



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Adjany Dias de Paula

Avaliação de sistemas de contenção de solo: estudo comparativo
entre terramesh e terra armada

Ouro Preto
2025

Adjany Dias de Paula

Avaliação de sistemas de contenção de solo: estudo comparativo
entre terramesh e terra armada.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: MSc. Marcela Paula Grobério
Coorientador: DSc. Geraldo Donizetti de Paula

Ouro Preto

2025



FOLHA DE APROVAÇÃO

Adjany Dias de Paula

Avaliação de sistemas de contenção de solo: estudo comparativo entre terramesh e terra armada

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 14 de abril de 2025

Membros da banca

MSc. Marcela Paula Grobério - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto

DSc. Geraldo Donizetti de Paula - Universidade Federal de Ouro Preto

DSc. Rovadavia Aline de Jesus Ribas - Universidade Federal de Ouro Preto

Marcela Paula Grobério, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/04/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Marcela Paula Groberio, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/04/2026, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1088467** e o código CRC **2C4C1BFE**.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa entre dois sistemas de contenção de solo amplamente utilizados em obras geotécnicas: o Terramesh e o Terra Armada. O estudo baseia-se em uma abordagem teórico-prática, com a descrição técnica de ambos os sistemas, análise de desempenho estrutural e geotécnico, bem como levantamento de critérios de dimensionamento conforme as normas vigentes. A metodologia envolve revisão bibliográfica, modelagem computacional e análise de parâmetros como tipo de solo, inclinação do talude e presença de sobrecargas. As análises foram conduzidas por meio do *software* Slide2, utilizado para avaliação da estabilidade global dos taludes e contenções com solo reforçado. A comparação foi realizada entre os dois sistemas para diferentes alturas de contenção, permitindo observar o comportamento de cada solução conforme a variação da geometria da estrutura. Os resultados evidenciam que o sistema Terra Armada apresentou fatores de segurança mais elevados nas maiores alturas analisadas, demonstrando maior eficiência estrutural em termos de estabilidade global. No entanto, o sistema Terramesh se destaca por vantagens operacionais como menor tempo de execução e maior flexibilidade de adaptação ao terreno, revelando-se uma alternativa viável em contextos específicos onde essas características são decisivas. A comparação dos sistemas permite avaliar suas aplicações ideais, limitações e contribuições para a estabilidade e durabilidade de obras de contenção.

Palavras-chave: Geotecnia. Estabilidade de Taludes. Estruturas de Contenção. Terramesh. Terra Armada. Solo Reforçado.

ABSTRACT

This study presents a comparative evaluation between two widely used soil retaining systems in geotechnical engineering: Terramesh and Reinforced Earth (Terra Armada). The work is based on a theoretical-practical approach, including the technical description of both systems, structural and geotechnical performance analysis, and design criteria according to current standards. The methodology involves a literature review, computational modeling, and analysis of parameters such as soil type, slope angle, and surcharge loads. The analyses were carried out using the Slide2 software, which was applied to assess the global stability of slopes and reinforced soil retaining structures. The comparison was conducted between the two systems for different wall heights, allowing the evaluation of their performance as the geometry of the structure varies. The results show that the Terra Armada system presented higher safety factors at all analyzed heights, demonstrating greater structural efficiency in terms of global stability. However, the Terramesh system stands out for its operational advantages, such as shorter execution time and greater flexibility in adapting to the terrain, proving to be a viable alternative in specific contexts where these characteristics are decisive. The comparison between the systems enables the identification of their ideal applications, limitations, and contributions to the stability and durability of retaining structures.

Keywords: Geotechnics. Slope Stability. Retaining Structures. Terramesh. Reinforced Earth. Reinforced Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da deformação de um solo reforçado e um solo não reforçado.....	15
Figura 2 - Experimento de reforço dos solos	16
Figura 3 – Dispositivos de drenagem	18
Figura 4 - Sistema de contenção Terra Armada	19
Figura 5 - Geometrias das escamas	19
Figura 6 - Processo construtivo do sistema Terra Armada	21
Figura 7 - Obra realizada em Terra Armada no Autódromo José Carlos Pace, em São Paulo - SP.....	21
Figura 8 - Gabião.....	22
Figura 9 - Estrutura de uma geogrelha	22
Figura 10 - Terramesh Tradicional (Sistema Gabião).....	23
Figura 11 - Terramesh Verde.....	24
Figura 12 - Terramesh Mineral	24
Figura 13 - Obra realizada em Terramesh no Jardim São Camilo, em Jundiaí - SP.....	25
Figura 14 – Atrito solo-armadura.....	27
Figura 15 - Movimento da parede em relação ao tipo de empuxo.....	28
Figura 16 - Mecanismos para verificação da estabilidade interna	34
Figura 17 – Provável superfície de ruptura	34
Figura 18 - Provável superfície de ruptura para reforços extensíveis.....	35
Figura 19 - Tipos de análise na verificação da estabilidade externa de estruturas reforçadas.....	38
Figura 20 - Distribuição de tensões verticais na base	40
Figura 21 - Interface do software Slide 2.....	45
Figura 22 - Pré-dimensionamento de contenções em solo reforçado	45
Figura 23 - Pré-dimensionamentos	46

Figura 24 - Corte previsto para altura de 5m	51
Figura 25 - Corte previsto para altura de 7,5m	52
Figura 26 - Corte previsto para altura de 10m	52
Figura 27 - Corte previsto para altura de 12,5m	53
Figura 28 – Dados de catalogo da fabricante	58
Figura 29 – Geometria proposta para a altura de 12,5m em Terra Armada	59
Figura 30 – Configurações gerais de projeto	60
Figura 31 – Configurações de métodos de análise.....	60
Figura 32 - Configurações de superfície de ruptura.....	61
Figura 33 – Propriedades dos materiais	61
Figura 34 - Atribuição das propriedades dos materiais à geometria.....	62
Figura 35 – Atribuição de carregamento.....	62
Figura 36 – Propriedades dos elementos de reforço (Terra Armada)	64
Figura 37 – Inserção dos elementos de reforço no modelo (Terra Armada)	65
Figura 38 – Inserção dos elementos de reforço no modelo (Terramesh).....	65
Figura 39 – Propriedades do reforço adotado	66
Figura 40 – Análise em Terra Armada, altura igual a 5m.....	68
Figura 41 – Análise em Terramesh, altura igual a 5m	69
Figura 42 – Análise em Terra Armada, altura igual a 7,5m.....	69
Figura 43 – Análise em Terramesh, altura igual a 7,5m	70
Figura 44 - Análise em Terra Armada, altura igual a 10m	70
Figura 45 - Análise em Terramesh, altura igual a 10m.....	71
Figura 46 – Segunda análise em Terramesh, altura igual a 10m	71
Figura 47 - Análise em Terra Armada, altura igual a 10m	72
Figura 48 - Análise em Terramesh, altura igual a 10m	72

Figura 49 - Segunda análise em Terramesh, altura igual a 10m.....	73
Figura 50 – Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Spencer, apresentados em gráfico.....	74
Figura 51 - Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Morgenstern-Price apresentados em gráfico.....	75

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 Estrutura do trabalho.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Sistemas de Contenção e Reforço de Solos	15
2.1.1. Terra Armada	20
2.1.2. Terramesh	22
2.2 Aplicações Normativas – NBR 16920-1:2021	26
2.3 Empuxo.....	29
2.3.1 Teoria de Rankine	30
2.3.2 Teoria de Coulomb.....	31
2.4 Verificações	32
2.5 Estabilidade Interna	34
2.5.1 Cálculo do esforço máximo de tração em cada nível de reforço	36
2.5.2 Verificação dos reforços à tração	36
2.5.3 Verificação dos reforços à aderência.....	37
2.5.4 Desprendimento da face e Instabilidade local.....	38
2.6. Estabilidade Externa e Global.....	38
2.6.1 Deslizamento	39
2.6.2 Tombamento	40

2.6.3	Capacidade de carga da fundação	40
2.6.4.	Ruptura Global.....	43
2.6.4.1	Método de Morgenstern e Price (1965).....	44
2.6.4.2	Método de Spencer (1977).....	44
2.7	Softwares de Análise.....	45
2.7.1	O <i>software</i> Slide2	45
2.8	Pré-dimensionamento.....	47
3.	METODOLOGIA	49
4.	ESTUDO DE CASO	50
4.1	Parâmetros Geotécnicos.....	50
4.2	Geometria e Configuração dos Sistemas	51
4.3	Caracterização dos Elementos de Reforço.....	55
4.3.1	Terra Armada	55
4.3.2	Terramesh	56
4.4	Resultados Numéricos	56
4.4.1	Terra Armada	57
4.4.2	Terramesh	59
4.5	Modelagem Computacional	59
4.6	Análise de Custo	66
6.	CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES	77
6.1	Considerações Finais	77
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	77
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXO 1: Terra Armada H1=5m	80
	ANEXO 2: Terra Armada H1=7,5m	81

ANEXO 3: Terra Armada H1=10m	82
ANEXO 4: Terra Armada H1=12,5m	83

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da infraestrutura viária e a expansão urbana demandam soluções eficazes para a estabilização de encostas e contenção de solos, especialmente em regiões sujeitas a instabilidades geotécnicas. Nesse contexto, os sistemas de contenção de solo desempenham um papel fundamental na garantia da segurança e durabilidade das estruturas, sendo amplamente empregados em rodovias, ferrovias e áreas urbanizadas.

Segundo Barros (2017), as estruturas de contenção exercem um papel fundamental no suporte ao maciço de solo, impedindo escorregamentos decorrentes do peso próprio ou de sobrecargas. Entre os diferentes tipos dessas estruturas, destacam-se os muros de gabião, os muros de flexão e o solo reforçado, que, apesar das distintas formas de execução, possuem a mesma finalidade.

Dentre as diversas técnicas disponíveis, destacam-se os sistemas Terra Armada e Terramesh, que combinam materiais reforçados com técnicas construtivas específicas para promover contenções eficientes e econômicas. O sistema Terra Armada utiliza faixas metálicas ou sintéticas para reforçar maciços terrosos, proporcionando elevada resistência e durabilidade. Por outro lado, o sistema Terramesh integra elementos metálicos e geomantas para criar estruturas flexíveis e de rápida instalação, sendo especialmente vantajoso em obras que exigem adaptação a terrenos irregulares.

Os avanços tecnológicos na engenharia geotécnica possibilitaram o desenvolvimento de *softwares* especializados para análise e dimensionamento dessas estruturas. Ferramentas como o Slide 2 permitem simulações detalhadas do comportamento dos sistemas de contenção, considerando variáveis como resistência do solo, esforços e fatores de segurança. Esses programas são amplamente utilizados para validar projetos e otimizar soluções, garantindo maior precisão nas avaliações.

A escolha do sistema mais adequado depende de fatores como geologia local, condições de carregamento, custos e tempo de execução. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre os sistemas Terra Armada e Terramesh. Para isso, são abordados os conceitos teóricos sobre contenção de solo, reforço e compactação, além da avaliação de casos práticos e normativas aplicáveis. A pesquisa busca contribuir para o entendimento técnico e econômico dessas soluções, auxiliando na escolha do sistema mais apropriado para projetos de engenharia geotécnica, com foco na segurança, viabilidade construtiva e sustentabilidade das obras.

1.1 Justificativa

A avaliação e o dimensionamento de estruturas de contenção de solo são fundamentais para garantir a estabilidade de taludes e aterros, especialmente em obras de infraestrutura urbana, rodoviária e ferroviária. Entre as soluções disponíveis, os sistemas Terramesh e Terra Armada destacam-se por utilizarem princípios de solo reforçado, oferecendo alternativas viáveis às contenções convencionais. No entanto, a escolha entre essas duas tecnologias envolve diversos critérios, como resistência estrutural, viabilidade econômica, facilidade executiva e tempo de obra. Diante disso, a análise computacional torna-se uma ferramenta essencial para avaliar o desempenho de cada sistema sob diferentes condições geométricas e de carregamento, auxiliando na tomada de decisão mais adequada para cada cenário de projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar comparativamente os sistemas de contenção em solo reforçado Terramesh e Terra Armada por meio de modelagem computacional, com o intuito de avaliar o desempenho estrutural de cada solução e propor critérios para sua escolha em projetos de engenharia civil.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, enumeram-se:

- Realizar uma revisão teórica sobre os princípios do solo reforçado e os conceitos fundamentais de estabilidade aplicados a sistemas de contenção;
- Apresentar as principais características construtivas dos sistemas Terramesh e Terra Armada, incluindo metodologia executiva, materiais e aplicações usuais;
- Modelar computacionalmente ambas as soluções utilizando o software Slide2, aplicando diferentes alturas de contenção para fins de comparação;
- Analisar os fatores de segurança obtidos para cada caso, considerando condições semelhantes de carregamento e propriedades geotécnicas;
- Identificar vantagens e limitações de cada sistema, com base em critérios técnicos e operacionais, como resistência global, tempo de execução e complexidade do

projeto;

- Fornecer subsídios técnicos que orientem a seleção da solução mais adequada conforme o contexto da obra.

1.3 Estrutura do trabalho

Capítulo 1: Faz-se a apresentação do tema, explicitando os objetivos que o trabalho visa alcançar.

Capítulo 2: É mostrado um referencial sobre o tema objeto de estudo, apresentando as estruturas de contenção a serem analisadas, as verificações necessárias e critérios de pré-dimensionamento.

Capítulo 3: Descreve a metodologia adotada para a análise comparativa entre os sistemas de contenção.

Capítulo 4: Apresenta um processo de pré-dimensionamento das geometrias, mostrando as propriedades geotécnicas e os reforços utilizados para cada tipo, além da análise de custo por metro quadrado de cada tipo construtivo.

Capítulo 5: Apresentam-se os resultados obtidos e uma análise e interpretação dos dados, apontando os desempenhos dos tipos construtivos por altura e fazendo-se uma análise de custo de cada estrutura dimensionada.

Capítulo 6: Apresentam-se as conclusões do trabalho em forma de considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

Na sequência, estão as referências utilizadas no estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo contextualizar o tema deste trabalho com base na revisão da literatura. Inicialmente, é abordado o conceito e a importância dos sistemas de contenção e reforço de solos em projetos geotécnicos. Em seguida, são apresentados os principais sistemas utilizados, destacando suas características, como a Terra Armada e o Terramesh. Por fim, são discutidas as normas técnicas brasileiras aplicáveis, que regulam a utilização desses sistemas, e a comparação entre as diferentes abordagens adotadas por essas tecnologias.

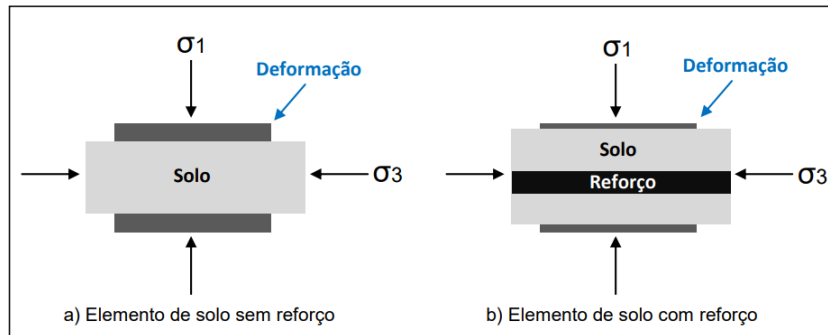
2.1. Sistemas de Contenção e Reforço de Solos

Os sistemas de contenção e reforço de solos são essenciais para garantir a estabilidade de taludes e outras estruturas geotécnicas, especialmente em regiões sujeitas a erosão e instabilidade do terreno. Tais sistemas visam reforçar o solo, aumentando sua resistência e garantindo sua durabilidade. A utilização de sistemas como Terra Armada e Terramesh é fundamental para garantir a segurança de projetos de engenharia, prevenindo rupturas e deslizamentos. Ambos os sistemas têm como base a técnica de solos reforçados, mas diferem em seus métodos de aplicação e materiais utilizados.

Esses sistemas podem ser empregados em diversas situações, como contenções de taludes, muros de arrimo, estabilização de encostas e outros tipos de obras geotécnicas. A escolha do sistema adequado depende das condições geotécnicas do local, como o tipo de solo, a carga que a estrutura suportará, e os requisitos de drenagem e flexibilidade.

Os solos, de maneira geral, apresentam alta resistência à compressão, mas possuem baixa resistência quando submetidos a esforços de tração. Sob carregamento vertical, uma massa de solo tende a sofrer compressão em sentido vertical e alongamento lateral (tração). No entanto, ao ser reforçado, os deslocamentos laterais são reduzidos devido à baixa deformabilidade do reforço inserido, como mostra-se na figura 1. Essa limitação nos deslocamentos ocorre porque o reforço é capaz de absorver e redistribuir os esforços de tração desenvolvidos na estrutura do solo.

Figura 1 - Deformação de um solo reforçado e um solo não reforçado.

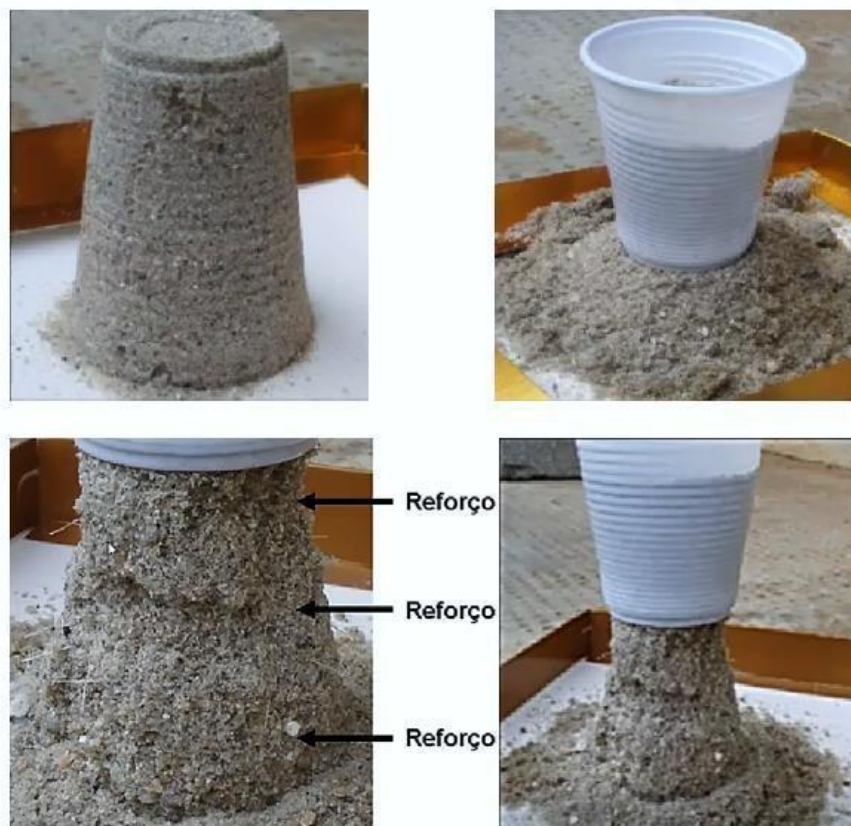


Fonte: Adaptada de manuais Maccaferri(2011).

A Figura 2 apresenta um experimento simples que ilustra a restrição das deformações laterais em uma massa de solo reforçado por elementos horizontais. No início, foi colocada areia compactada em um copo plástico, adquirindo a forma do recipiente após ser retirada (Figura 2a). Quando o copo, parcialmente preenchido com 70% de areia, foi submetido a uma carga vertical, o cone formado pela areia desmoronou imediatamente devido à falta de resistência interna e à ausência de restrição lateral (Figura 2b). Em seguida, o experimento foi repetido com a adição de três camadas de uma fina malha de polipropileno (Figura 2c). Nesse caso, a areia foi compactada com a mesma umidade e energia utilizadas no experimento anterior. O objetivo do reforço com a malha de polipropileno foi evitar os movimentos laterais provocados pela carga vertical. Quando a mesma carga externa foi aplicada, o cone de areia reforçado se manteve estável e foi capaz de suportar a carga sem apresentar colapso (Figura 2d). Esse experimento demonstra, de forma didática, o conceito de reforço de solo, evidenciando que a introdução de um elemento sintético aumenta a resistência do conjunto solo-reforço, proporcionando maior estabilidade e evitando deformações indesejáveis.

Figura 2 - Experimento de reforço dos solos. 2.a) Primeiro cone de areia compactada, extraído de um copo plástico. 2.b) Ruptura do cone de areia compactada carregado verticalmente. 3.a) Segundo cone de areia compactada, esse com 3 camadas de malha de polipropileno, extraído do mesmo molde. 4.a) Cone de areia reforçado com



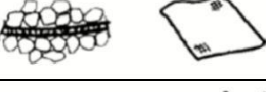
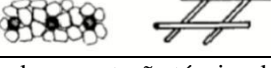
malhas de polipropileno carregado verticalmente.



Fonte: Adaptada de manuais Maccaferri.

De modo geral, os sistemas de contenção em solo reforçado podem empregar distintos tipos de reforços, os quais se classificam conforme sua forma geométrica e seu mecanismo de interação com o solo. Os reforços lineares, como as fitas metálicas lisas ou rugosas, atuam predominantemente por atrito, sendo que as rugosas também promovem uma parcela de travamento mecânico entre o solo e as irregularidades superficiais. Já os reforços planares, como os geotêxteis e geogrelhas (ou geomalhas), além do atrito superficial, favorecem o travamento das partículas do solo dentro da estrutura do material. A Tabela 1 sintetiza os principais tipos de reforços e seus mecanismos de atuação:

Tabela 1 – Principais tipos de reforços e seus mecanismos de interação

Tipo de Reforço	Representação	Mecanismo de Interação
Fita Metálica Lisa		Atrito
Fita Metálica Rugosa		Atrito + Travamento (Baixa intensidade)
Geotêxtil		Atrito
Geogrelha (Geomalha)		Atrito + Travamento

Fonte: Adaptado de documentação técnica da Maccaferri.

