, A. & van Tol, A.F. (2013). **An analytical model for arching in piled embankments**. *Geotextiles and Geomembranes*. 39, pp. 78–102.
- Van Eekelen, S.J.M.; Bezuijen, A.; Lodder, H.J. & van Tol, A.F. (2012a). **Model experiments on piled embankments. Part I**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 32, pp. 69–81.
- Van Eekelen, S. J. M.; Bezuijen, A.; Lodder, H. J. & van Tol, A. F. (2012b). **Model experiments on piled embankments. Part II**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 32, pp. 82–94.
- Van Eekelen, S.J.M.; Bezuijen, A. & van Tol, A.F. (2011). **Analysis and modification of the British Standard BS8006 for the design of piled embankments**. *Geotextiles and Geomembranes* 29:345–359. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.geotexmen.2011.02.001](https://doi.org/10.1016/j.geotexmen.2011.02.001).

- Xu, C.; Zhang, X.; Han, J. & Yang, Y. (2019). **Two-Dimensional Soil-Archiving Behavior under Static and Cyclic Loading**. International Journal of Geomechanics. 19(8): 04019091. ASCE, ISSN 1532-3641. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001482.
- Xing, H., Zhang, Z., Liu, H., Wei, H., 2014. **Large-scale tests of pile-supported earth platform with and without geogrid**. Geotext. Geomembr. 42, 586–598. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.10.005>
- Zaeske, D. (2001). **Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen**. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10 (em Alemão).
- Zornberg, J. G., & Leshchinsky, D. (2003). **Comparison of international design criteria for geosynthetic-reinforced soil structures**. In Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement (Vol. 2, pp. 1095-1106).