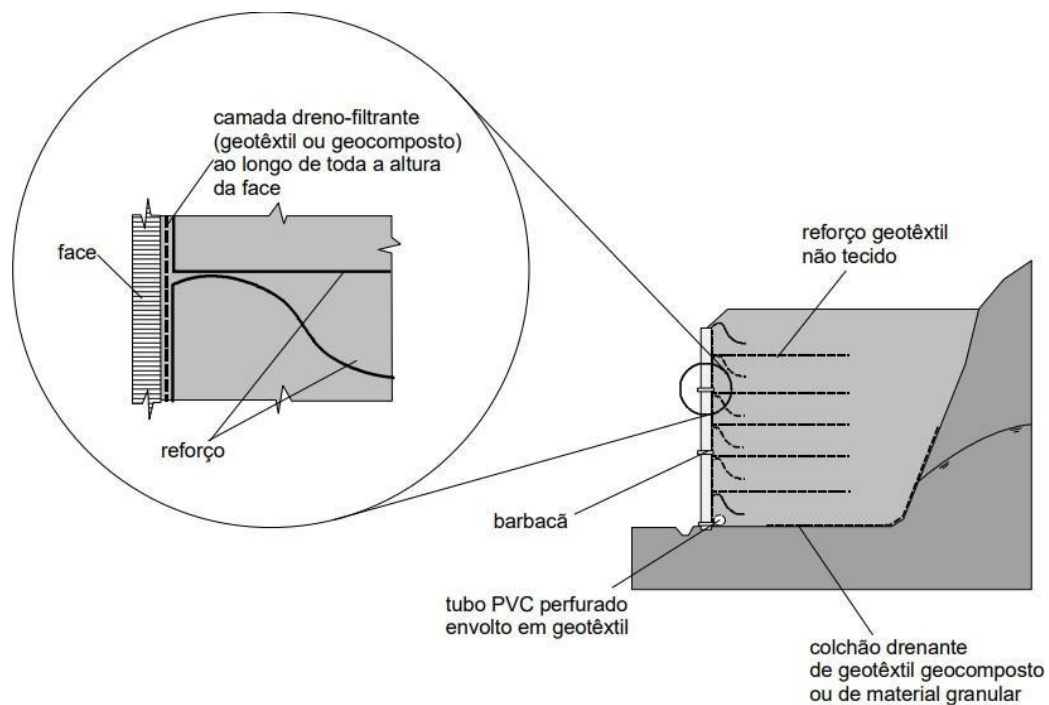
No contexto de estruturas de contenção reforçadas, como Terra Armada e Terramesh, a compactação adequada do aterro é essencial para garantir a interação eficiente entre o solo e os elementos de reforço, bem como para minimizar recalques diferenciais e garantir a estabilidade global da estrutura. O objetivo da compactação é reduzir o índice de vazios no solo por meio da aplicação de energia mecânica, aumentando sua densidade e melhorando suas propriedades estruturais. De acordo com Das (2016), a compactação adequada do solo melhora significativamente sua resistência e estabilidade, reduzindo os riscos de deformação excessiva e colapso da estrutura ao longo do tempo. Para que a compactação seja eficiente, é necessário considerar fatores como a umidade ótima do solo, a energia de compactação aplicada e a espessura das camadas compactadas. A umidade ótima é determinada por meio do ensaio Proctor, que estabelece a relação entre a densidade seca do solo e o teor de umidade, identificando o ponto em que a compactação atinge sua máxima eficiência. Além disso, a espessura das camadas de solo compactado deve ser controlada para garantir que a energia de compactação seja distribuída uniformemente, evitando zonas de baixa densidade que possam comprometer a estabilidade da estrutura.

Em aplicações de solo reforçado, a compactação também desempenha um papel crucial na interação entre o solo e os elementos de reforço. No sistema de Terra Armada, os reforços metálicos ou sintéticos são inseridos em camadas compactadas de solo granular, garantindo a transferência eficiente de esforços e impedindo deslizamentos internos. Enquanto no sistema Terramesh, a compactação deve ser realizada de forma a garantir o travamento adequado entre o aterro e a estrutura modular, promovendo a estabilidade do

conjunto e evitando recalques diferenciais.

Considerando que o principal objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre os sistemas de contenção em solo reforçado Terra Armada e Terramesh, o sistema de drenagem não é abordado nas análises. Essa decisão se justifica pelo fato de que tais estruturas, quando executadas com aterro de material granular devidamente compactado, apresentam boa capacidade de drenagem interna, não exigindo projetos de drenagem complementares complexos para fins comparativos. Entretanto, em aplicações reais, é fundamental que se especifique um sistema de drenagem adequado, de modo a garantir a estabilidade e a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. Entre os dispositivos comumente utilizados, destacam-se os drenos horizontais e verticais, colchões drenantes com geotêxteis, barbacãs e sistemas de coleta e escoamento de água na base da contenção. A figura 3 mostra alguns desses exemplos:

Figura 3 – Dispositivos de drenagem

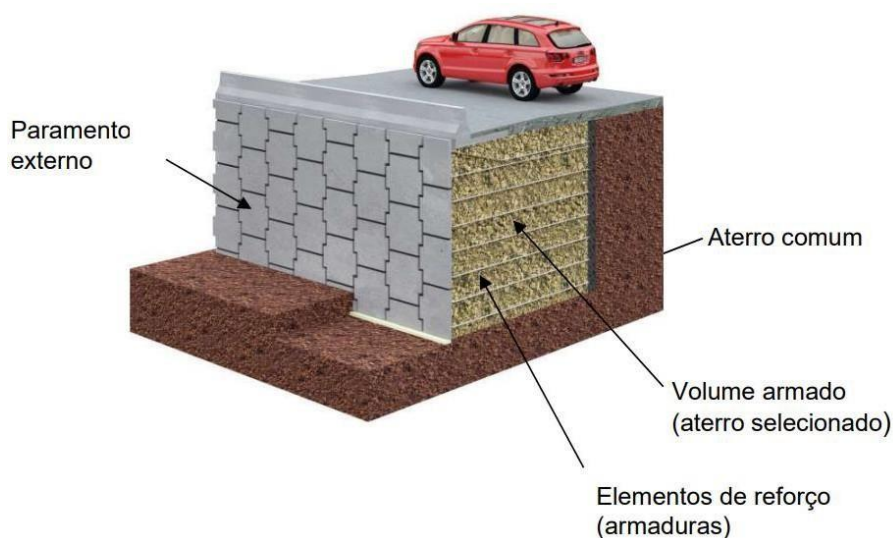


Fonte: Manual GeoRIO(1999).

2.1.1. Terra Armada

A Terra Armada é um sistema desenvolvido por Henri Vidal(1966), baseado na interação entre o solo compactado e elementos de reforço dispostos em camadas horizontais, como demonstra a figura 4. Esses reforços, que podem ser metálicos ou sintéticos, têm a função de aumentar a resistência do solo a esforços cisalhantes e compressivos, conferindo maior estabilidade ao maciço terroso, além de um paramento externo modular e flexível capaz de suportar as tensões de bordo.

Figura 4 - Ilustração do sistema de contenção Terra Armada.



Fonte: Grupo Vinci(2014).

O sistema de Terra Armada tem como finalidade redistribuir a pressão dentro do talude por meio da instalação progressiva de placas de concreto pré-moldadas, figura 5, associadas a tiras metálicas fixadas nessas placas (Highland E Bobrowsky, 2008; Corsini, 2012). Conforme observado por Dyminski (2010), essas placas não desempenham função estrutural, servindo apenas como proteção superficial do talude.

Figura 5 - Geometrias das escamas.



Fonte: Silva, 2012.

A estabilidade da Terra Armada depende da interação entre o solo e os elementos de reforço, sendo essencial que o material de aterro possua características adequadas para garantir essa ligação. O solo deve apresentar um elevado ângulo de atrito interno, favorecendo a aderência com os reforços, o que é mais eficaz quando são utilizados materiais granulares e há baixa presença de finos (SILVA, 2012).

Um desafio do sistema de Terra Armada é a dependência de materiais específicos. O acesso a esses materiais pode ser limitado, especialmente em regiões onde não estão facilmente disponíveis, o que pode aumentar os custos e o tempo de execução do projeto. A escolha inadequada do material de aterro pode comprometer a drenagem e a estabilidade do sistema.

A construção de um muro de Terra Armada ocorre em etapas sequenciais que garantem sua eficiência estrutural e funcionalidade. A figura 6 apresenta essas etapas, onde, inicialmente, procede-se à escavação e preparação da fundação, que consiste na execução de uma soleira de concreto para fins de nivelamento e regularização do primeiro nível de escamas, proporcionando uma base estável para a estrutura. Em seguida, as placas de concreto pré-moldadas são posicionadas conforme o projeto, compondo a face do muro. Paralelamente, as tiras metálicas ou sintéticas são instaladas e conectadas às placas, estendendo-se para dentro do maciço de solo para proporcionar o reforço necessário. Conforme ressaltado por Palmeira (2004), a interação solo-reforço é um dos principais fatores responsáveis pelo desempenho adequado das estruturas em solo reforçado, evidenciando a importância da compactação rigorosa do solo em camadas sucessivas. O processo é repetido até que a estrutura atinja a altura projetada, garantindo a estabilidade e a resistência às cargas atuantes.

Figura 6 - Processo construtivo do sistema Terra Armada



Fonte: Adaptado de Blog Pedreira(2015).

As principais vantagens da Terra Armada incluem sua elevada capacidade de suporte, resistência estrutural e adaptabilidade a recalques diferenciais. É um sistema muito eficaz para obras de grande porte, como viadutos, pontes e grandes muros de contenção, onde as pressões horizontais são elevadas. Um exemplo é o trecho do Autódromo de Interlagos, em São Paulo - SP, construído com o sistema de Terra Armada, figura 7, que possui aproximadamente 300 metros de extensão e 10 metros de altura.

Figura 7 - Obra realizada em Terra Armada no Autódromo José Carlos Pace, em São Paulo - SP.

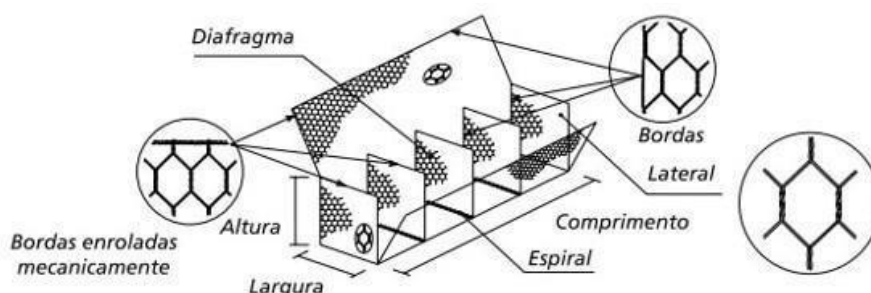


Fonte: B2A Contenções.

2.1.2. Terramesh

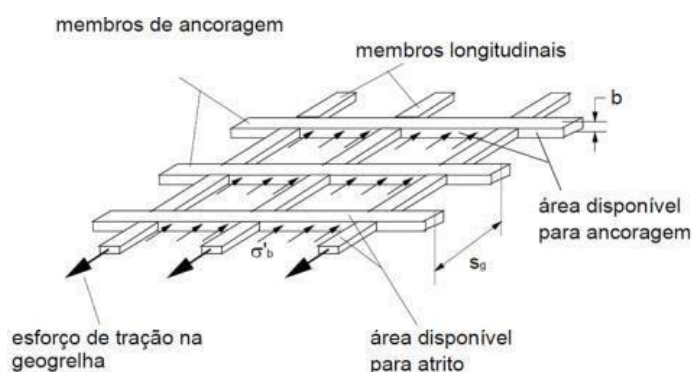
O sistema Terramesh é uma solução flexível e permeável que combina gabiões e geogrelhas, desenvolvido pela Maccaferri. Os gabiões (figura 8), formados por malhas de arame galvanizado ou revestido com PVC, são preenchidos com pedras e funcionam como elementos drenantes, permitindo a dissipação da pressão hidrostática e reduzindo os riscos de erosão. As geogrelhas (figura 9), por sua vez, proporcionam reforço estrutural, aumentando a estabilidade do conjunto e minimizando deslocamentos diferenciais. Segundo Jewell (1996) o reforço atua duplamente como estabilizante do solo, seja através da redução da carga atuante sobre o solo, seja aumentando a resistência ao colapso.

Figura 8 - Gabião.



Fonte: Catálogos Maccaferri.

Figura 9 - Ilustração da estrutura de uma geogrelha.



Fonte: Silva, 2003.

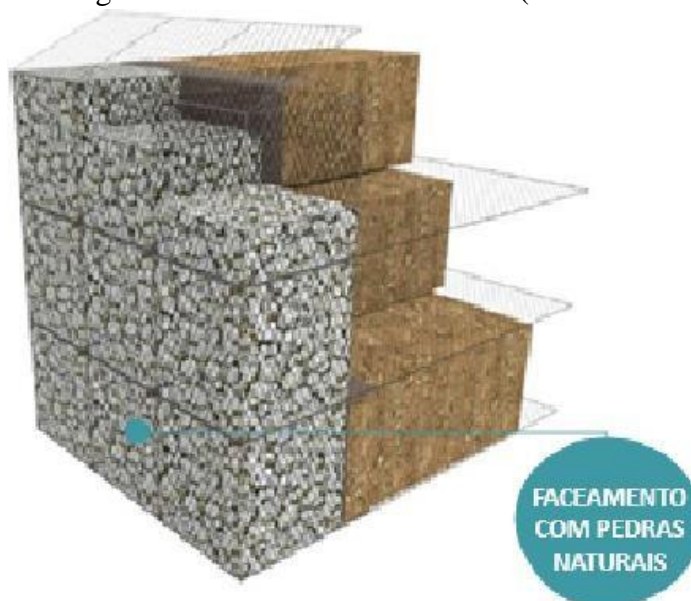
Segundo a Maccaferri, o Sistema Terramesh é uma solução modular de contenção em solo reforçado composta por unidades pré-montadas de malha hexagonal de dupla torção, revestidas com Polimac — um revestimento polimérico de alta performance, quimicamente inerte e resistente a ambientes agressivos e abrasivos — tipo 8x10. Essas unidades são projetadas para serem montadas diretamente no canteiro de obras, garantindo alta

capacidade de ancoragem e facilidade construtiva. O sistema é altamente eficaz na formação de taludes e contenções, com a possibilidade de utilizar três tipos distintos de face: Terramesh, Terramesh Verde e Terramesh Mineral.

1. Terramesh (Sistema Gabião): Esse modelo consiste em um sistema de contenção formado pela associação do elemento de reforço em malha hexagonal de dupla torção com a face frontal, criando um painel contínuo como ilustrado na figura

10. Após a instalação das unidades, a face é preenchida com pedras adequadas, e o aterro é compactado entre as camadas de reforço, formando uma estrutura de contenção estável e eficiente.

Figura 10 - Terramesh Tradicional (Sistema Gabião).

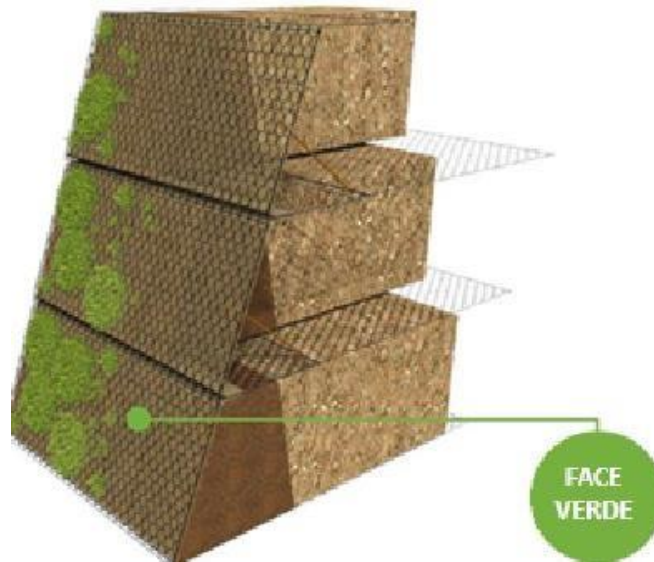


Fonte: Catálogos Maccaferri.

2. Terramesh Verde (Face Vegetada): O Terramesh Verde (figura 11) é uma variante com menor impacto ambiental, indicada para a formação de taludes com vegetação natural. Além da malha de arame de dupla torção, esse sistema conta com uma geomanta MacMat para controle de erosão e malha soldada na face posterior. A face frontal inclinada facilita o crescimento da vegetação, sendo ideal para projetos em áreas que exigem integração com o meio ambiente. A instalação da unidade é feita diretamente no local, sendo que os ângulos da face proporcionam suporte, dispensando o uso de moldes ou gabaritos externos. O aterro é compactado, recomendando-se o uso de solo vegetal próximo à face para auxiliar no crescimento

da vegetação.

Figura 11 - Terramesh Verde.



Fonte: Catálogos Maccaferri.

3. Terramesh Mineral (Face Arquitetônica): Este sistema apresenta um acabamento superficial com pedras, como mostra a figura 12, e é projetado para ser facilmente instalado no local, com alta durabilidade (120 anos). As unidades são pré-montadas e não requerem formas ou gabaritos, devido à rigidez das malhas soldadas, que mantêm a superfície no ângulo correto durante a construção. É ideal para projetos que necessitam de uma estética arquitetônica, combinando funcionalidade com acabamento visualmente agradável.

Figura 12 - Terramesh Mineral.



Fonte: Catálogos Maccaferri.

Uma das principais vantagens do Terramesh é sua alta permeabilidade, que o torna ideal para regiões com altos índices pluviométricos ou solos suscetíveis à saturação, como na obra do Jardim São Camilo, em Jundiaí – SP, que conta com 12 metros de altura e 60 metros de extensão, representada na figura 13. O sistema permite que a água seja drenada eficientemente, o que previne o acúmulo de pressão no solo e ajuda a evitar deslizamentos. Além disso, sua flexibilidade permite a adaptação a recalques diferenciais sem comprometer a integridade da estrutura, o que torna o sistema bastante adequado para terrenos instáveis e áreas de difícil acesso.

Figura 13 - Obra realizada em Terramesh no Jardim São Camilo, em Jundiaí - SP.



Fonte: Catálogos Maccaferri.

As normas técnicas que regulam a utilização dos gabiões e geossintéticos no Brasil incluem a NBR 11682:2009 e NBR 10514:1988.

Este trabalho tem como foco o Terramesh Tradicional, abordando sua aplicação em obras de contenção e suas especificidades construtivas.

2.2 Aplicações Normativas – NBR 16920-1:2021

Um dos desafios dos sistemas de contenção é a proteção contra a corrosão das faixas metálicas, que pode comprometer sua durabilidade, especialmente em regiões com alta umidade ou solos agressivos. Os reforços utilizados em sistemas de Terra Armada

frequentemente incluem tiras metálicas, que são suscetíveis à corrosão ao longo do tempo. Embora tratamentos anticorrosivos, como galvanização ou revestimentos especiais, possam ser aplicados, a exposição constante à água ou a agentes corrosivos pode reduzir a vida útil do sistema, comprometendo a resistência e a durabilidade da estrutura. A ABNT NBR 16920-1:2021 estabelece critérios técnicos para o uso de materiais metálicos, como a aplicação de uma espessura de sacrifício, como mostra a Tabela 2. Em locais sujeitos a alta corrosividade, como áreas costeiras ou solos ácidos, a utilização de materiais alternativos, como tiras sintéticas ou plásticas, pode ser considerada.

Tabela 2 – Espessura de sacrifício para reforços

Classificação da obra	Vida útil mínima projetada							
	5 anos		30 anos		50 anos		70 anos	
	Material da armadura [mm]							
	A	AZ	A	AZ	A	AZ	A	AZ
Obras não inundáveis	0,50	0	1,50	0,50	2,25	0,75	3,00	1,00
Obras inundáveis por água doce	0,50	0	2,00	1,00	3,00	1,25	4,00	1,50
Obras inundáveis por água salgada	1,00	0	3,00	3,00	4,00	4,00	5,00	5,00
Obras especiais	A ser determinado em cada caso, por estudo especial.							

A = aço de baixo teor de carbono sem revestimento.
AZ = aço galvanizado.

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 16920-1:2021.

O material utilizado no aterro de estruturas em solo reforçado deve ser escolhido com cuidado, garantindo que não contenha substâncias como turfas, argilas orgânicas moles ou outros materiais que possam comprometer o desempenho do projeto. Para caracterizar adequadamente o material do aterro, é necessário realizar determinados ensaios, conforme estipulado pela norma. O projetista deve também especificar os ensaios mais

adequados para avaliar a resistência e a expansibilidade do solo. A utilização de solos expansivos não é recomendada, pois pode afetar negativamente o desempenho da estrutura. Em situações excepcionais, a utilização desses solos pode ser considerada, desde que o projetista faça uma análise detalhada da sua expansibilidade e dos impactos potenciais no comportamento do aterro, podendo também solicitar ensaios especiais.

A norma também define o valor de atrito solo-armadura de acordo com o tipo de solo utilizado no aterro, como mostra a figura 14:

Figura 14 – Atrito solo-armadura

Solo grupo	Granulometria e IP	Atrito interno	Atrito solo-armadura
A (Arenoso)	$0,075 \text{ mm} \leq D_{15}$ ou $0,020 \text{ mm} \leq D_{10}$	Critério mecânico atendido	
B (Arenoso)	$D_{20} \geq 0,020 \text{ mm} > D_{10}$ e $IP < 6$	Critério mecânico atendido	
C (Intermediário) Obras protegidas de águas superficiais e subterrâneas	$D_{40} \geq 0,020 \text{ mm} > D_{20}$ e $IP < 25$	Se $\phi \geq 30^\circ$ $f_1^* = f_0^* \times \frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}36^\circ}$ Critério mecânico atendido Utilização limitada a casos especiais com menor restrição a deformações horizontais	
D (Intermediário)	$D_{40} \geq 0,020 \text{ mm} > D_{20}$ e $IP < 25$	Se $30^\circ > \phi \geq 25^\circ$ Critério mecânico atendido Utilização limitada a casos especiais com menor restrição a deformações horizontais	
E (fino)	$0,020 \text{ mm} > D_{40}$ ou $IP > 25$	Ou $\phi < 25^\circ$	Não recomendado.

NOTA 1 ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, determinado por ensaio de cisalhamento direto rápido, sobre a amostra moldada na umidade ótima e compactada até atingir 95 % do peso específico aparente, seco e máximo do ensaio de compactação com energia Proctor Normal.

NOTA 2 D_n é o diâmetro correspondente à porcentagem passante de n % na curva granulométrica.

Fonte: NBR 16920-1(ABNT, 2021).

Na ABNT NBR 16920-1:2021, a respeito do material de preenchimento de faces (como no caso do Terramesh), consta que “os agregados ou solos a serem utilizados devem apresentar em projeto as características mecânicas e durabilidade compatível com a obra, bem como dimensionais definidas em função do tipo e abertura de malha utilizada. A

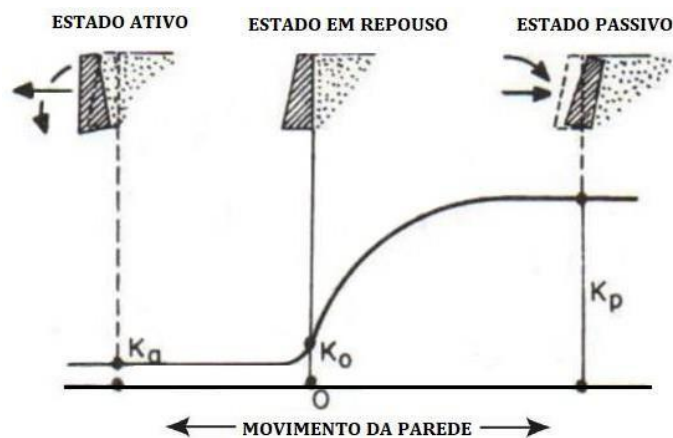
possibilidade de erosão interna entre materiais de granulometrias diferentes deve ser verificada e, caso necessário, deve ser executada uma zona de transição ou aplicação de filtro geossintético”.

2.3 Empuxo

O empuxo de terra é a força exercida pelo solo sobre as estruturas de contenção, resultante da interação entre o solo e a estrutura de contenção. Esse fenômeno é fundamental no dimensionamento de muros de arrimo, taludes e outras estruturas geotécnicas, pois o empuxo exerce grande influência na estabilidade e segurança dessas construções. O empuxo pode ser classificado em empuxo ativo e empuxo passivo, dependendo do movimento relativo entre a estrutura e o solo.

A figura 15 apresenta os diferentes tipos de empuxo e seus respectivos deslocamentos. O empuxo ativo, ocorre quando a estrutura se move para longe do maciço terroso, o que reduz a pressão lateral do solo até atingir o ponto de equilíbrio, no qual a estrutura não se move mais. Enquanto o empuxo passivo acontece quando a estrutura se move em direção ao solo, aumentando a pressão lateral até que a resistência do solo se torne maior que a força aplicada pela estrutura, impedindo novos deslocamentos.

Figura 15 - Movimento da parede em relação ao tipo de empuxo.



Fonte: Adaptado de Guia da Engenharia(2021).

Para calcular o empuxo, duas teorias amplamente utilizadas são a teoria de Rankine e a teoria de Coulomb, que fornecem métodos para determinar o coeficiente de empuxo ativo com abordagens distintas. Em ambas, o empuxo total é obtido por meio da equação 1:

$$E = \int_0^H K_a \cdot \sigma_h \cdot dz \quad (1)$$

Assim, tem-se a equação 2 para o empuxo ativo (E_a) e a equação 3 para empuxo passivo (E_p):

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_a \cdot H^2 - 2 \cdot c \cdot H \cdot K_a \quad (2)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_p \cdot H^2 + 2 \cdot c \cdot H \cdot K_p \quad (3)$$

Os métodos de cálculo de empuxo abordados neste tópico consideram apenas a força exercida pelo retroaterro sobre o muro, assumindo que este possua um sistema de drenagem eficiente. Entretanto, caso a estrutura seja impermeável ou apresente falhas no sistema de drenagem, o acúmulo de água no retroaterro pode ocorrer, especialmente em períodos de chuvas intensas. Esse acúmulo altera significativamente as condições de estabilidade da contenção, pois a água reduz a resistência ao cisalhamento do solo e aumenta a pressão lateral exercida sobre a estrutura.

Nessas circunstâncias, além do empuxo do solo, o muro estará sujeito ao empuxo hidrostático gerado pela presença da água, o que pode comprometer sua estabilidade. Para mitigar esse problema, é fundamental prever sistemas de drenagem adequados, como drenos horizontais, geodrenos ou tubos perfurados, garantindo a dissipação eficiente da água e a segurança da estrutura.

2.3.1 Teoria de Rankine

A teoria de Rankine assume que o solo esteja em um dos estados limites de equilíbrio.

Para sua aplicação, a teoria considera algumas hipóteses simplificadoras:

- Solo isotrópico e homogêneo;
- Superfície do terreno plana;
- A ruptura ocorre sob o estado plano de deformação em equilíbrio plástico (iminência da ruptura);
- Muro perfeitamente liso (atrito solo-muro: $\delta = 0$) e de profundidade infinita;
- Os empuxos de terra atuam paralelamente à superfície do terreno;
- A parede da estrutura em contato com o solo é vertical.

Para taludes com inclinação α , os coeficientes de empuxo ativo (K_a) e empuxo passivo (K_p) são dados pelas equações 4 e 5, respectivamente:

$$K_a = \cos \alpha \cdot \frac{\cos \alpha - \sqrt{(\cos \alpha)^2 - (\cos \emptyset)^2}}{\cos \alpha + \sqrt{(\cos \alpha)^2 - (\cos \emptyset)^2}} \quad (4)$$

$$K_p = \cos \alpha \cdot \frac{\cos \alpha + \sqrt{(\cos \alpha)^2 - (\cos \emptyset)^2}}{\cos \alpha - \sqrt{(\cos \alpha)^2 - (\cos \emptyset)^2}} \quad (5)$$

Para os casos em que $\alpha=0$, as equações 4 e 5 são simplificadas nas equações 6 e 7, respectivamente:

$$K_a = \frac{1 - \sin \emptyset}{1 + \sin \emptyset} = \tan^2(45^\circ - \emptyset/2) \quad (6)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \emptyset}{1 - \sin \emptyset} = \tan^2(45^\circ + \emptyset/2) \quad (7)$$

2.3.2 Teoria de Coulomb

A teoria de Coulomb adota condição de equilíbrio limite e que o estado plástico se desenvolve numa cunha (como um bloco rígido). Para sua aplicação, a teoria considera algumas hipóteses simplificadoras:

- Solo homogêneo e isotrópico;
- A ruptura ocorre sob o estado plano de deformação;
- Pode existir atrito solo-muro (δ), isto é, em qualquer ponto da parede haverá a mobilização de resistência ao cisalhamento, por unidade de área, e uma componente de adesão na parede;
- Uma pequena deformação da parede é suficiente para mobilizar o estado limite;

Para taludes com inclinação α , os coeficientes de empuxo ativo(K_a) e empuxo passivo(K_p) são respectivamente dados pelas equações 8 e 9:

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \emptyset)}{\sin^2(\alpha) \cdot \sin(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \cdot \sin(\emptyset - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (8)$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \emptyset)}{\sin^2(\alpha) \cdot \sin(\alpha + \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \cdot \sin(\emptyset + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (9)$$

Valores de “ δ ” para diferentes materiais em contato com concreto ou alvenaria são apresentados na tabela 3:

Tabela 3 – Valores de ângulo de atrito solo-muro para diferentes materiais.

Estrutura	Material de retroaterro	Ângulo de atrito (δ)
Concreto ou Alvenaria	Pedregulho	29–31
	Misturas de areia e pedregulho	
	Areia grossa	
	Areia fina	24–29
	Areia média a grossa, siltosa	
	Pedregulho siltoso ou argiloso	
Areia fina	19–24	
Areia fina a média, siltosa ou argilosa		

Fonte: Bowles, 1977 apud Gerscovich, Danziger e Saramago, 2016.

2.4 Verificações

Henriques (2012) destaca que o dimensionamento de contenções envolve três verificações essenciais. A primeira é a análise da estabilidade externa, que garante que a massa de solo reforçada resista às solicitações externas aplicadas. Em seguida, a análise da estabilidade interna avalia a interação entre o solo e os elementos de reforço, assegurando a adequada transferência de esforços. Assim, a análise da estabilidade global do maciço verifica a segurança da região abrangendo a obra e seu entorno.

Segundo a NBR 16920-1:2021, para garantir a estabilidade de estruturas de solo reforçado, devem ser considerados os fatores de segurança tanto para a estabilidade externa (relacionada ao muro em solo reforçado), mostrados na tabela 4, quanto para a estabilidade global (relacionada ao solo), mostrado pelas tabelas 5, 6 e 7:

Tabela 4 - Requisitos para estabilidade de muros de contenção

	Verificação	Fator de Segurança
Externa	Tensão admissível da fundação	2,0
	Deslizamento	1,5
	Tombamento	2,0
Interna	Ruptura estrutural do reforço	1,5
	Arrancamento do reforço	1,5
Geral	Ver tabelas A1, A2 e A3	

Fonte: Adaptado de norma NBR 16920-1(ABNT, 2021).

Tabela 5 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	<p>Áreas com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas: Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Vias públicas de centros urbanos. Edifcações ocupadas (residências, escolas, estádios, prédios comerciais, indústrias e fábricas). Construções e/ou áreas com bens ou produtos perigosos (barragens de água e rejeito).</p>
Médio	<p>Áreas com movimentação e permanência restrita de pessoas: Fora da via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego moderado. Vias de serviço. Áreas de espera de serviços públicos em centros urbanos (plataformas de trem e metrô, pontos de ônibus). Instalações de edifcações (estacionamentos, vias internas, áreas de lazer).</p>
Baixo	<p>Áreas com movimentação e permanência eventual de pessoas: Vias de ferrovias e rodovias de tráfego reduzido. Vias rurais. Áreas públicas abertas em centros urbanos (praças, estacionamentos, parques). Obras rurais. Obras temporárias com circulação restrita de pessoas e com equipe de obra e/ou monitoramento em operação.</p>

Fonte: Adaptado de norma NBR 16920-1(ABNT, 2021).

Tabela 6 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais por elevado período de tempo. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves (oleodutos, aterros sanitários, barragens de rejeito).
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado, vias e estradas principais de acesso e áreas que afetem serviços essenciais por curto período de tempo. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados (vias com circulação de produtos perigosos e fábricas de produtos químicos tóxicos próximos a áreas de proteção ambiental).
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido e vias e estradas secundárias de acesso. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: Adaptado de norma NBR 16920-1(ABNT, 2021).

Tabela 7 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

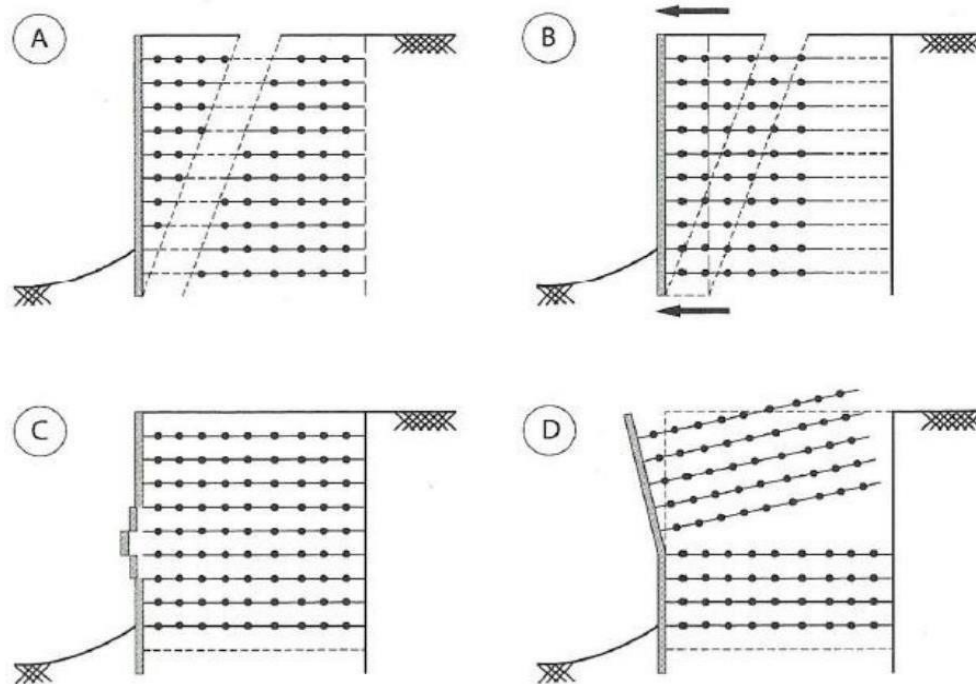
Fonte: Adaptado de norma NBR 16920-1(ABNT, 2021).

2.5 Estabilidade Interna

Na análise da estabilidade interna são checadas as possíveis falhas que podem ocorrer dentro do maciço reforçado, como a ruptura, o arrancamento do reforço, desprendimento da face e instabilidade local, mostrado na figura 16, e determina-se a provável superfície de ruptura dentro do bloco, mostrado nas figuras 17 e 18, a qual divide o maciço reforçado em zona ativa, onde as tensões de cisalhamento são direcionadas para a parte frontal da

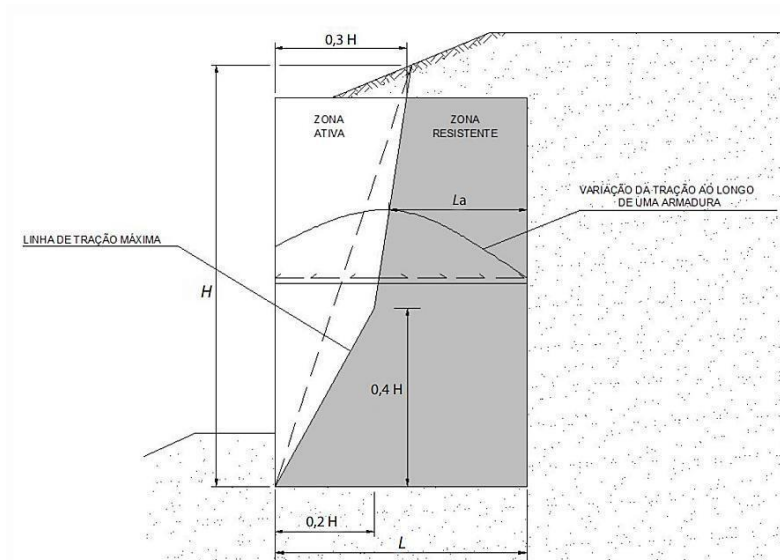
estrutura, e zona resistente, onde as tensões de cisalhamento são direcionadas para a parte do tardo do bloco reforçado.

Figura 16 - Mecanismos para verificação da estabilidade interna. a) Ruptura dos reforços. b) Arrancamento dos reforços. c) Desprendimento da face. d) Instabilidade local.



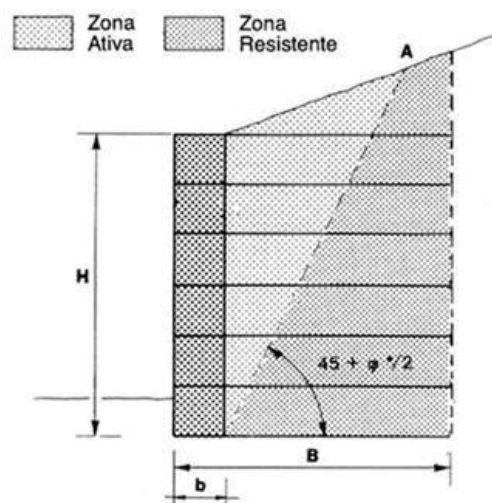
Fonte: Ehrlich, 2004 Apud Ehrlich, A, Christopher, Berg, 2001.

Figura 17 – Provável superfície de ruptura. Fonte: Norma ABNT NBR 16920-1:2021.



Fonte: Norma ABNT NBR 16920-1(ABNT, 2021).

Figura 18 - Provável superfície de ruptura para reforços extensíveis.



Fonte: Adaptado de Manuais Maccaferri.

2.5.1 Cálculo do esforço máximo de tração em cada nível de reforço

O esforço solicitante máximo de tração em cada armadura, em cada nível, definido como $T_{\text{máx}}$, é calculado pela equação 10:

$$T_{\text{máx}} = \frac{\Delta H}{N} * \sigma_3 \quad (10)$$

Sendo:

$\Delta\sigma_3$ - o acréscimo de tensão horizontal proveniente de esforços horizontais externos de qualquer natureza;

ΔH - Espaçamento vertical entre duas camadas de armaduras; N

- Unidades por metro linear longitudinal de paramento;

K - Coeficiente de empuxo adequado à hipótese de cálculo;

σ_3 - Tensão horizontal principal, dado por:

$$\sigma_3 = K * \sigma_1 + \Delta\sigma_3 \quad (11)$$

σ_1 - Tensão vertical principal.

2.5.2 Verificação dos reforços à tração

Em relação aos critérios de resistência à tração das reforços, deve-se considerar duas seções críticas: a seção submetida à $T_{\text{máx}}$, que ocorre no interior do maciço, e a seção de fixação da armadura ao paramento, onde, devido ao furo para passagem do parafuso, ocorre uma redução da seção. Na última seção, a força de tração é reduzida, sendo sempre inferior a

$\alpha * T_{\text{máx}}$.

Assim, tem-se duas condições a serem verificadas, representadas nas equações 12 e 13:

$$T_{\text{máx}} \leq T_{r1} = \frac{1}{\gamma_r} * T_r * \frac{e_c}{e_0} \quad (12)$$

E:

$$\alpha * T_{\text{máx}} \leq T_{r2} = \frac{1}{\gamma_r} * T_r * \frac{b'}{b} * \frac{e_c}{e_0} \quad (13)$$

Onde:

T_{r1} - Força-limite de tração no reforço, em seção plena, afetada pela redução da espessura de sacrifício e pelo coeficiente de segurança, expressa em quilonewtons (kN);

γ_r - Coeficiente de segurança à tração que deve ser igual ou superior a 1,50;

T_r - Carga correspondente ao limite elástico (f_y , expresso em kPa) na seção plena da armadura, expressa em quilonewtons (kN), sendo:

$$T_r = f_y * e_0 * b \quad (14)$$

Sendo:

e_0 - Espessura nominal do reforço, expressa em metros (m);

e_c - Espessura de cálculo, expressa em metros (m);

T_{r2} - Força-limite de tração no reforço, na seção do furo, afetada pela redução da espessura de sacrifício e pelo coeficiente de segurança, expressa em quilonewtons (kN); b - Largura nominal do reforço, expressa em metros (m);

b' - Largura reduzida pelo furo, expressa em metros (m);

$\alpha = 0,75$ para paramentos flexíveis; $0,85$ para paramentos semiflexíveis; $1,00$ para paramentos rígidos.

2.5.3 Verificação dos reforços à aderência

A verificação das reforços quanto à aderência tem como objetivo garantir que eles não deslizem quando submetidos ao esforço de tração. Assim, a força de tração $T_{\text{máx}}$ deve ser igual ou inferior à força-limite resistente de aderência, denotada por T_f , que é calculada para cada nível z de reforço, conforme descrito pela equação 15:

$$T_{\text{máx}} \leq T_f = \frac{1}{\gamma_r} * f^*(z) * \sigma_v(z) * L_r(z) \quad (15)$$

Onde:

$f^*(z)$ - Coeficiente de atrito aparente de cálculo atuante no nível z ;

$\sigma_v(z)$ - Tensão vertical atuante no nível z , expressa em quilopascal (kPa);

$L_r(z)$ - Comprimento do reforço na zona resistente no nível z , expressa em metros (m);

2.5.4 Desprendimento da face e Instabilidade local

Conforme Ehrlich e Becker (2020), embora o sistema de faceamento seja essencial para a aparência final da estrutura, ele não exerce um papel significativo na estabilidade interna da massa de solo reforçado. Sua principal função mecânica é assegurar a estabilidade das porções de solo situadas entre as camadas de geossintéticos, especialmente nas regiões próximas à face. O equilíbrio global poderia ser alcançado mesmo sem a presença do faceamento.

Ainda de acordo com Ehrlich e Becker (2020), a ligação entre os reforços e a face deve permitir a transmissão das forças de tração remanescentes no reforço. Normalmente, as conexões apresentam resistência inferior à dos reforços; contudo, a carga máxima atuante na conexão junto à face (T_0) tende a ser menor do que a carga máxima no reforço ($T_{\text{máx}}$). Para garantir um sistema de contenção eficiente em solo reforçado, a resistência admissível da conexão deve ser superior a T_0 , prevenindo-se assim o desprendimento dos reforços na face. Assim, como ocorre em outros sistemas de contenção incremental, é fundamental avaliar a possível instabilidade de determinados trechos da estrutura.

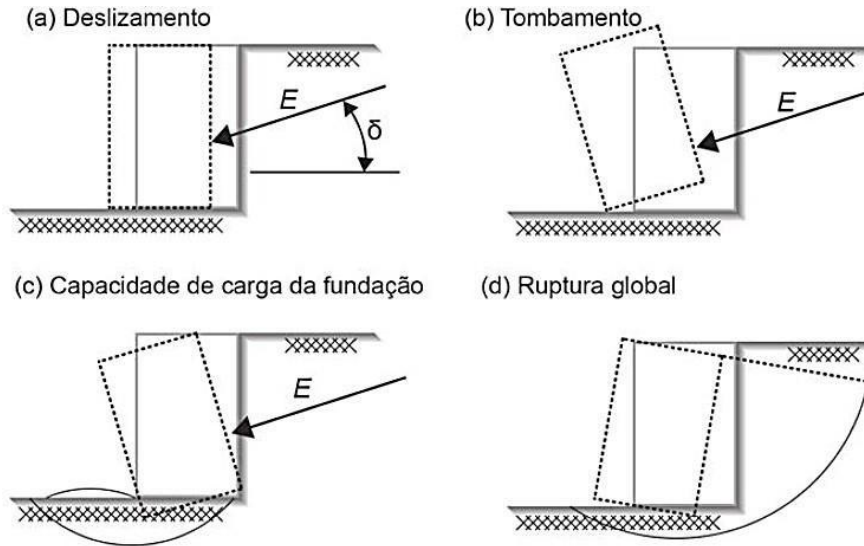
2.6. Estabilidade Externa e Global

A verificação da estabilidade dos muros de contenção em solo reforçado deve considerar tanto a interação da estrutura com o solo de fundação quanto a segurança do maciço como um todo. Para garantir a estabilidade externa, é fundamental avaliar o risco de deslizamento da base, tombamento da estrutura e a distribuição das pressões sobre a fundação, como mostra a figura

19. Além disso, a análise de estabilidade global verifica a possibilidade de ruptura global, englobando não apenas o muro, mas também o solo adjacente e a fundação, prevenindo

falhas que possam comprometer toda a estrutura.

Figura 19 - Tipos de análise na verificação da estabilidade externa de estruturas reforçadas.



Fonte: Vertematti, 2004.

2.6.1 Deslizamento

Com base na teoria de Rankine para o cálculo do empuxo de terra, é possível determinar a largura da base (B_d) do maciço reforçado de forma a atender ao fator de segurança (FS_d) mínimo contra o deslizamento igual a 1,5. Essa verificação é feita por meio da análise do equilíbrio do sistema, utilizando a equação 16:

$$B_d = \frac{FS_d * E}{(\gamma_1 * H + q) * tg \Phi} \quad (16)$$

Sendo:

q - Sobrecarga uniformemente distribuída sobre o terrapleno;

γ_1 - Peso específico do material do solo reforçado; E - Empuxo ativo por Rankine;

H - Altura do maciço reforçado;

Φ - Ângulo de atrito entre a base do maciço reforçado e o solo de fundação.

No caso de aterros não coesivos, a equação utilizada 16 se transforma na equação

17:

$$B_d = \frac{K_{a2} * \left(1 + 2 * \frac{q}{\gamma_2 * H}\right)}{2 * tg \Phi * \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{q}{\gamma_2 * H}\right)} * FS_d * H \quad (17)$$

Sendo:

γ_2 - Peso específico do material do solo da fundação;

K_{a2} – Coeficiente de empuxo ativo por Rankine referente ao material do solo da fundação.

2.6.2. Tombamento

Considerando as condições de estabilidade ao tombamento, é possível determinar a largura da base do maciço reforçado (B_t) de modo a atender ao fator de segurança mínimo igual a 2, adotando-se o empuxo de terra calculado pela teoria de Rankine e tendo y_E como o braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura. Essa verificação é feita por meio da equação 18:

$$B_t = \sqrt{\frac{2 * FS_t * E * y_E}{\gamma_1 * H + q}} \quad (18)$$

Figura 20 - Distribuição de tensões verticais na base.

No caso de aterros não coesivos, tem-se a equação 19:

$$B_t = \sqrt{\frac{FS_t * K_{a2} * \left(1 + 3 * \frac{q}{\gamma_2 * H}\right)}{3 * \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{q}{\gamma_2 * H}\right)}} \quad (19)$$

2.6.3 Capacidade de carga da fundação

A capacidade de carga da fundação determina a resistência do solo em suportar as cargas da estrutura sem falhas ou recalques excessivos. Sua análise considera a resistência ao cisalhamento do solo e a distribuição de tensões, garantindo a estabilidade da obra.

Devido à excentricidade da carga aplicada na base da estrutura, é comum adotar um modelo de distribuição de tensões normais em formato trapezoidal na superfície do solo de fundação, como ilustrado na Figura 20. Nesse contexto, as tensões normais mínima e máxima resultantes dessa distribuição podem ser determinadas de forma respectiva pelas equações 20 e 21:

$$\sigma_{V,min} = \frac{2N}{B} \left(\frac{3x_R}{B} - 1\right) \quad (20)$$

$$\sigma_{V,max} = \frac{2N}{B} \left(2 - \frac{3x_R}{B}\right) \quad (21)$$

Sendo:

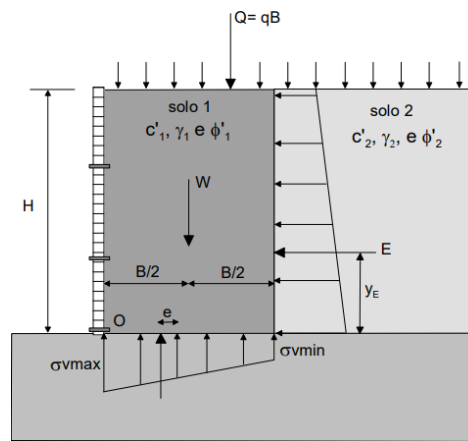
$\sigma_{V,máx}$ - Tensão vertical máxima na base;

$\sigma_{V,mín}$ - Tensão vertical mínima na base; N - Força normal na base(W+Q); B - Largura da base da estrutura;

x_R - Distância da resultante das forças na base ao pé da estrutura, dada pela equação 22:

$$x_R = \frac{Wx_w + Qx_Q - E'y_E}{W + Q} \quad (22)$$

Figura 20 - Distribuição de tensões verticais na base.



Fonte: GeoRio(2014).

A excentricidade da carga na base da estrutura é determinada pela equação 23:

$$e = \frac{B}{2} - x_R \leq \frac{B}{6} \quad (23)$$

No caso de aterros não-coesivos($c_1=c_2=0$), as equações 20, 21 e 23 acima se transformam, de forma respectiva, nas equações 24, 25 e 26:

$$\sigma_{V,min} = \gamma_1 * H + q - k_{a2} * (\gamma_2 H + 3q) * \left(\frac{H}{B}\right)^2 \quad (24)$$

$$\sigma_{V,máx} = \gamma_1 * H + q + k_{a2} * (\gamma_2 H + 3q) * \left(\frac{H}{B}\right)^2 \quad (25)$$

$$e = \frac{k_{a2} * (1 + 3 * (\frac{q}{\gamma_2 H}))}{6 * (\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{q}{\gamma_2 H})} * \left(\frac{H^2}{B}\right) \leq \frac{B}{6} \quad (26)$$

Com base na recomendação de Meyerhof (1953), a tensão normal uniformemente distribuída sobre a fundação (σ) pode ser determinada pela equação 27 para aterros coesivos e para a equação 28 para aterros não coesivos:

$$\sigma = \frac{N}{B - 2e} \quad (27)$$

$$\sigma = \frac{3 * (\gamma_1 * H + q)}{3 - k_{a2} * \left(\frac{\gamma_2 H + 3q}{\gamma_1 H + q} \right) * \left(\frac{H}{B} \right)^2} \quad (28)$$

Esse valor deve ser comparado com a capacidade de carga do solo de fundação. Para essa análise, pode-se empregar a clássica equação de capacidade de carga (equação 29) para fundações corridas, conforme proposta por Terzaghi e Peck (1996):

$$q_{max} = c' \cdot N_c + q_s \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma_f \cdot B' \cdot N_\gamma \quad (29)$$

Sendo:

q_{max} - Capacidade de carga do solo de fundação; c' - Coesão do solo de fundação;

q_s - Sobrecarga ao nível da base da estrutura, caso esta esteja parcialmente enterrada;

γ_f - Peso específico do solo de fundação;

N_c , N_q e N_γ - fatores de capacidade de carga obtidos em função do ângulo de atrito do solo de fundação (Terzaghi e Peck, 1996), apresentados na tabela 8:

Tabela 8 - Fatores de capacidade de suporte.

$\phi(^{\circ})$	N_c	N_q	N_{γ}
12	9,28	2,97	1,69
14	10,37	3,59	2,29
16	11,63	4,34	3,06
18	13,1	5,26	4,07
20	14,83	6,4	5,39
22	16,88	7,82	7,13
24	19,32	9,6	9,44
26	22,25	11,85	12,54
28	25,8	14,72	16,72
30	30,14	18,4	22,4
32	35,49	23,18	30,22
34	42,16	29,44	41,06
36	50,59	37,75	56,31
38	61,35	48,93	78,03

Fonte: Adaptado de Vesic, 1975 apud Cinta; Aoki, 2011.

Assim, o fator de segurança (FS_f) contra a ruptura da fundação é dado pela equação 30:

$$FS_f = \frac{q_{max}}{\sigma} \geq 3 \quad (30)$$

2.6.4. Ruptura Global

Os métodos mais utilizados para a análise da ruptura global são fundamentados no princípio do equilíbrio limite, adotando uma abordagem analítica. Segundo esse princípio, a estabilidade do maciço é avaliada considerando o equilíbrio de uma porção específica que pode se desprender e deslizar ao longo de uma superfície potencial de ruptura. A falha ocorre quando a resistência ao cisalhamento ao longo dessa superfície é superada pelas forças atuantes, levando ao colapso do talude.

Entre os métodos de análise por equilíbrio limite, destacam-se os métodos das fatias, nos quais a massa instável do solo é subdividida em segmentos verticais. Esses métodos podem considerar superfícies de ruptura de diferentes geometrias, sendo os modelos desenvolvidos por Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1977) amplamente utilizados para análises mais rigorosas. Esses dois métodos empregados neste trabalho, permitem a avaliação de superfícies de ruptura arbitrárias e fornecem soluções mais precisas ao

considerar o equilíbrio global de forças e momentos.

A implementação desses métodos é realizada por meio do *software* Slide 2 cuja aplicação é apresentada posteriormente, permitindo a modelagem e a verificação da estabilidade de taludes sob diferentes condições de carregamento e geometria.

2.6.4.1 Método de Morgenstern e Price (1965)

O método proposto por Morgenstern e Price (1965) é uma abordagem avançada baseada no princípio do equilíbrio limite, permitindo a análise de superfícies de ruptura tanto circulares quanto não circulares. A principal característica dessa metodologia é a consideração de uma relação funcional entre as forças normais e cisalhantes atuantes nas laterais das fatias, descrita por uma função dependente da abscissa ao longo da superfície de ruptura.

Segundo Souza (1980), um dos pressupostos fundamentais desse método é a existência de uma correlação entre as forças laterais das fatias, expressa em termos de uma função e de um coeficiente de proporcionalidade. Contudo, uma limitação importante é a necessidade de cálculos computacionais devido à complexidade iterativa envolvida, tornando inviável sua aplicação manual.

Este método é particularmente recomendado para estudos detalhados, sendo amplamente utilizado na análise de taludes compostos por solos estratificados, onde a superfície de ruptura pode não ser circular. Sua precisão o torna adequado para investigações aprofundadas de estabilidade de maciços terrosos.

2.6.4.2 Método de Spencer (1977)

Desenvolvido por Spencer (1977), este método rigoroso considera superfícies de ruptura circulares e adota a premissa de que a relação entre as forças normais e cisalhantes nas interfaces das fatias permanecem constantes ao longo de toda a superfície de ruptura. Ou seja, a resultante das forças entre as fatias mantém um ângulo de inclinação uniforme.

Diferente de métodos que apenas satisfazem o equilíbrio de forças verticais e horizontais, o método de Spencer garante também o equilíbrio de momentos, resultando em uma abordagem mais precisa e conservadora. Para a determinação do fator de segurança, são estabelecidas duas equações de equilíbrio: uma baseada nas forças atuantes e outra nos momentos. Caso os fatores de segurança obtidos nessas equações sejam distintos, o ângulo de inclinação da resultante das forças entre as fatias é ajustado, e os cálculos são reiterados até

que ambos os fatores coincidam.

Por ser um método iterativo e matematicamente exigente, sua aplicação depende de softwares computacionais, tornando-se uma ferramenta essencial para análises detalhadas de estabilidade de taludes e contenções em diferentes tipos de solos.

2.7 Softwares de Análise

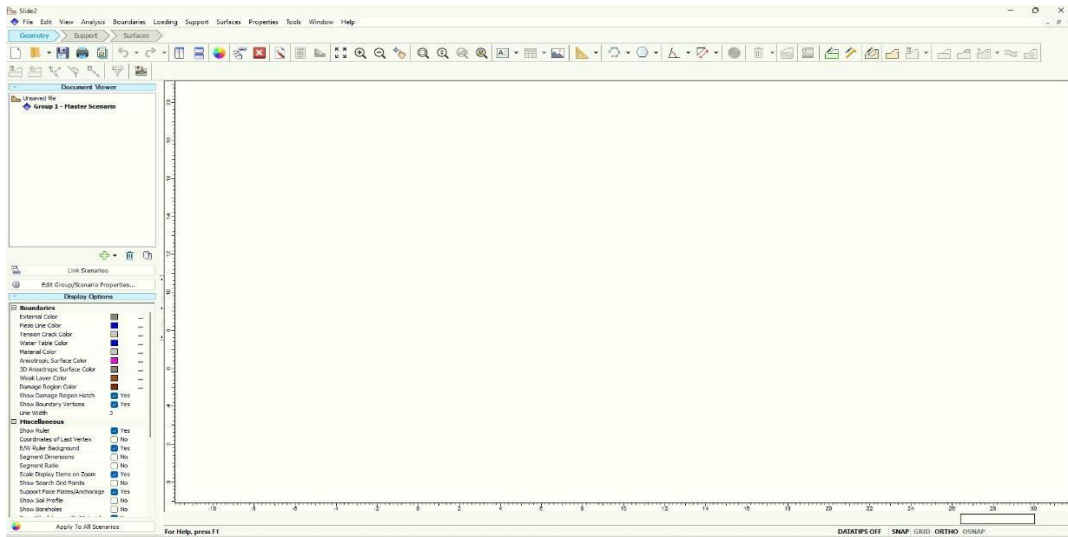
Os avanços na engenharia geotécnica têm possibilitado o desenvolvimento de ferramentas computacionais cada vez mais sofisticadas para a análise e dimensionamento de estruturas de contenção de solo. Esses *softwares* permitem simulações detalhadas do comportamento dos sistemas em diferentes condições de carregamento, contribuindo para a otimização dos projetos e a tomada de decisões mais embasadas. No contexto deste estudo, foi utilizado o programa Slide 2, que auxilia na avaliação da estabilidade dos maciços e no cálculo dos fatores de segurança, garantindo maior precisão na comparação entre as soluções adotadas.

2.7.1 O software Slide2

O Slide2 é um *software* desenvolvido pela Rocscience, amplamente utilizado na engenharia geotécnica para análise de estabilidade de taludes e estruturas de contenção de solo. Sua principal metodologia baseia-se no equilíbrio limite, permitindo avaliar superfícies potenciais de ruptura sob diferentes condições de carregamento e interação solo-estrutura. O programa oferece uma interface intuitiva (figura 21) e ferramentas avançadas para modelagem, possibilitando a consideração de variáveis como pressão de água, resistência do solo e presença de reforços estruturais.

Além disso, o Slide 2 permite a realização de análises paramétricas, possibilitando a comparação entre diferentes cenários geotécnicos para otimização do projeto. Sua capacidade de simular reforços, como geossintéticos e faixas metálicas, o torna uma ferramenta essencial para a verificação da segurança e eficiência de soluções como os sistemas Terra Armada e Terramesh, proporcionando maior confiabilidade na escolha do método mais adequado para cada situação.

Figura 21 - Interface do software Slide 2.

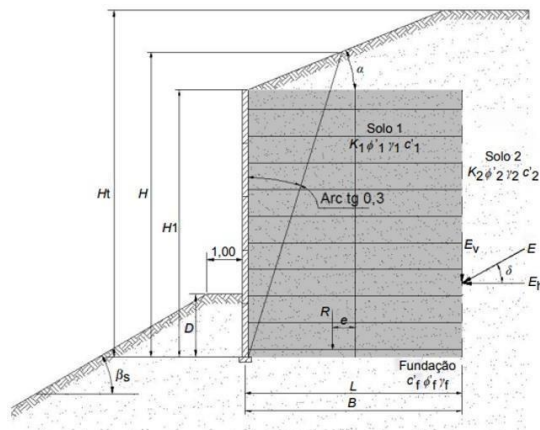


Fonte: Autora(2025).

2.8 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento (figura 22) é uma etapa fundamental no projeto de sistemas estruturais, sendo realizado inicialmente com o lançamento de seções transversais.

Figura 22 - Pré-dimensionamento de contenções em solo reforçado.



Fonte: Norma NBR 16920-1(ABNT, 2021).

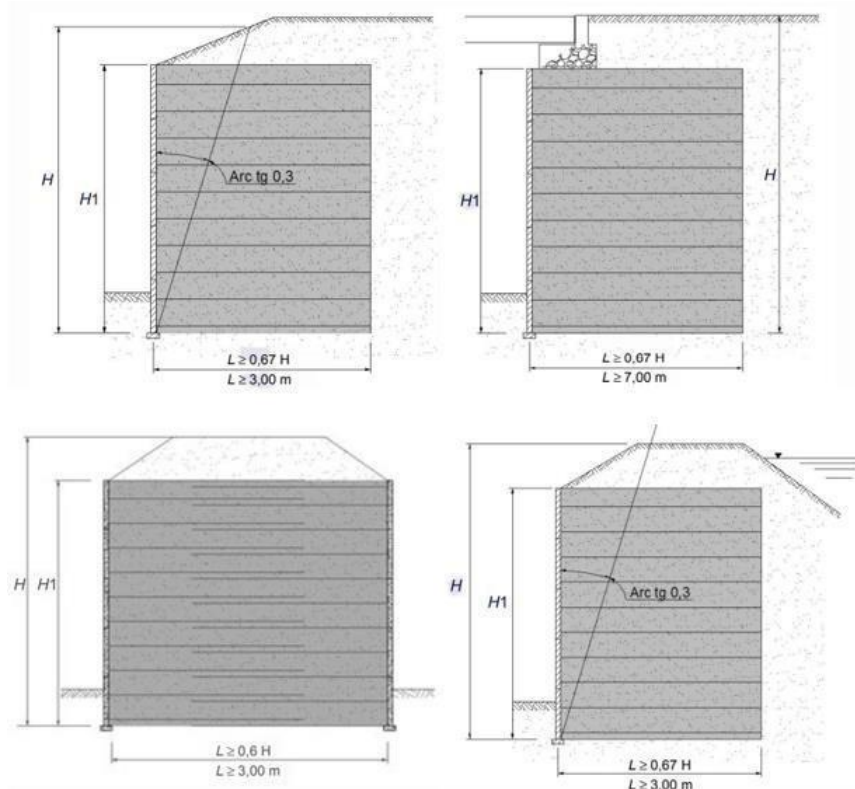
Sendo as possíveis dimensões de D:

- $D = 0,1 H$, quando o terreno a jusante do maciço for horizontal;
- $D = 0,1 H$ a $0,2 H$, quando o terreno a jusante do maciço for inclinado;
- em qualquer caso, $D_{mín.} = 0,40 \text{ m}$;

d) quando os muros em solos reforçados forem implantados sobre terrenos inclinados, deve-se prever uma banqueta com largura não inferior a 1 m junto ao paramento.

Para fins de pré-dimensionamento de seções transversais retangulares, o lançamento inicial do comprimento L das armaduras deve atender aos valores mínimos indicados na figura 23, sendo, ainda, constante em toda a altura do muro.

Figura 23 - Pré-dimensionamentos: a) Greide ou pé de talude. b) Encontro portante. c) Reforço transpassado. d) Dique de contenção.



Fonte: Norma NBR 16920-1(ABNT,2021)

Após essa etapa inicial, são realizadas as verificações de estabilidade externa. Caso necessário, o processo pode ser repetido por meio de iterações sucessivas, com o ajuste das dimensões geométricas até que as condições de estabilidade sejam atendidas. Esse procedimento garante que a estrutura atenda aos requisitos de segurança e funcionalidade, sendo um passo essencial para o desenvolvimento do projeto estrutural final.

Para o caso do sistema Terramesh, a fornecedora Maccaferri recomenda que, no primeiro terço da altura total do muro (H), contado a partir da base, sejam empregados módulos com altura de 0,5 m. Essa recomendação se deve ao fato de que essa região inferior

da estrutura está sujeita a maiores níveis de tensões e solicitações, exigindo elementos mais robustos e resistentes. Além disso, a fornecedora também recomenda que cada camada do paramento seja recuada horizontalmente em 10 cm a cada 1,0 m de altura, criando uma configuração escalonada. Essa técnica é adotada para aumentar a estabilidade estrutural do muro, pois o recuo progressivo reduz o empuxo do solo sobre a estrutura, melhorando a resistência ao deslizamento e ao tombamento.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para a análise comparativa entre os sistemas de contenção Terra Armada e Terramesh, com o objetivo de dimensionar e comparar muros de contenção de diferentes alturas. O empuxo é calculado utilizando a teoria de Rankine, e todos os cálculos são realizados com o mesmo tipo de solo para garantir a consistência nas análises. Para a avaliação, são dimensionadas estruturas com alturas de paramento(H1) de 5 m, 7,5 m, 10 m e 12,5 m para ambos os sistemas de contenção, considerando em todas as análises seções transversais retangulares.

Posteriormente, os resultados obtidos são comparados para verificar o desempenho estrutural de cada solução. Para realizar as simulações e cálculos de estabilidade e dimensionamento é utilizado o *software* Slide 2.

4. ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de viabilizar uma análise comparativa entre os sistemas de contenção em solo reforçado — Terra Armada e Terramesh — foi desenvolvido um estudo de caso hipotético. Ressalta-se que os dados utilizados não correspondem a um local físico real, mas foram selecionados a partir de referências consolidadas com o intuito de representar condições típicas de projeto. Para garantir a coerência e a equivalência na comparação entre as soluções, foram adotadas alturas iguais para ambas as técnicas, bem como parâmetros geotécnicos padronizados para os solos envolvidos. Essa uniformização permite avaliar de forma isenta o desempenho estrutural e a estabilidade global de cada solução, sem que variáveis externas interfiram nos resultados obtidos. Além disso, é utilizada uma extensão fictícia de 50 metros para todas as contenções a fim de viabilizar uma análise de custo de cada sistema construtivo.

4.1 Parâmetros Geotécnicos

Neste estudo, as análises foram realizadas com base em casos hipotéticos de contenções em solos reforçados, adotando propriedades físicas e parâmetros do solo padronizados para ambas as técnicas. A Tabela 9 apresenta valores típicos dos parâmetros geotécnicos apresentados por Duncan et al. (1980).

Tabela 9 - Parâmetros de resistência e peso específico de solos.

Classificação de solo	Y (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)
Areias e cascalhos	24	42	0
	23	39	0
	22	36	0
	21	33	0
Areia Siltosa	21	36	0
	20	34	0
	19	32	0
	18	30	0
Areia Argilosa	21	33	24
	20	33	19
	19	33	14
	18	33	10
Argila Arenosa	21	30	19
	20	30	14
	19	30	10
	18	30	5

Fonte: Adaptado de Duncan et al.(1980).

As tabelas 10, 11, 12 e 13 apresentam, respectivamente, os valores de parâmetros para o solo natural, aterro laterítico, aterro granular e material de enchimento dos gabiões utilizados para essa análise:

Tabela 10 - Propriedades do solo natural.

Propriedade	Solo natural
Descrição	Areia argilosa
Y (kN/m ³)	19
c	14
ϕ (°)	33

Fonte: Autora(2025).

Tabela 11 - Propriedades do aterro laterítico.

Propriedade	Aterro laterítico
Descrição	Argila arenosa
Y (kN/m ³)	19
c (kPa)	10
ϕ (°)	25

Fonte: Autora(2025).

Tabela 12 - Propriedades do solo de aterro granular.

Propriedade	Aterro granular
Descrição	Areia siltosa
Y (kN/m ³)	20
c	0
ϕ (°)	36

Fonte: Autora(2025).

Tabela 13 – Propriedades do material de enchimento dos gabiões.

Propriedade	Enchimento Gabiões
Descrição	Rachão
Y (kN/m ³)	17
c	90
ϕ (°)	54

Fonte: Autora(2025).

4.2 Geometria e Configuração dos Sistemas

As alturas analisadas neste estudo são 5 m, 7,5 m, 10 m e 12,5 m, escolhidas com base em faixas típicas de aplicação dessas soluções em obras de infraestrutura. As

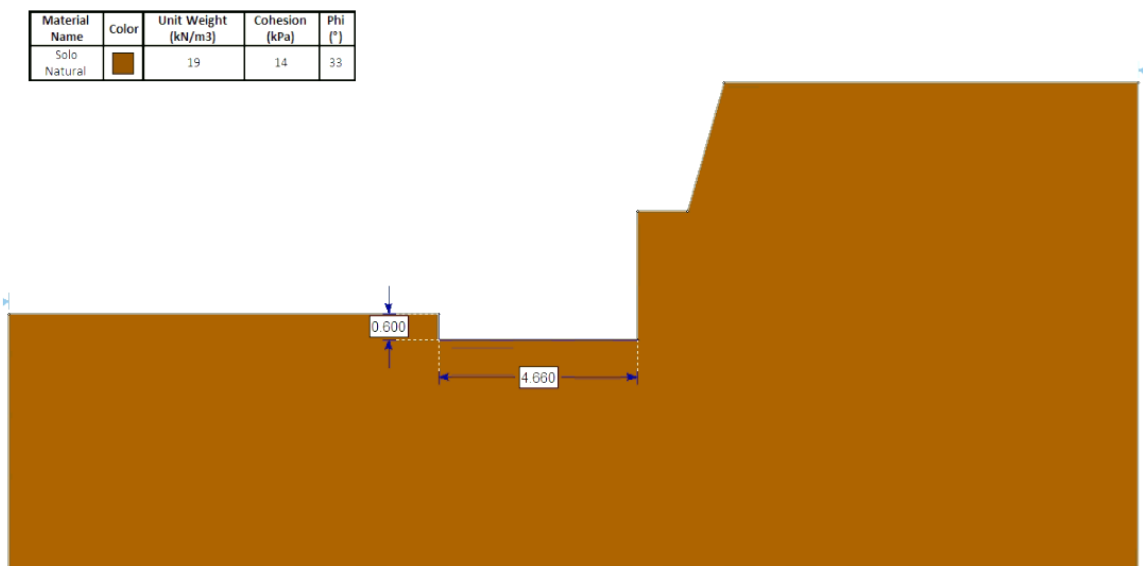
configurações adotadas seguiram critérios normativos e boas práticas de engenharia, de modo a garantir coerência e equivalência nas condições de projeto para ambas as soluções.

Com o objetivo de assegurar maior estabilidade durante a execução das contenções e otimizar o volume de aterro necessário, foi proposto um corte escalonado no talude natural, por meio da adoção de bermas intermediárias. Essa estratégia contribui para a segurança do processo construtivo, além de reduzir custos operacionais com movimentação de solo.

Os cortes estabelecidos para cada altura foram definidos de modo a permitir a aplicação da mesma configuração geométrica em ambas as técnicas construtivas. Como exemplo, a geometria adotada para a contenção de 5m no sistema Terra Armada foi replicada no modelo correspondente do Terramesh. De forma análoga, para as demais alturas analisadas, manteve-se a padronização dos cortes entre os dois sistemas, assegurando a uniformidade nas condições geométricas consideradas no estudo.

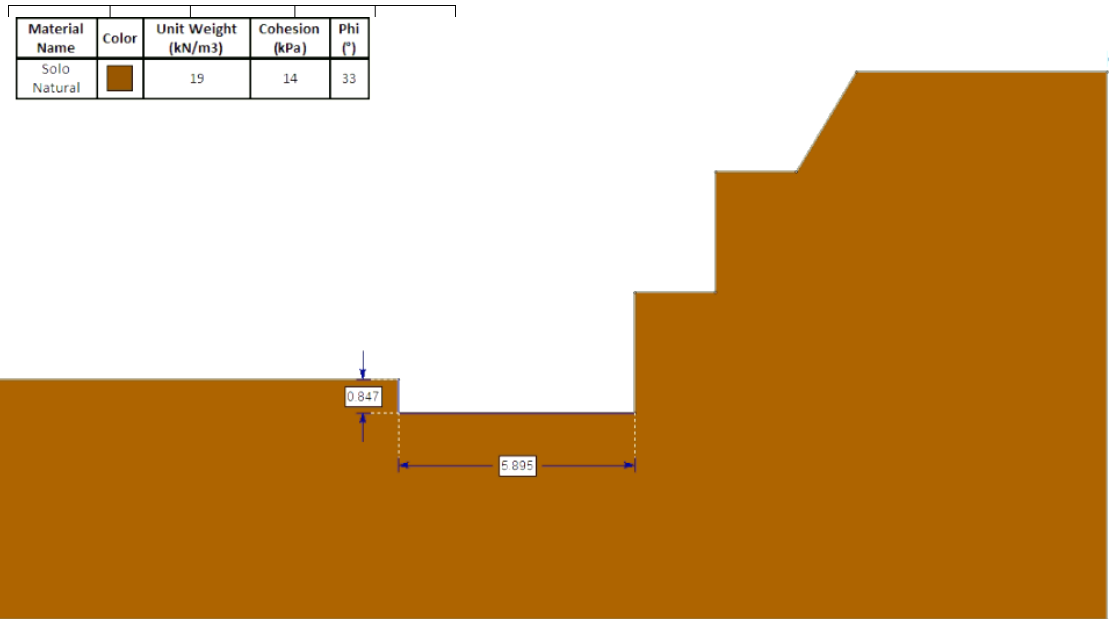
As figuras 24, 25, 26 e 27 mostram os cortes propostos para as alturas de 5m, 7,5m, 10m, e 12,5m, respectivamente:

Figura 24 - Corte previsto para altura de 5m.



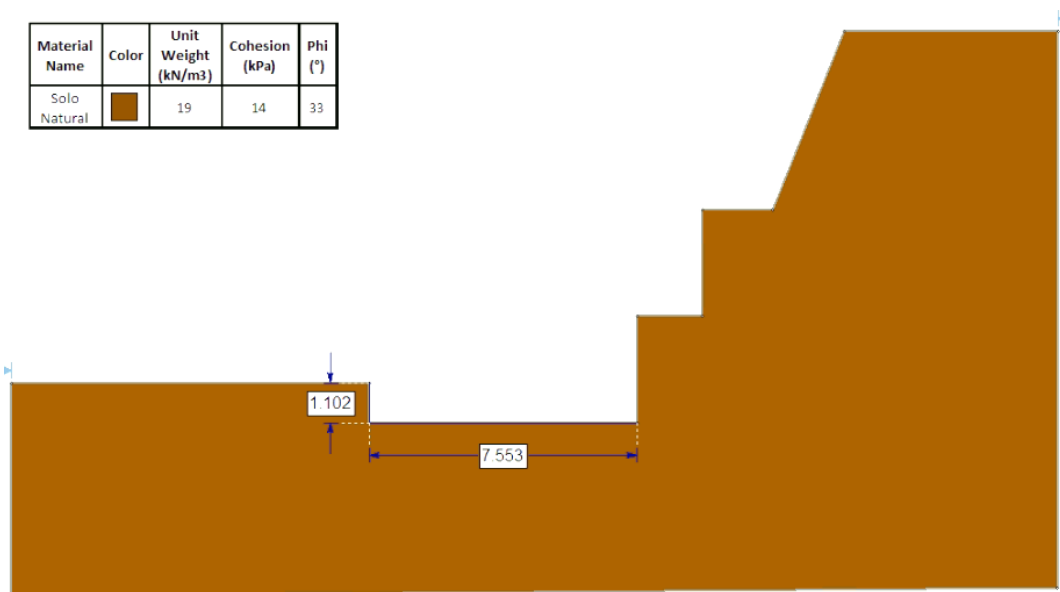
Fonte: Autora(2025).

Figura 25 - Corte previsto para altura de 7,5m.



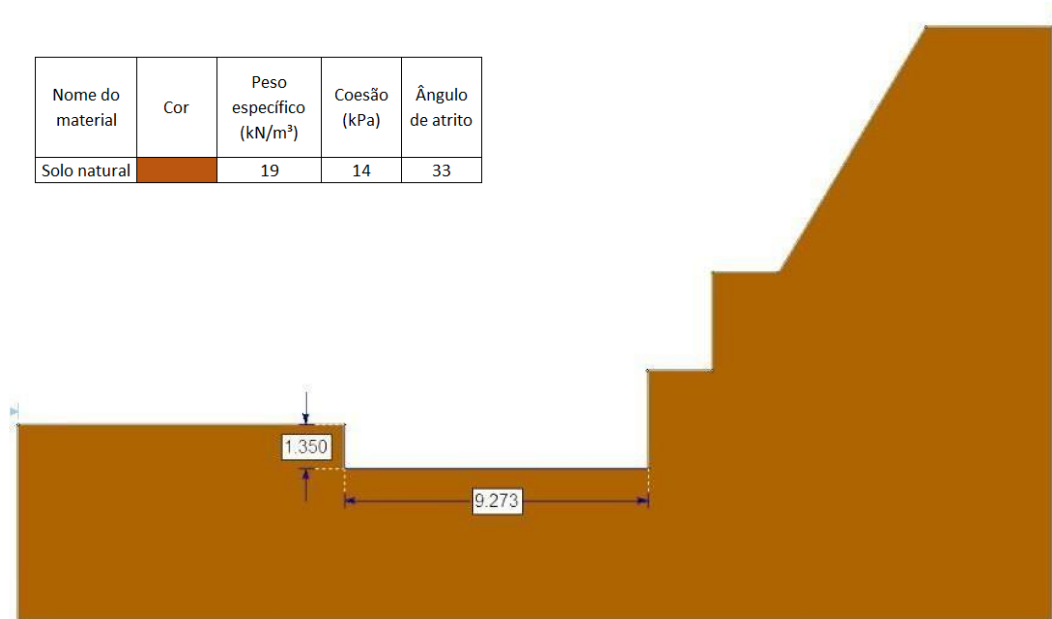
Fonte: Autora(2025).

Figura 26 - Corte previsto para altura de 10m.



Fonte: Autora(2025).

Figura 27 - Corte previsto para altura de 12,5m.



Fonte: Autora(2025).

A largura da base das estruturas foi dimensionada conforme o disposto na ABNT NBR 16920-1:2021, que estabelece como recomendação o valor mínimo de 0,67 vezes a altura da estrutura ($0,67 \cdot H$). Esse critério visa garantir estabilidade global da contenção, especialmente em solos com resistência limitada.

Quanto ao comprimento do embutimento da base da estrutura no solo de fundação, representado pela variável D , foi adotado o valor de 10% da altura da estrutura ($0,1 \cdot H$), também conforme orientação da ABNT NBR 16920-1:2021. Essa medida garante o travamento adequado da estrutura na fundação, reduzindo o risco de instabilizações na interface entre solo e estrutura.

Assim, todas as análises consideraram a aplicação de uma sobrecarga superficial uniforme de 25 kPa sobre a crista da contenção, em conformidade com a ABNT NBR 11682:2009, que trata das ações a serem consideradas no dimensionamento de estruturas de contenção.

Adotando um fator de segurança igual a 1,2 (Obras temporárias e locais sujeitos a desastres ambientais reduzidos), conclui-se, pelos fatores de segurança obtidos representados na Tabela 14, que o corte proposto oferece segurança durante sua execução, pois todos os fatores ficaram superiores ao mínimo mencionado.

Tabela 14 – Fatores de segurança obtidos para os cortes propostos

Altura da Contenção (m)	Fator de Segurança (FS)	
	Spencer	Morgenstern-Price
5	1,212	1,210
7,5	1,314	1,313
10	1,228	1,222
12,5	1,214	1,209

Fonte: Autora(2025).

4.3 Caracterização dos Elementos de Reforço

Neste item, são apresentados os materiais de reforço utilizados nos modelos analisados para os sistemas de contenção em solo reforçado Terra Armada e Terramesh. Os parâmetros definidos foram padronizados dentro de cada sistema e mantidos constantes entre as diferentes alturas para garantir coerência nas comparações.

4.3.1 Terra Armada

Nos modelos do sistema Terra Armada, foram adotadas fitas metálicas galvanizadas, com as seguintes propriedades:

- Material: Aço galvanizado ASTM A572-G50
- Tensão de escoamento: 345 kN/m².
- Espessura da fita: 4 mm.
- Largura da fita: 50 mm.
- Durabilidade considerada (vida útil): 50 anos.
- Espessura de sacrifício: 0,75 mm.
- Espaçamento vertical entre reforços: 0,75m.
- Espaçamento horizontal entre reforços: 0,75m.
- Comprimento das fitas (L): correspondente a 67% da altura H.
- Tipo de paramento: Semiflexível.

Essas propriedades foram aplicadas uniformemente nos quatro modelos geométricos (5 m, 7,5 m, 10 m e 12 m), mantendo a proporcionalidade entre o comprimento dos reforços

e a altura da contenção, conforme recomendações da norma NBR 16920-1:2021.

4.3.2 Terramesh

Para os modelos baseados no sistema Terramesh, foram adotadas geogrelhas poliméricas associadas a telas metálicas galvanizadas na face. Os parâmetros utilizados são os seguintes:

- Geogrelha:
 - Material: Malha DT Polimac 80
 - Resistência à tração característica: 45,87 kN/m
 - Durabilidade considerada: 120 anos
- Espaçamento vertical entre reforços: 0,5m e 1m.
- Comprimento dos reforços: correspondente a 67% da altura H.
- Tipo de paramento: Flexível.

Tal como no sistema Terra Armada, os parâmetros foram mantidos constantes entre os modelos de diferentes alturas.

Os valores utilizados para reforço das estruturas em Terramesh, baseiam-se nas características de catálogo da própria fornecedora.

4.4 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos dimensionamentos realizados para os sistemas de contenção em solo reforçado adotados no estudo.

As verificações externas foram feitas de acordo com o apresentado no capítulo 2.

Com uma análise satisfatória para todos os casos, já que o valor utilizado para a base de cada estrutura foi maior do que o mínimo calculado para deslizamento e tombamento, e o FS encontrado para fundação foi maior do que 3, como apresentado na tabela 15:

Tabela 15 – Resultados obtidos para verificações externas

VERIFICAÇÕES EXTERNAS				
H(m)	B _{mín} (m) - Deslizamento	B _{mín} (m) - Tombamento	B adotado (m)	FSfund
5	4,01	2,78	4,02	10,57
7,5	5,68	3,96	5,7	9,12
10	7,32	5,09	7,37	8,34
12,5	8,89	6,21	9,05	7,84

Fonte: Autora(2025).

4.4.1 Terra Armada

Neste tópico, apresenta-se a metodologia adotada para o dimensionamento da estrutura de 12,5 metros de altura utilizando o sistema Terra Armada. Os cálculos mostrados referem-se especificamente à fita de reforço localizada na região mais inferior da estrutura, por ser a que está submetida às maiores solicitações tensionais, sendo essa fita a mesma já citada no tópico

4.3.1. Ressalta-se que os mesmos procedimentos foram aplicados às demais fitas ao longo de toda a altura da contenção e às demais alturas desse tipo. Os resultados completos encontram-se organizados em formato tabular no anexo deste trabalho.

Os cálculos começam com os parâmetros relacionados ao aterro e, considerando que a estrutura analisada não corresponde a um caso real de obra executada, não foram realizados ensaios laboratoriais para a caracterização específica do solo utilizado. Dessa forma, para fins de dimensionamento e análise, adotou-se um valor de atrito solo-armadura com base em dados da literatura técnica, sendo considerado o coeficiente de atrito $f_0^* = 1,5$.

Logo em seguida, calcula-se o empuxo (tensão horizontal) pela Teoria de Rankine. Para isso calcula-se inicialmente o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin\left(\frac{36 \cdot \pi}{180}\right)}{1 + \sin\left(\frac{36 \cdot \pi}{180}\right)} = 0,26$$

E, então, a tensão horizontal para solos não coesivos, tendo z como a distância entre o topo do aterro laterítico e a posição da fita em questão:

$$\sigma_h = K_a * (\gamma * z + q) = 0,26 * (20 * 13 + 25) = 73,99kPa$$

Assim, tem-se a resistência a tração máxima dessa fita, levando em consideração o espaçamento vertical e horizontal dos reforços:

$$T_{\text{máx}} = \Delta v * \Delta h * \sigma_h = 0,75 * 0,75 * 73,99 = 41,62 \text{ kN}$$

Calculando a tensão vertical σ_v :

$$\sigma_v = K_a * z' + q = 20 * 13 + 25 = 285 \text{ kPa}$$

Agora, determina-se o comprimento necessário da fita por meio do comprimento necessário para a zona ativa (L_a) e, também, para a zona resistente (L_r). Respeitando o disposto pela ABNT NBR 16920-1:2021, esses valores são facilmente encontrados por trigonometria, tendo como z' a distância entre o topo do aterro e a fita calculada.

$$L_a = \frac{(H-z')}{2} = \frac{(13,5-13)}{2} = 0,25 \text{ m}$$

Para calcular o L_r faz-se necessário o cálculo do atrito entre solo e fita calculada (f^*), de acordo com a tabela de Critérios mecânicos para seleção do material de aterro para armaduras nervuradas da ABNT NBR 16920-1:2021, tem-se:

$$f^* = \text{tg}(\phi) = \text{tg}\left(\frac{36 * \pi}{180}\right) = 0,73$$

Assim, pode-se usar a equação 15 e encontrar o valor de L_r isolando-o e utilizando o fator de segurança γ_r para aderência entre solo e armadura igual ao mínimo necessário de 1,5:

$$L_r = \frac{\gamma_r * T_{\text{máx}}}{2 * b * f^* * \sigma_v * 0,001} = \frac{1,5 * 41,62}{2 * 50 * 0,76 * 285 * 0,001} = 3,01 \text{ m}$$

Somando os dois encontram-se os valores totais do comprimento de reforço

$$\text{necessário: } L = L_a + L_r = 0,25 + 3,01 = 3,26 \text{ m}$$

Entretanto, para atingir o comprimento do reforço de $0,67 * H$, já tendo calculado L_a , tem-se L_r igual a:

$$L_r = (0,67 * 13,5) - 0,25 = 9,045 - 0,25 = 8,80 \text{ m}$$

Dessa forma, deve-se usar o valor de 9,045m para o comprimento real da fita.

Agora, calcula-se a força-limite resistente de aderência T_f , aqui não majorada pelo coeficiente de segurança mínimo:

$$T_f = \frac{2 * b}{1000} * f^* * \sigma_v * L_r = \frac{2 * 50}{1000} * 0,73 * 280 * 8,80 = 182,11 \text{ kN}$$

Deve-se, então, conferir o fator de segurança γ_r para aderência entre solo e armadura encontrado:

$$\gamma_r = \frac{T_f}{T_{\text{máx}}} = \frac{182,11}{41,62} = 4,38 > 1,5$$

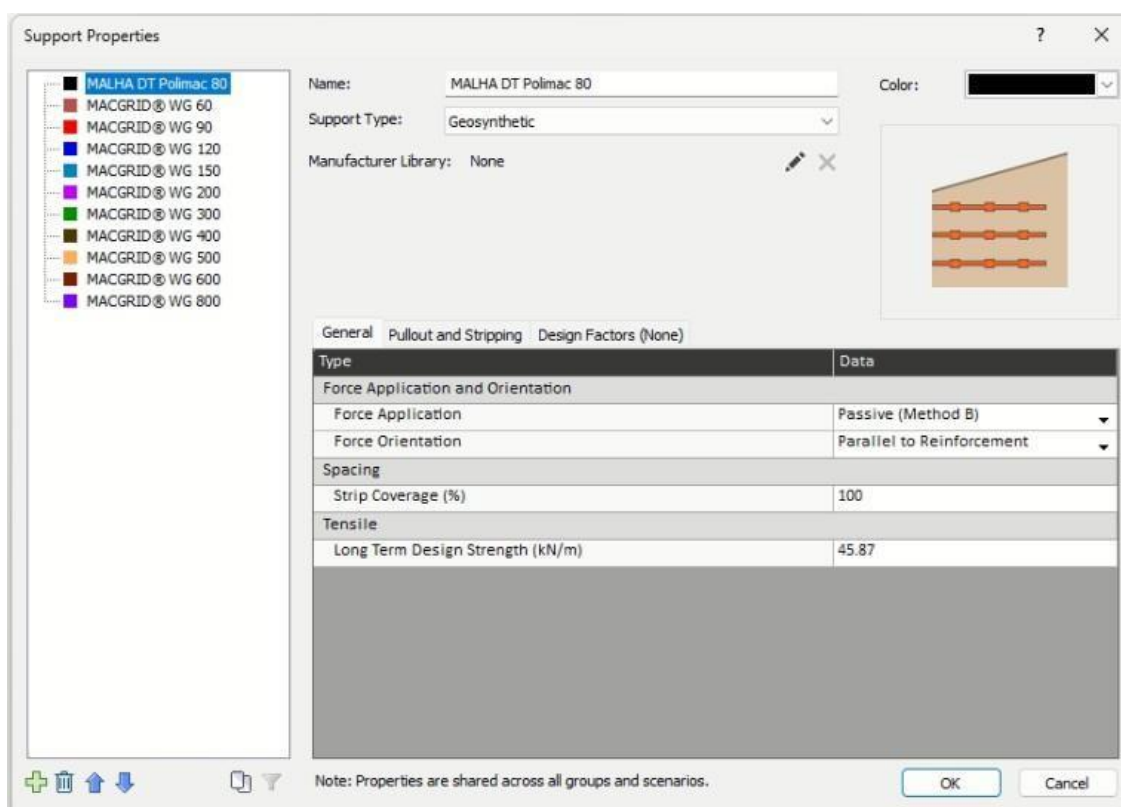
Por último, calcula-se força-limite resistente de aderência $T_{f/m}$ por metro linear de fita, valor que será atribuído a fita posteriormente no software Slide a fim de verificação de estabilidade.

$$T_{f/m} = \frac{T_f}{L_r} = \frac{182,11}{8,80} = 20,7kN/m$$

4.4.2 Terramesh

Para o sistema de Terramesh, os parâmetros foram definidos com base nos dados de catálogo fornecidos pela empresa fabricante, apresentados na Figura 28, já que o reforço é composto por uma única camada contínua de malha metálica ancorada ao bloco de gabião, não se fazendo necessário o cálculo de cada reforço. Nesse caso, os parâmetros de resistência, espaçamento e comprimento dos reforços são atribuídos de maneira conjunta a toda a camada de reforço.

Figura 28 – Dados de catalogo da fabricante

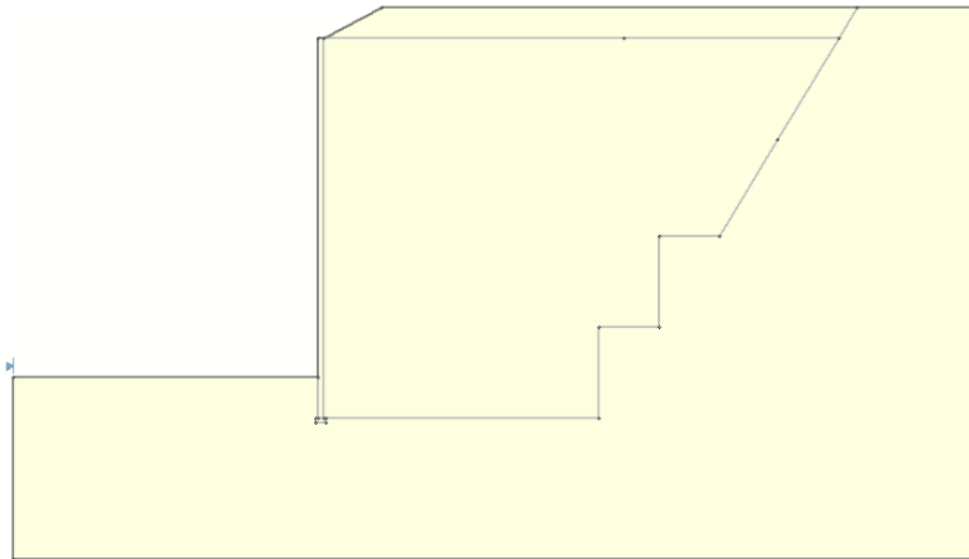


Fonte: Autora(2025).

4.5 Modelagem Computacional

A modelagem computacional dos sistemas de contenção foi realizada no *software* Slide2, com base nas geometrias definidas para as alturas de 5 m, 7,5 m, 10 m e 12,5 m. A importação da geometria foi feita a partir de arquivos vetoriais no formato *.DXF*, gerados em *software* de desenho técnico, contendo a delimitação da borda externa (external boundary) e dos materiais (materials) para cada seção transversal. A figura 29 mostra a geometria para a altura de 12,5 da contenção de Terra Armada:

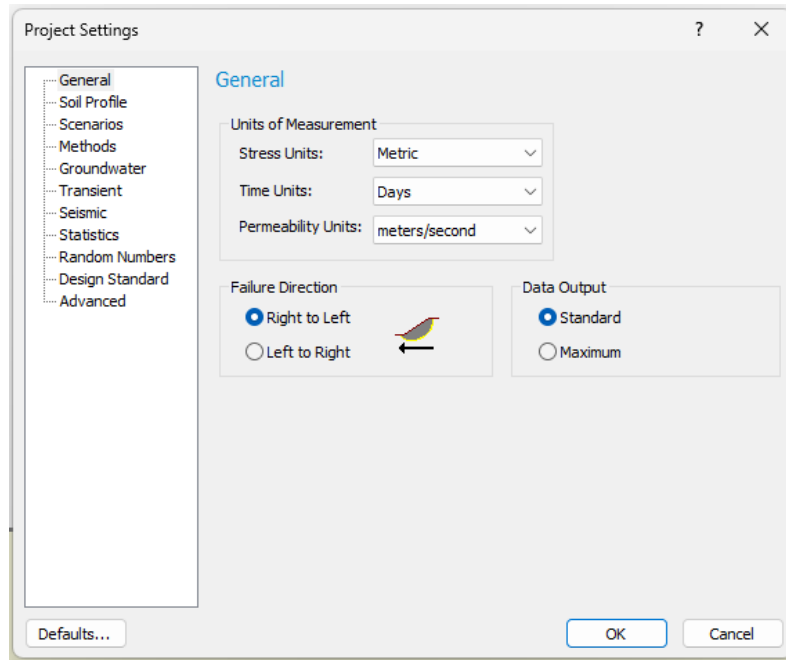
Figura 29 – Geometria proposta para a altura de 12,5m em Terra Armada



Fonte: Autora(2025).

Após a importação, foram configuradas as unidades de projeto, direção de falha, critérios de convergência e parâmetros globais de análise. A Figura 30 ilustra a interface utilizada para esse procedimento.

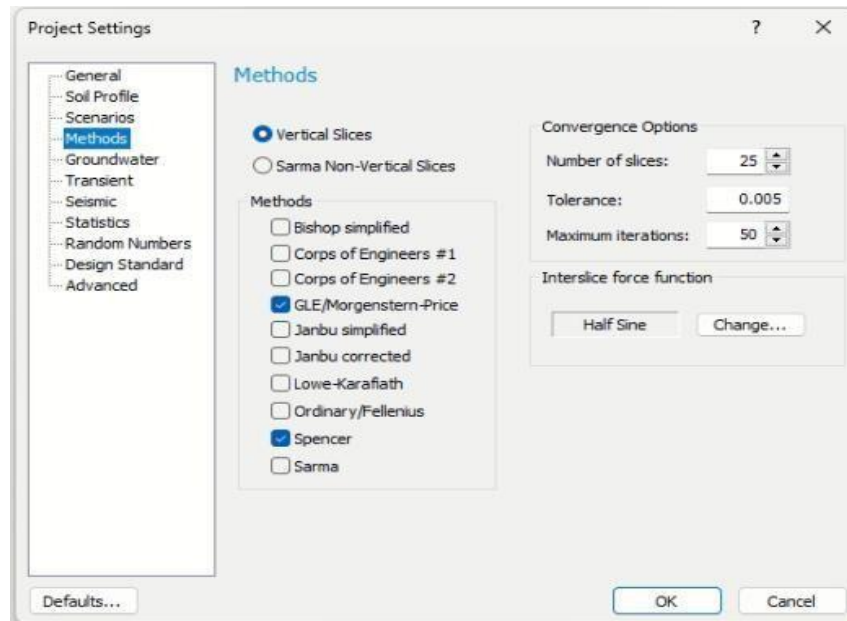
Figura 30 – Configurações gerais de projeto



Fonte: Autora(2025).

Em seguida, selecionaram-se os métodos de equilíbrio limite Morgenstern-Price (GLE) e Spencer para o cálculo dos fatores de segurança, como mostra a figura 31. Ambos métodos atendem simultaneamente ao equilíbrio de forças e momentos, sendo recomendados para análises com reforços e camadas múltiplas de materiais.

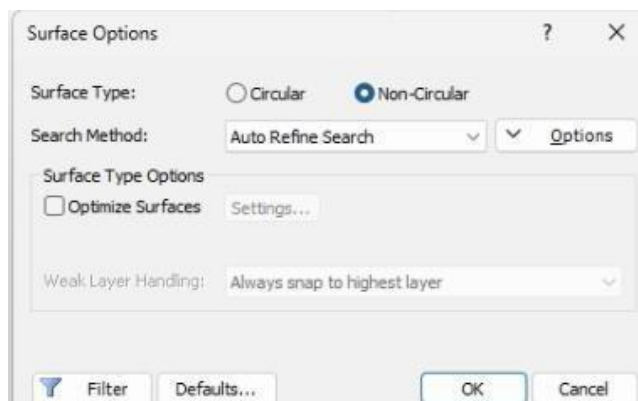
Figura 31 – Configurações de métodos de análise



Fonte: Autora(2025).

A busca pela superfície de ruptura foi configurada com a opção não circular, em conjunto com o método *Auto Refine Search*, como mostra a figura 32, que permite uma varredura refinada para identificação da superfície crítica mais instável, especialmente em taludes com geometrias complexas.

Figura 32 - Configurações de superfície de ruptura



Fonte: Autora(2025).

As propriedades dos materiais utilizados no modelo foram definidas com base nos parâmetros apresentados nos tópicos anteriores, sendo atribuídas a cada região da geometria conforme a estratigrafia representada. O critério de resistência adotado foi o de Mohr-Coulomb, amplamente empregado em modelagens geotécnicas. Para o concreto, por ser um material estrutural rígido, é frequentemente modelado com resistência “infinita” em softwares de estabilidade de taludes, como o Slide2. A figura 33 apresenta essas propriedades:

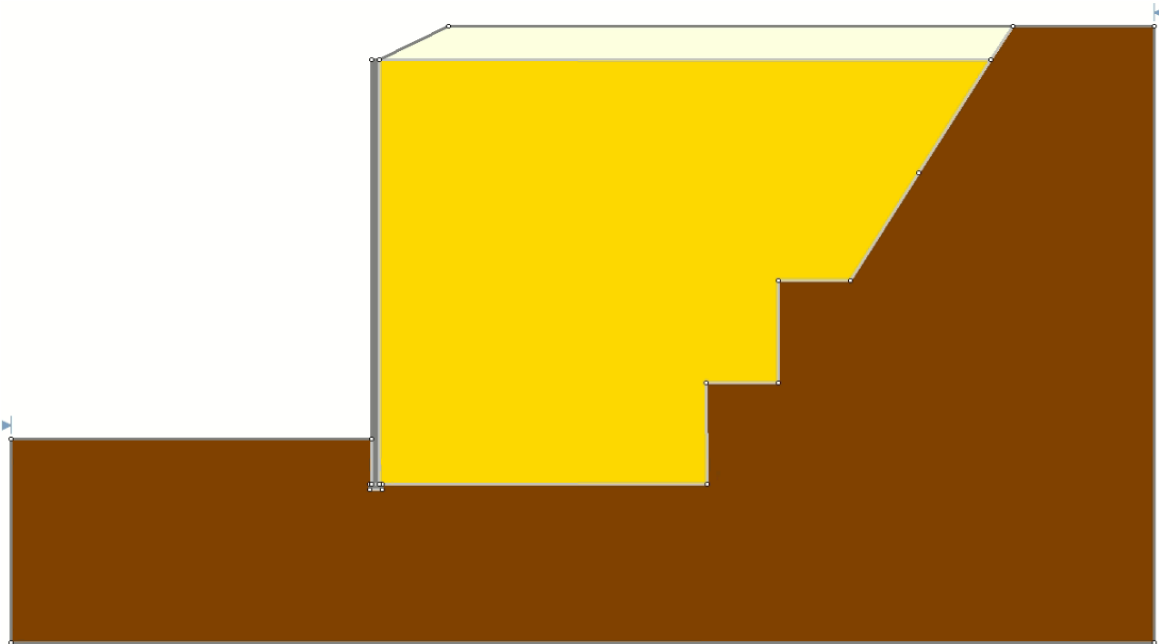
Figura 33 – Propriedades dos materiais

Nome do material	Cor	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito
Gabião		17	90	54
Aterro laterítico		20	0	36
Aterro granular		19	10	25
Solo natural		19	14	33
Concreto		25	-	-

Fonte: Autora(2025).

Como exemplo, a figura 34 mostra a geometria para a altura de 12,5m da contenção de Terra Armada com suas devidas propriedades definidas:

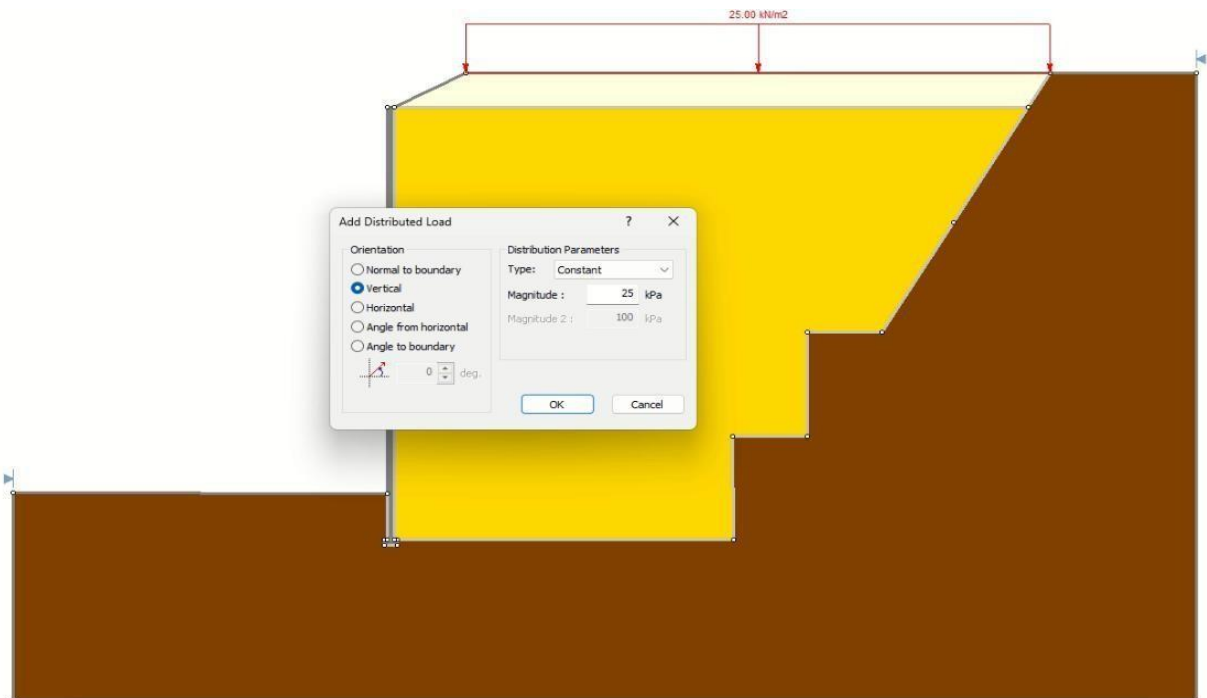
Figura 34 - Atribuição das propriedades dos materiais à geometria.



Fonte: Autora(2025).

Logo em seguida, atribui-se o carregamento distribuído definido no tópico 4.2. O software permite definir o tipo de carregamento, a magnitude, sua orientação e o trecho de aplicação, como mostra a figura 35:

Figura 35 – Atribuição de carregamento




Fonte: Autora(2025).

Após a inserção dos dados de geometria, materiais e carregamento, foram adicionados os elementos de reforço em cada sistema (fita metálica ou tela/geogrelha), também feito a partir de arquivos vetoriais no formato *.DXF*, conforme caracterização apresentada no item 4.3. Cada reforço foi posicionado com espaçamento, comprimento e inclinação equivalentes aos valores adotados nos estudos de caso.

Para o sistema de Terra Armada, o processo de inserção dos dados do reforço torna-se um processo mais manual, pois cada fita deve ser configurada de acordo com a resistência e espaçamento definido de cada uma, como mostram as figuras 36 e 37.

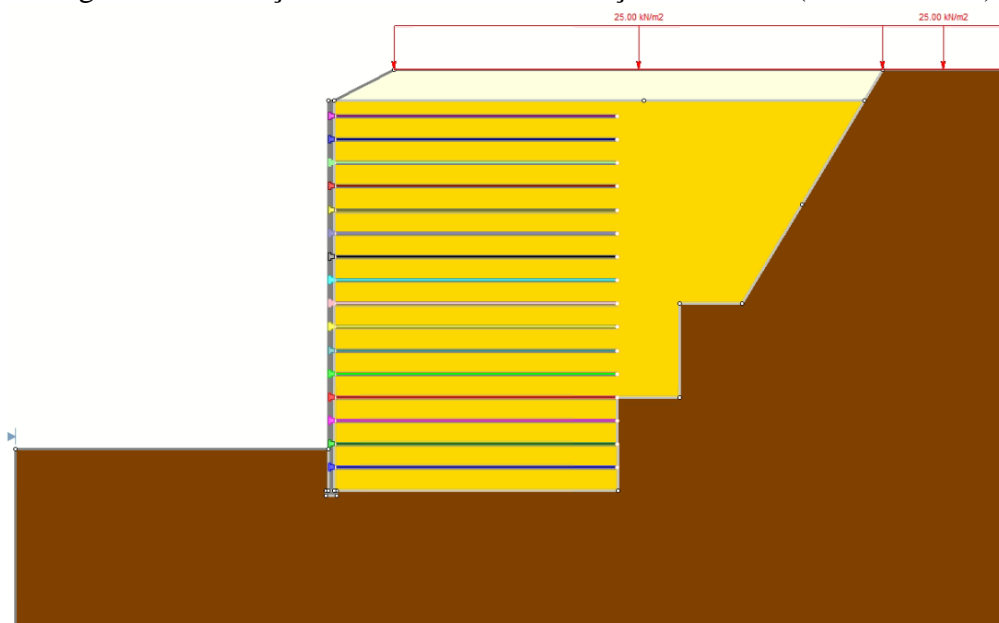
Nesse trabalho, foi mantido espaçamento horizontal e vertical iguais para as estruturas desse tipo em todas as alturas analisadas, a fim de criar uma semelhança com o tipo de reforço utilizado nas estruturas em Terramesh.

Figura 36 – Propriedades dos elementos de reforço (Terra Armada)

Nome do Suporte	Cor	Aplicação de Força	Espaçamento Horizontal (m)	Capacidade à Tração (kN)	Resistência à Aderência (kN/m)
Fita 1		Passiva (Método B)	0,75	32,8	20,7
Fita 2		Passiva (Método B)	0,75	32,8	19,6
Fita 3		Passiva (Método B)	0,75	32,8	18,5
Fita 4		Passiva (Método B)	0,75	32,8	17,4
Fita 5		Passiva (Método B)	0,75	32,8	16,3
Fita 6		Passiva (Método B)	0,75	32,8	15,3
Fita 7		Passiva (Método B)	0,75	32,8	14,2
Fita 8		Passiva (Método B)	0,75	32,8	13,1
Fita 9		Passiva (Método B)	0,75	32,8	12
Fita 10		Passiva (Método B)	0,75	32,8	10,9
Fita 11		Passiva (Método B)	0,75	32,8	10,68
Fita 12		Passiva (Método B)	0,75	32,8	10,65
Fita 13		Passiva (Método B)	0,75	32,8	10,34
Fita 14		Passiva (Método B)	0,75	32,8	9,73
Fita 15		Passiva (Método B)	0,75	32,8	8,83
Fita 16		Passiva (Método B)	0,75	32,8	7,65

Fonte: Autora(2025).

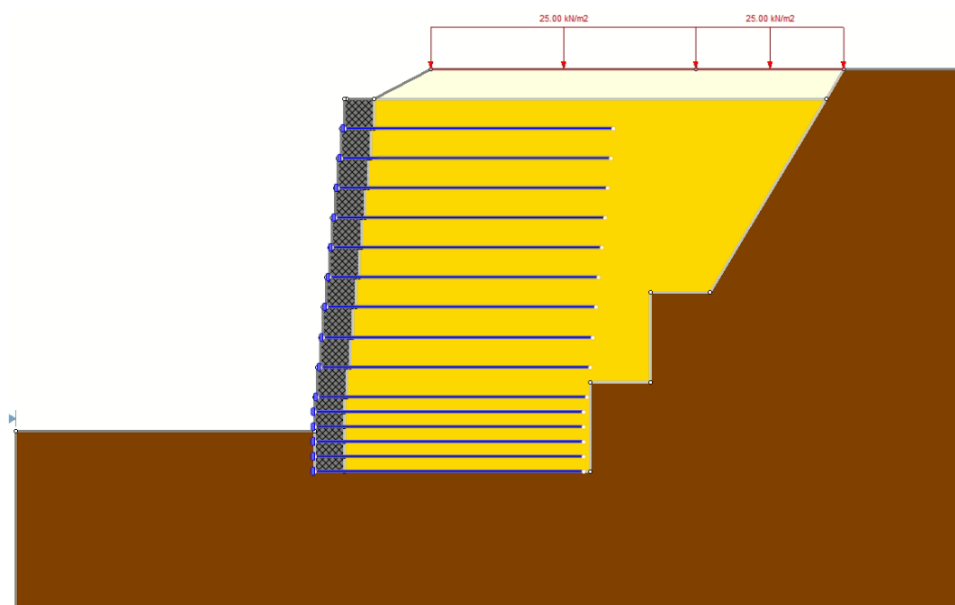
Figura 37 – Inserção dos elementos de reforço no modelo (Terra Armada)



Fonte: Autora(2025).

Já para o sistema de Terramesh, a inserção dos reforços foi realizada de forma mais ágil, utilizando os parâmetros de resistência, espaçamento e comprimento dos reforços descritos no capítulo 4.4.2, simplificando a modelagem e otimizando o tempo de configuração. A Figura 38 ilustra a disposição dos reforços no sistema Terramesh, conforme aplicado neste estudo, enquanto a figura 39 mostra as propriedades do reforço utilizado.

Figura 38 – Inserção dos elementos de reforço no modelo (Terramesh)



Fonte: Autora(2025).

Figura 39 – Propriedades do reforço adotado

MALHA DT Polímac 80	
PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	
Tipo de Suporte	Geossintético
Aplicação de Força	Passiva (Método B)
Force Orientation	Parallel to Reinforcement
Strip Coverage (%)	100
Long Term Design Strength	45.87 kN/m
Anchorage	Slope Face
Connection Strength Input	Constant
Connection Strength	45.87 kN/m
Input Type	Coefficient of Interaction
Coefficient of Interaction	1
Material Dependent	Yes
Utilizar Cargas Externas na Computação de Resistência	Sim

Fonte: Autora(2025).

Durante a configuração dos parâmetros dos elementos de reforço do sistema Terramesh, também foram definidos os coeficientes de interação entre solo e reforço, conforme orientações do catálogo técnico da fornecedora. Esses valores foram aplicados diretamente nas propriedades dos reforços inseridos no modelo e estão representados na Tabela 16:

Tabela 16 – Coeficientes de interação utilizados

Interação	a'
Reforço - Areia	0,65
Reforço - Argila	0,3
Reforço – Reforço	1

*Valor médio do fator de interação a' , determinado por ensaios.

Fonte: Adaptado de documentação técnica Maccaferri.

Finalizada a modelagem, obteve-se a geometria consolidada de cada sistema, pronta para análise de estabilidade.

4.6 Análise de Custo

Com o objetivo de complementar a análise técnica desenvolvida ao longo deste trabalho, realizou-se uma avaliação comparativa dos custos envolvidos na execução dos sistemas de contenção em solo reforçado do tipo Terra Armada e Terramesh. Para tanto, foram levantados os custos unitários por metro quadrado (R\$/m²) correspondentes a cada sistema, considerando os principais insumos e etapas construtivas envolvidos na obra, tais como fornecimento de materiais, mão de obra, transporte e montagem. Como mencionado no capítulo anterior, é levada em consideração uma extensão de 50 m para cada tipo

construtivo.

A Tabela 17 apresenta os valores unitários por metro cúbico estimados para cada solução analisada:

Tabela 17 - Custo unitário por metro cúbico dos sistemas de contenção

Sistema de Contenção	Custo Unitário (R\$/m³)
Terra Armada	1762,40
Terramesh	2133,86

Fonte: Autora(2025).

Com base nesses valores, foram calculados os custos totais estimados para as contenções com alturas de 5,0m, 7, m, 10,0m e 12,5m, considerando volumes correspondentes à geometria de cada estrutura e suas respectivas soluções construtivas. A Tabela 18 resume os resultados obtidos para cada altura analisada:

Tabela 18 – Estimativa de custo total por altura e sistema

Altura da Contenção (m)	Terra Armada (R\$)	Terramesh (R\$)
5,0	440.599,08	533.466,09
7,5	660.898,61	800.199,13
10,0	881.198,15	1.066.932,18
12,5	1.101.497,69	1.333.665,22

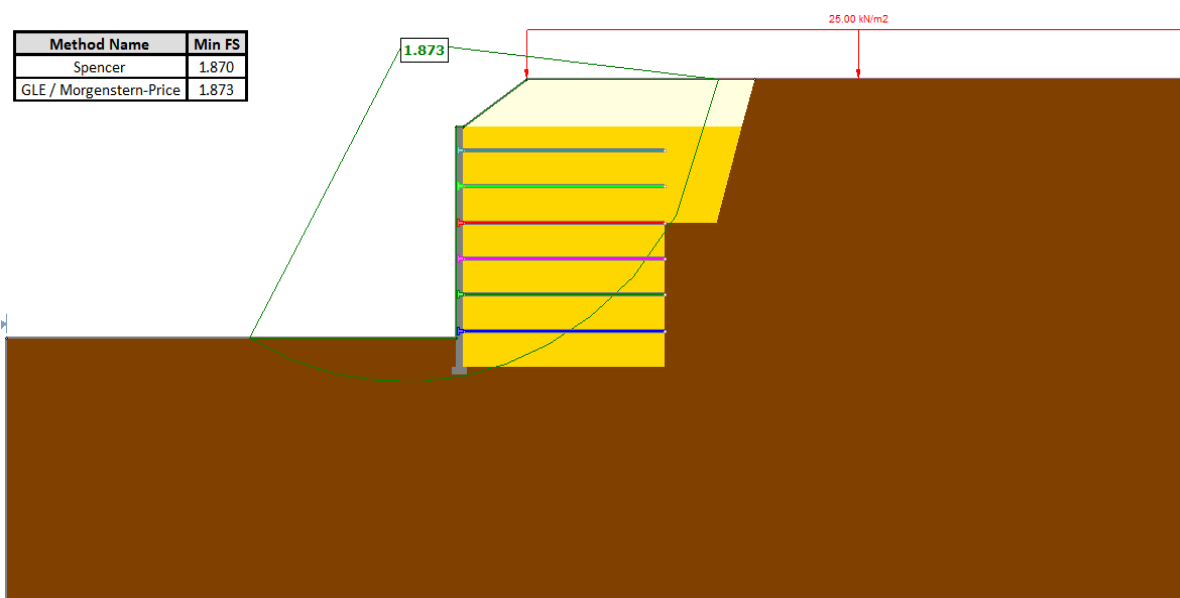
Fonte: Autora(2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir das análises de estabilidade global realizadas no *software* Slide2, considerando os sistemas de contenção em solo reforçado do tipo Terra Armada e Terramesh, aplicados em quatro diferentes alturas: 5 m, 7,5 m, 10 m e 12,5 m. São analisados os fatores de segurança obtidos para cada estrutura, a fim de verificar sua concordância com a norma NBR 16920-1(ABNT, 2021). Sendo assim, o fator de segurança mínimo será igual a 1,5 (Áreas com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas e vias e estradas principais de acesso).

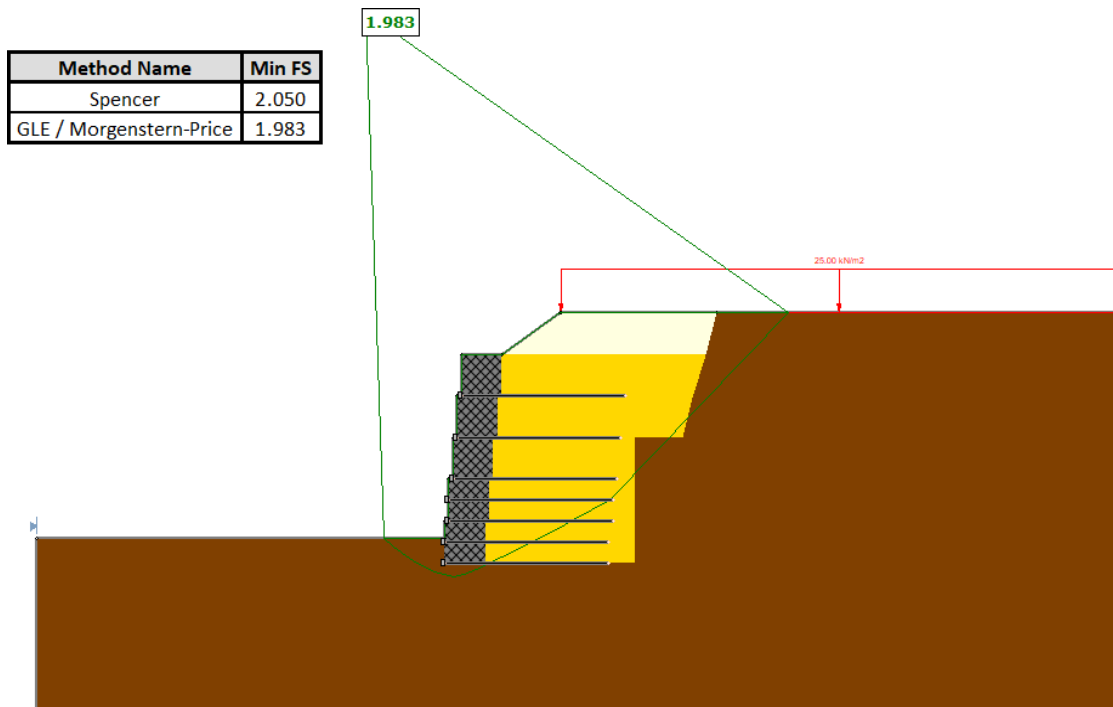
Para a altura de 5m, obtiveram-se valores satisfatórios (acima de 1,5) para ambos os tipos de estruturas, como mostra as figuras 40 e 41:

Figura 40 – Análise em Terra Armada, altura igual a 5m



Fonte: Autora(2025).

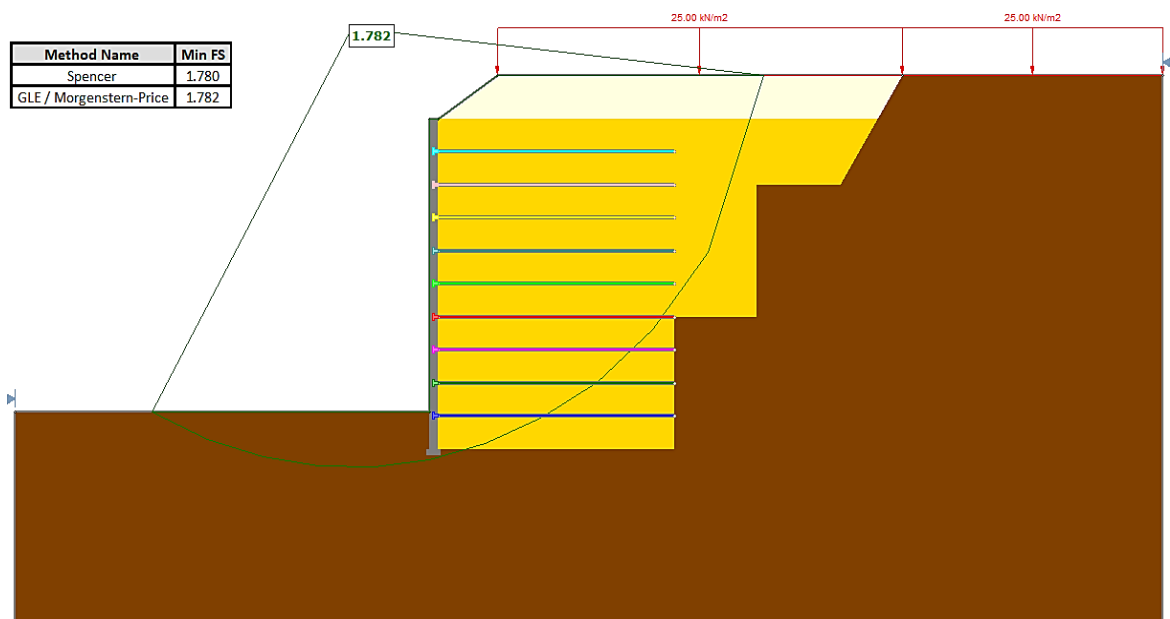
Figura 41 – Análise em Terramesh, altura igual a 5m



Fonte: Autora(2025)

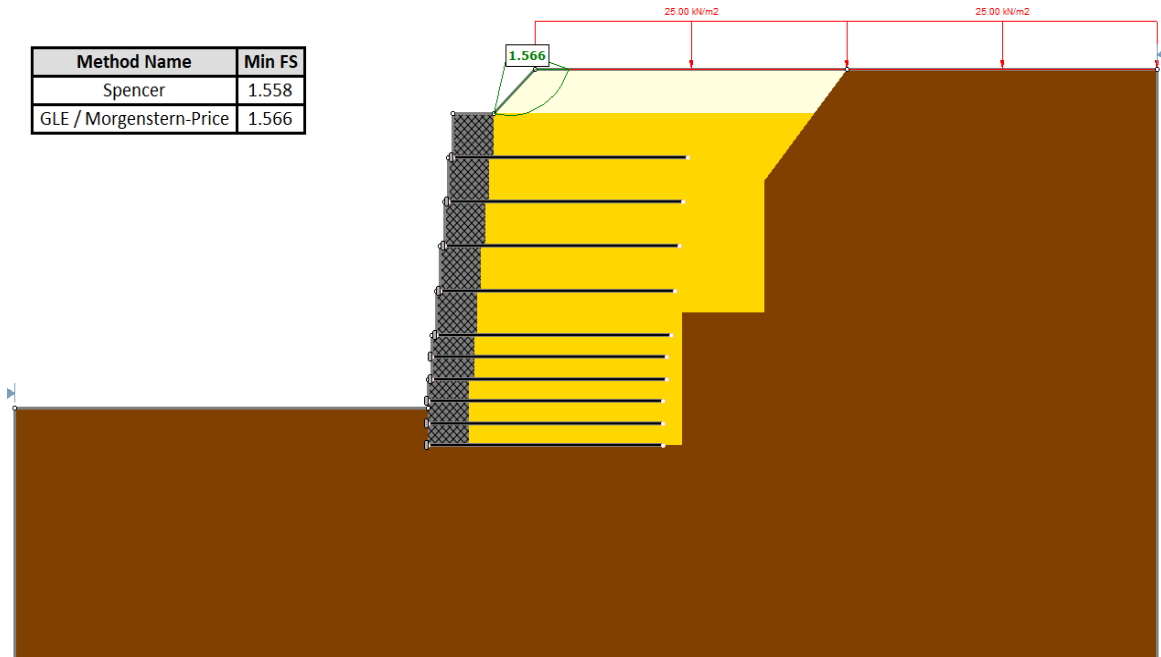
O mesmo ocorreu para a altura de 7,5 m, com valores satisfatórios (acima de 1,5) para ambos os tipos de estruturas, como mostram as figuras 42 e 43:

Figura 42 – Análise em Terra Armada, altura igual a 7,5m



Fonte: Autora(2025).

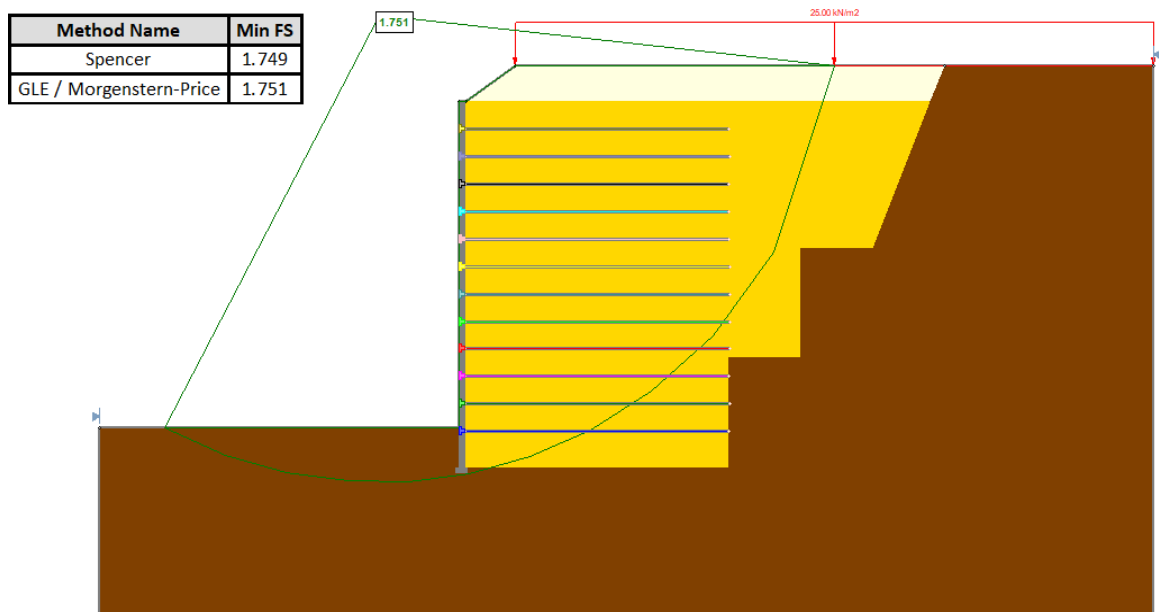
Figura 43 – Análise em Terramesh, altura igual a 7,5m



Fonte: Autora(2025).

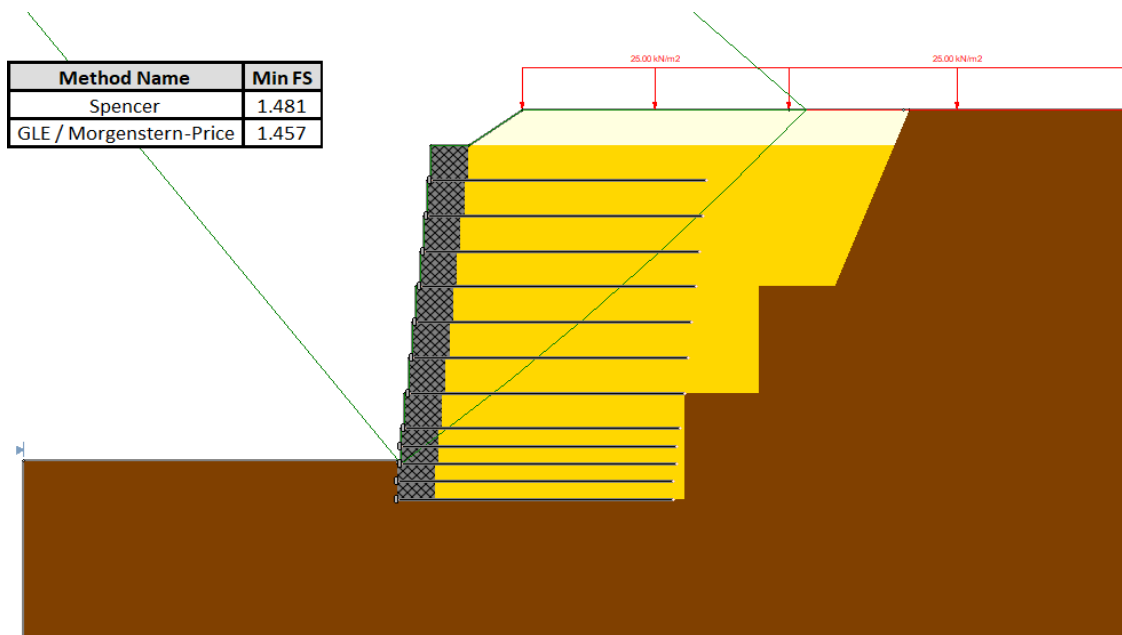
Para a altura de 10 m, obtiveram-se valores satisfatórios (acima de 1,5) apenas para a estrutura em Terra Armada, como mostra a figura 44. Para a estrutura em Terramesh os fatores de segurança obtidos não foram satisfatórios, essa análise está apresentada na figura 45.

Figura 44 - Análise em Terra Armada, altura igual a 10m



Fonte: Autora(2025).

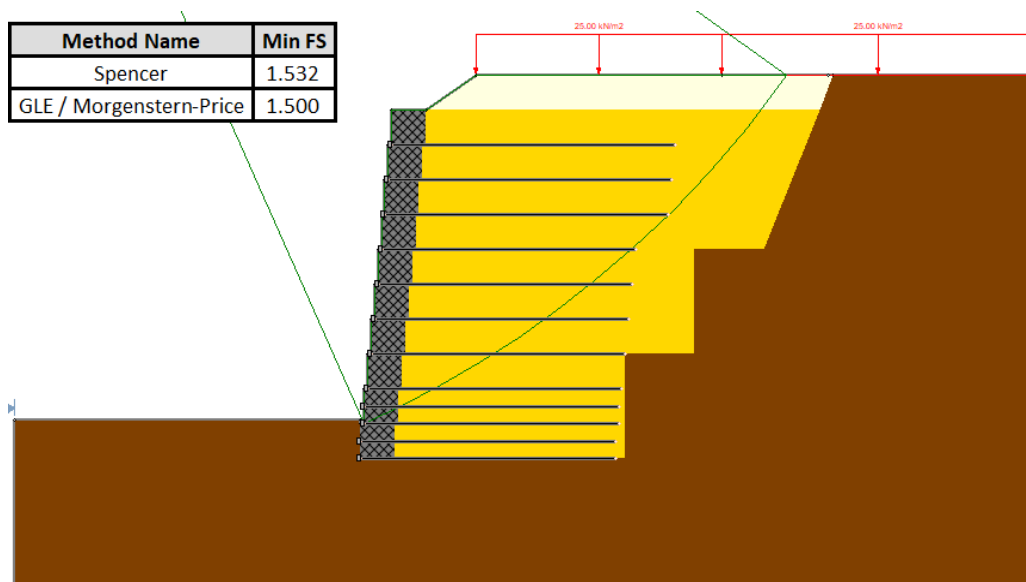
Figura 45 - Análise em Terramesh, altura igual a 10m



Fonte: Autora(2025).

Assim, fez-se necessária uma adaptação dos reforços, já que seguindo o pré-dimensionamento mínimo estabelecido não foi encontrado um fator de segurança satisfatório. Observou-se que aumentando o comprimento das três últimas fitas (próximas ao topo da estrutura) de 7,37m para 8,20m, resultou em uma análise satisfatória, conforme pode ser observado na figura 46.

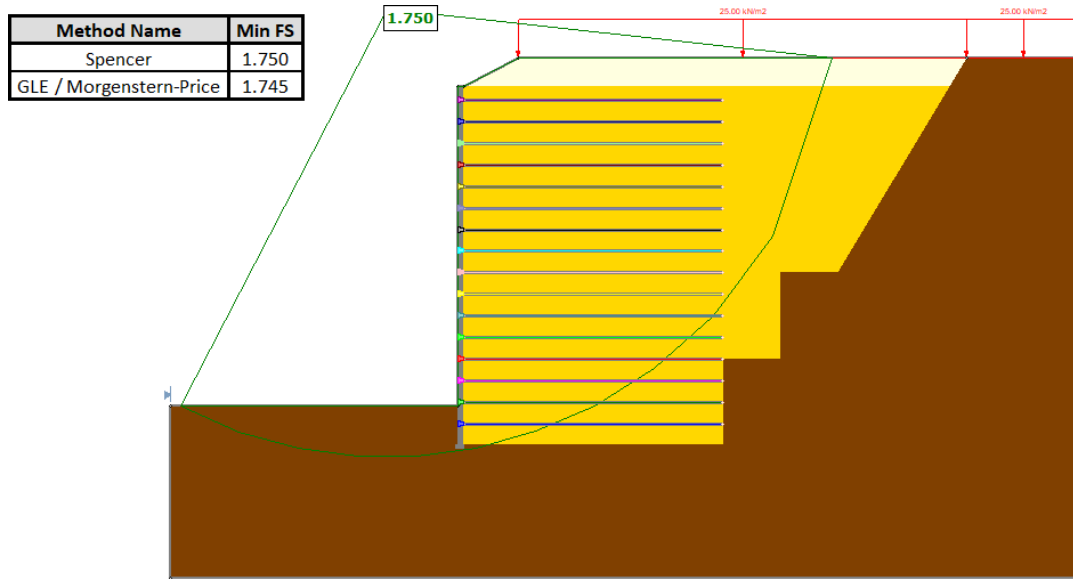
Figura 46 – Segunda análise em Terramesh, altura igual a 10m



Fonte: Autora(2025).

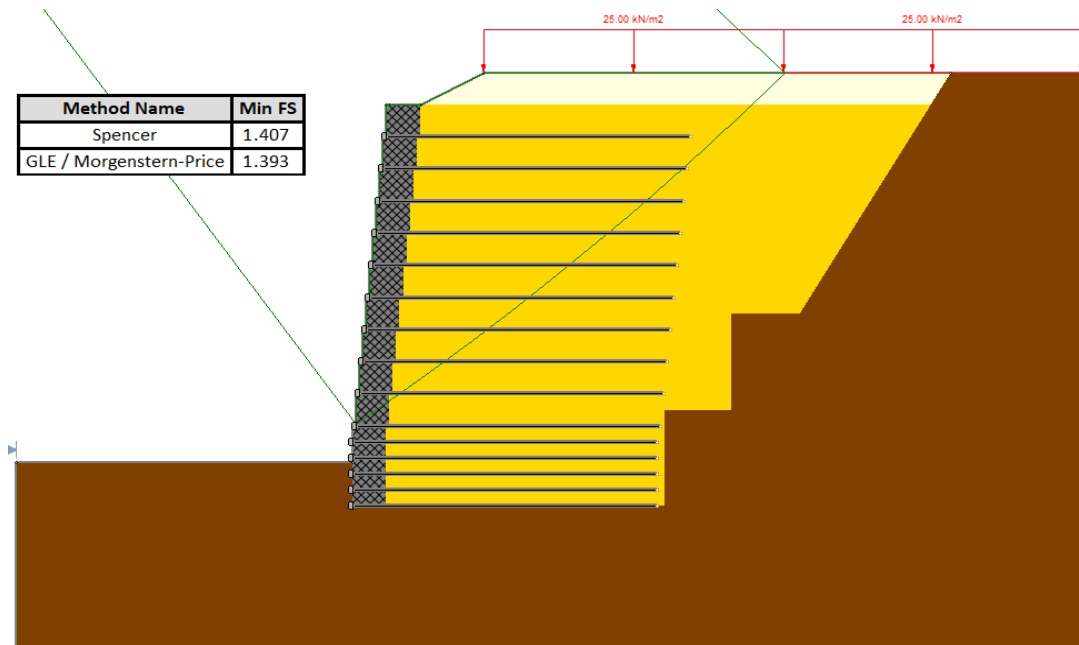
O mesmo ocorreu para a maior altura analisada, igual a 12,5m. Obteve-se ainda uma análise satisfatória para a estrutura em terra armada, como mostrado na figura 47. Entretanto, o mesmo não ocorreu para a estrutura em Terramesh, como mostra a figura 48.

Figura 47 - Análise em Terra Armada, altura igual a 10m.



Fonte: Autora(2025).

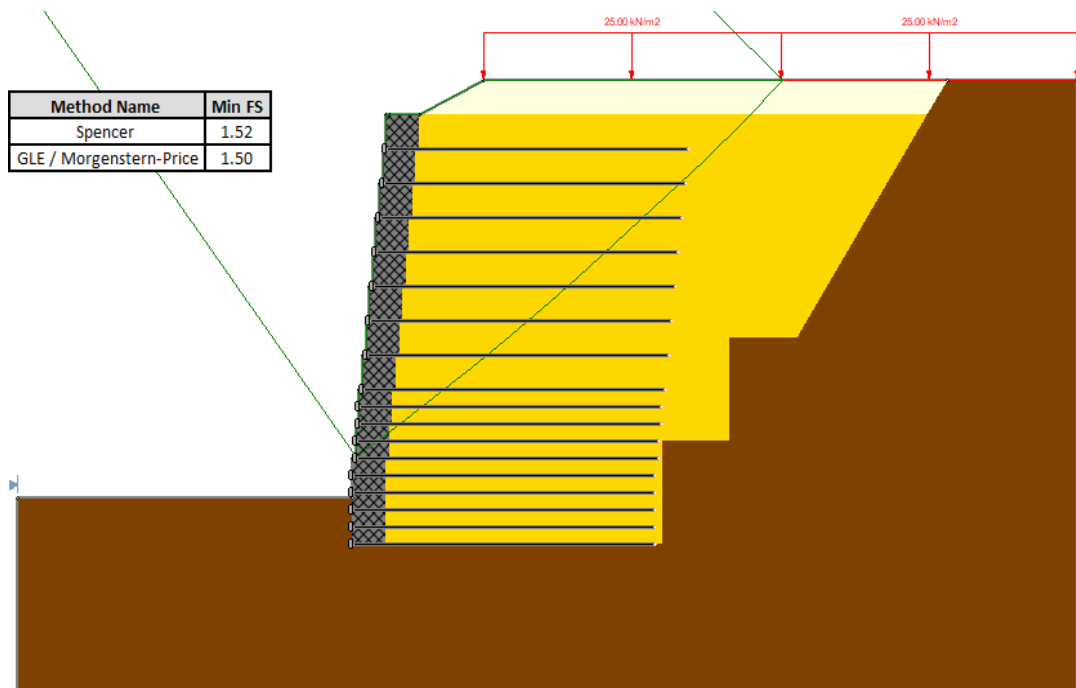
Figura 48 - Análise em Terramesh, altura igual a 10m



Fonte: Autora(2025).

Dessa forma, fez-se necessária uma segunda análise para a estrutura em Terramesh. Aqui, notou-se que apenas aumentar o comprimento do reforço não traria o resultado esperado e concluiu-se que tal estabilidade seria alcançada aumentando a quantidade de gabiões de meio metro, aumentando-se assim o número de reforços, como mostrado na figura 49.

Figura 49 - Segunda análise em Terramesh, altura igual a 10m



Fonte: Autora(2025).

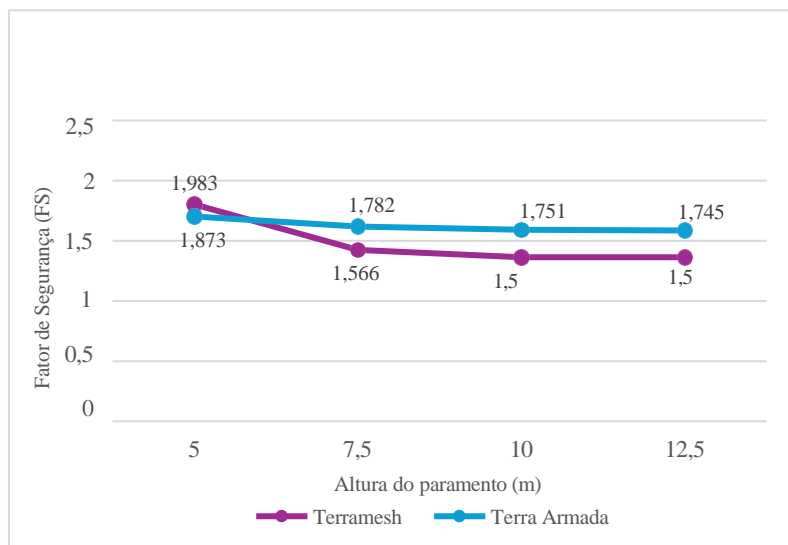
Os fatores de segurança obtidos estão organizados nas tabelas 17 e 18, conforme o método de cálculo utilizado. Em seguida, foram elaborados gráficos de linhas sobrepostas com os dados das duas tabelas, permitindo uma comparação visual direta entre os sistemas para cada altura e método, mostrados nas figuras 50 e 51. Essa abordagem facilita a identificação de tendências e variações de desempenho estrutural entre os sistemas de contenção analisados.

Tabela 19 - Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Spencer

Altura (m)	Terramesh	Terra Armada
5,0	2,05	1,870
7,5	1,558	1,780
10,0	1,532	1,749
12,5	1,52	1,750

Fonte: Autora(2025).

Figura 50 – Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Spencer, apresentados em gráfico.



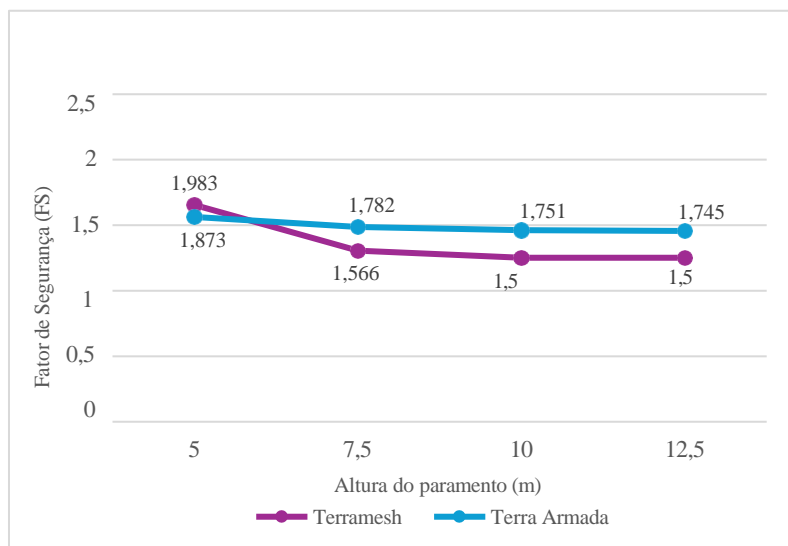
Fonte: Autora(2025).

Tabela 20 - Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Morgenstern-Price

Altura (m)	Terramesh	Terra Armada
5,0	1,983	1,873
7,5	1,566	1,782
10,0	1,50	1,751
12,5	1,50	1,745

Fonte: Autora(2025).

Figura 51 - Fatores de Segurança (FS) obtidos pelo método de Morgenstern-Price apresentados em gráfico



Fonte: Autora(2025).

A partir da interpretação dos resultados, é possível observar que, em geral, o sistema Terra Armada apresentou maior estabilidade global, mantendo fatores de segurança superiores ao mínimo exigido pela norma, inclusive nas condições de maior solicitação estrutural. Isso evidencia a eficiência do sistema no controle de deformações e na resistência ao deslizamento global, mesmo com o pré-dimensionamento básico adotado nesta análise.

Por outro lado, o sistema Terramesh demonstrou um bom desempenho nas alturas menores (5 m e 7,5 m), obtendo fatores de segurança satisfatórios sem a necessidade de ajustes adicionais. Contudo, à medida que a altura da estrutura aumentou, tornou-se evidente a necessidade de adaptações no projeto, especialmente a partir dos 10 m. Para garantir a estabilidade da estrutura em alturas maiores, foi necessário aumentar o comprimento dos reforços ou a quantidade de gabiões, o que implicou em ajustes significativos no dimensionamento inicial.

Em termos de viabilidade técnica, ambos os sistemas se mostraram eficazes em situações específicas, mas o Terramesh demandou maior refinamento de projeto nas alturas mais elevadas. Essa característica pode influenciar na escolha do sistema a ser utilizado em função do porte da obra, das condições de solo e da altura requerida para a contenção.

Portanto, conclui-se que o sistema Terra Armada apresenta desempenho mais robusto e previsível em alturas elevadas, enquanto o Terramesh pode ser uma solução eficiente para contenções de menor porte, desde que adequadamente dimensionado. Essa comparação é essencial para orientar a escolha do sistema mais adequado, considerando fatores técnicos e de segurança.

A análise de custo do Capítulo 4 indicou que a solução em Terra Armada apresenta menor custo por metro quadrado em comparação ao Terramesh, o que pode representar uma economia significativa em obras de grande porte. No entanto, outros fatores igualmente importantes devem ser considerados na decisão pelo tipo construtivo a ser adotado. Vale ressaltar, também, que o sistema de Terramesh foi dimensionado para uma vida útil igual a 120 anos, enquanto o sistema de Terra Armada foi dimensionado para 50 anos.

No entanto, ao se avaliar a escolha do tipo de contenção a ser adotado em um projeto, é necessário considerar não apenas os critérios de estabilidade global, mas também outros aspectos técnicos e operacionais que influenciam na viabilidade da solução. Nesse sentido, sistemas como o Terramesh, apesar de apresentarem fatores de segurança ligeiramente inferiores, podem oferecer vantagens em determinados contextos, como a redução do tempo de elaboração do projeto executivo, dado o menor número de etapas envolvidas no pré-dimensionamento, além de uma execução relativamente mais rápida, especialmente em obras com restrições logísticas ou de cronograma e o tempo de vida útil do sistema. Tais características podem representar ganhos relevantes em termos de produtividade e gerenciamento da obra, desde que compatíveis com os requisitos de segurança e desempenho exigidos para o empreendimento.

6. CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

6.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo principal comparar o desempenho dos sistemas de contenção Terramesh e Terra Armada, considerando aspectos estruturais e operacionais por meio de modelagens realizadas no software Slide2. A análise foi conduzida para diferentes alturas de contenção, permitindo observar como cada sistema se comporta sob variações geométricas e condições de carregamento.

Os resultados mostraram que o sistema Terra Armada apresentou, de modo geral, fatores de segurança mais elevados, evidenciando uma maior eficiência estrutural no que diz respeito à estabilidade global. No entanto, essa superioridade técnica não deve ser analisada de forma isolada. O sistema Terramesh, apesar de apresentar fatores de segurança levemente inferiores, destacou-se por vantagens operacionais relevantes, como menor tempo de execução, maior facilidade de adaptação ao terreno natural e maior flexibilidade em canteiros com limitações logísticas.

Dessa forma, pode-se concluir que a escolha entre os dois sistemas não deve se basear unicamente em critérios estruturais, mas sim em uma análise global que considere as características do terreno, as demandas do projeto, o cronograma de execução e a viabilidade econômica. O trabalho reforça a importância de se avaliar diferentes soluções técnicas de maneira integrada, considerando os múltiplos fatores que influenciam a tomada de decisão em projetos geotécnicos.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, enumeram-se:

- Realizar estudos de campo para avaliar os resultados obtidos em modelagens teóricas, utilizando casos reais de obras com Terramesh e Terra Armada.
- Aplicar a comparação entre os sistemas em projetos reais de contenção, considerando dados geotécnicos locais e geometrias definidas em projetos executivos.
- Avaliar a influência de diferentes tipos de solos na eficiência dos sistemas analisados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009 – Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13253:2018 – Geossintéticos – Requisitos para geogrelhas. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16920:2021 – Estruturas de solos reforçados com elementos metálicos. Rio de Janeiro, 2021.

BARROS, P. L. A. Obras de Contenção: Manual Técnico. Maccaferri. Jundiaí, 2017.

B2A CONTENÇÕES. Obras executadas. Disponível em: <https://b2acontencoes.com.br/#obras>. Acesso em: 23 mar. 2025.

DAS, Braja M. Princípios de Engenharia Geotécnica. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais. Rio de Janeiro: IPR, 1996. 225 p. (IPR. Publ., 698). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/698-manual-de-projeto-de-obras-de-arte-especiais-1.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2025.

DUNCAN, J. Michael. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 126, n. 4, p. 307-316, 2000.

EHRlich, Maurício; BECKER, Leonardo. Muros e taludes de solo reforçado. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 mar. 2025.

GUIA DA ENGENHARIA. Empuxos de Terra: conceitos iniciais. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/empuxos-terra-conceitos-iniciais/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MACCAFERRI DO BRASIL. Manual Técnico – Reforço de Solos. Jundiaí: Maccaferri do Brasil, 2009. Disponível em:

[https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/manual tecnico reforco de solos.pdf](https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/manual_tecnico_reforco_de_solos.pdf). Acesso em: 02 abr. 2025.

MACCAFERRI DO BRASIL LTDA. Reforço e estabilização de solos: necessidades e soluções. Jundiaí: Maccaferri, [s.d.]. Disponível em: [https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/2786/25985/reforco-estabilizacao-solos-necessidades- e-solucoes.pdf](https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/2786/25985/reforco-estabilizacao-solos-necessidades-e-solucoes.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

MACCAFERRI LTD. Maccaferri Terramesh System: BBA HAPAS Certificate 16/H247. Didcot: British Board of Agrément, 2019. 14 p. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/uk>. Acesso em: 9 abr. 2025.

MOTA, A.; SANTOS, G. L.; LOPES, B. C.; SILVA, R. F. Desempenho estrutural de muros de contenção em solo reforçado. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 40, n. 2, p. 145-159, 2019.

PEDREIRÃO. Dicas de construção civil descomplicada. Disponível em: <https://pedreira.com.br/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ROCSCIENCE. Geosynthetic. In: Slide2 Documentation. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/support-2/define-support-properties/geosynthetic>. Acesso em: 9 abr. 2025.

SILVA, A.; SANTOS, E. Desempenho de sistemas de gabiões em regiões de alta pluviosidade. Revista de Engenharia Civil, v. 25, p. 87-102, 2018.

SOUZA, H. Solos Reforçados: Princípios e Aplicabilidades. Editora Engenharia, 1980.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

VIDAL, H. The Principle of Reinforced Earth. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1969.

ANEXO 1: Terra Armada H1=5m

Geometria	
Tipo de Geometria	1
H ₁ (m)	5,00
h' (m)	1,00
H(m)	6,00
Tipo de Solo	A
Características da Fita	
e ₀ (mm)	4,00
b (mm)	50,00
f _y (kN/m ²)	345.000,00
Φ _{Parafuso} (mm)	12,70
e _s (mm)	0,75
γ _r - Mínimo	1,50
α (paramento)	0,85
S _v (m)	0,75
S _h (m)	0,75
h _{inicial} (m)	0,75
h' (m)	1,00
γ _r	1,50
L _{Adotado} = L _a + L _r (m)	4,02
q (kN/m ²)	25

Resistência à Tração das Armaduras				
Fita	z (m)	z' (m)	σ _h (kPa)	T _{máx} (kN)
6ª Fita	0,75	1,75	15,12	8,51
5ª Fita	1,50	2,50	18,82	10,59
4ª Fita	2,25	3,25	22,52	12,67
3ª Fita	3,00	4,00	26,22	14,75
2ª Fita	3,75	4,75	29,92	16,83
1ª Fita	4,50	5,50	33,62	18,91

Aderência Solo-Armadura								
L _a (m)	L _r Previsto (m)	L _{Previsto} (m)	L _r (m)	f*	σ _v (kPa)	T _f (kN)	γ _f -Obtido	T _f (kN/m)
1,51	1,72	3,23	2,51	1,27	58,25	18,65	2,19	7,42
1,38	1,86	3,24	2,64	1,18	72,50	22,51	2,13	8,54
1,26	2,03	3,28	2,76	1,08	86,75	25,90	2,04	9,38
1,00	2,23	3,23	3,02	0,98	101,00	30,03	2,04	9,94
0,63	2,47	3,09	3,40	0,89	115,25	34,73	2,06	10,23
0,25	2,77	3,02	3,77	0,79	129,50	38,62	2,04	10,24

ANEXO 2: Terra Armada H1=7,5m

Geometria	
Tipo de Geometria	1
H ₁ (m)	7,50
h' (m)	1,00
H(m)	8,50
Tipo de Solo	A
Características da Fita	
e ₀ (mm)	4,00
b (mm)	50,00
f _y (kN/m ²)	345.000,00
φ _{Parafuso} (mm)	12,70
e _s (mm)	0,75
γ _r - Mínimo	1,50
α (paramento)	0,85
S _v (m)	0,75
S _h (m)	0,75
h _{inicial} (m)	0,75
h' (m)	1,00
γ _r	1,50
L _{Adotado} = L _a + L _r (m)	5,70
q (kN/m ²)	25

Resistência à Tração das Armaduras					
Fita	z (m)	z' (m)	σ _h (kPa)	σ _h -Total (kPa)	T _{máx} (kN)
9ª Fita	0,75	1,75	15,12	15,12	8,51
8ª Fita	1,50	2,50	18,82	18,82	10,59
7ª Fita	2,25	3,25	22,52	22,52	12,67
6ª Fita	3,00	4,00	26,22	26,22	14,75
5ª Fita	3,75	4,75	29,92	29,92	16,83
4ª Fita	4,50	5,50	33,62	33,62	18,91
3ª Fita	5,25	6,25	37,32	37,32	20,99
2ª Fita	6,00	7,00	41,02	41,02	23,07
1ª Fita	6,75	7,75	44,72	44,72	25,15

Aderência Solo-Armadura									
Fita	L _a (m)	L _r Previsto (m)	L _{Previsto} (m)	L _r (m)	f*	σ _v (kPa)	T _f (kN)	γ _f -Obtido	T _f (kN/m)
9ª Fita	2,26	1,72	3,98	3,44	1,27	58,25	25,51	3,00	7,42
8ª Fita	2,13	1,86	3,99	3,56	1,18	72,50	30,41	2,87	8,54
7ª Fita	2,01	2,03	4,03	3,69	1,08	86,75	34,57	2,73	9,38
6ª Fita	1,88	2,23	4,11	3,81	0,98	101,00	37,90	2,57	9,94
5ª Fita	1,76	2,47	4,23	3,94	0,89	115,25	40,27	2,39	10,23
4ª Fita	1,50	2,77	4,27	4,20	0,79	129,50	42,97	2,27	10,24
3ª Fita	1,13	3,01	4,14	4,57	0,73	143,75	47,73	2,27	10,44
2ª Fita	0,75	3,01	3,76	4,95	0,73	158,00	56,77	2,46	11,5
1ª Fita	0,38	3,01	3,39	5,32	0,73	172,25	66,58	2,65	12,5

ANEXO 3: Terra Armada H1=10m

Geometria	
Tipo de Geometria	1
H ₁ (m)	10,00
h' (m)	1,00
H(m)	11,00
Tipo de Solo	A
Características da Fita	
e ₀ (mm)	4,00
b (mm)	50,00
f _y (kN/m ²)	345.000,00
Φ _{Parafuso} (mm)	12,70
e _s (mm)	0,75
γ _r - Mínimo	1,50
α (paramento)	0,85
S _v (m)	0,75
S _h (m)	0,75
h _{inicial} (m)	0,75
h' (m)	1,00
γ _r	1,50
L _{Adotado} = L _a + L _r (m)	7,37
q (kN/m ²)	25

Resistência à Tração das Armaduras				
Fita	z (m)	z' (m)	σ _h (kPa)	T _{máx} (kN)
12ª Fita	0,75	1,75	15,58	8,76
11ª Fita	1,50	2,50	19,47	10,95
10ª Fita	2,25	3,25	23,37	13,14
9ª Fita	3,00	4,00	27,26	15,33
8ª Fita	3,75	4,75	31,15	17,52
7ª Fita	4,50	5,50	35,05	19,71
6ª Fita	5,25	6,25	38,94	21,91
5ª Fita	6,00	7,00	42,84	24,10
4ª Fita	6,75	7,75	46,73	26,29
3ª Fita	7,50	8,50	50,63	28,48
2ª Fita	8,25	9,25	54,52	30,67
1ª Fita	9,00	10,00	58,41	32,86

Aderência Solo-Armadura									
Fita	L _a (m)	L _r Previsto (m)	L _{Previsto} (m)	L _r (m)	f*	σ _v (kPa)	T _r (kN)	γ _f -Obtido	T _r (kN/m)
12ª Fita	3,00833	1,71885	4,72718	4,36	1,27	60,00	33,35	3,81	7,65
11ª Fita	2,88333	1,85995	4,74328	4,49	1,18	75,00	39,63	3,62	8,83
10ª Fita	2,75833	2,02629	4,78463	4,61	1,08	90,00	44,87	3,41	9,73
9ª Fita	2,63333	2,22531	4,85865	4,74	0,98	105,00	48,96	3,19	10,34
8ª Fita	2,50833	2,46768	4,97602	4,86	0,89	120,00	51,79	2,96	10,65
7ª Fita	2,38333	2,76930	5,15264	4,99	0,79	135,00	53,25	2,70	10,68
6ª Fita	2,25833	3,01498	5,27331	5,11	0,73	150,00	55,71	2,54	10,90
5ª Fita	2,00000	3,01498	5,01498	5,37	0,73	165,00	64,38	2,67	12,0
4ª Fita	1,62500	3,01498	4,63998	5,75	0,73	180,00	75,13	2,86	13,1
3ª Fita	1,25000	3,01498	4,26498	6,12	0,73	195,00	86,71	3,04	14,2
2ª Fita	0,87500	3,01498	3,88998	6,50	0,73	210,00	99,10	3,23	15,3
1ª Fita	0,50000	3,01498	3,51498	6,87	0,73	225,00	112,31	3,42	16,3

ANEXO 4: Terra Armada H1=12,5m

Geometria	
Tipo de Geometria	1
H ₁ (m)	12,50
h' (m)	1,00
H(m)	13,50
Tipo de Solo	A
Características da Fita	
e ₀ (mm)	4,00
b (mm)	50,00
f _y (kN/m ²)	345.000,00
Φ _{Parafuso} (mm)	12,70
e _s (mm)	0,75
γ _r - Mínimo	1,50
α (paramento)	0,85
S _v (m)	0,75
S _h (m)	0,75
h _{inicial} (m)	0,75
h' (m)	1,00
γ _r	1,50
L _{Adotado} = L _a + L _r (m)	9,05
q (kN/m ²)	25

Resistência à Tração das Armaduras				
Fita	z (m)	z' (m)	σ _h (kPa)	T _{máx} (kN)
16ª Fita	0,75	1,75	15,58	8,76
15ª Fita	1,50	2,50	19,47	10,95
14ª Fita	2,25	3,25	23,37	13,14
13ª Fita	3,00	4,00	27,26	15,33
12ª Fita	3,75	4,75	31,15	17,52
11ª Fita	4,50	5,50	35,05	19,71
10ª Fita	5,25	6,25	38,94	21,91
9ª Fita	6,00	7,00	42,84	24,10
8ª Fita	6,75	7,75	46,73	26,29
7ª Fita	7,50	8,50	50,63	28,48
6ª Fita	8,25	9,25	54,52	30,67
5ª Fita	9,00	10,00	58,41	32,86
4ª Fita	9,75	10,75	62,31	35,05
3ª Fita	10,50	11,50	66,20	37,24
2ª Fita	11,25	12,25	70,10	39,43
1ª Fita	12,00	13,00	73,99	41,62

Aderência Solo-Armadura									
Fita	L_a (m)	L_r Previsto (m)	$L_{previsto}$ (m)	L_r (m)	f^*	σ_v (kPa)	T_f (kN)	γ_f -Obtido	T_f (kN/m)
16ª Fita	3,76	1,72	5,48	5,29	1,27	60,00	40,42	4,61	7,65
15ª Fita	3,63	1,86	5,49	5,41	1,18	75,00	47,80	4,36	8,83
14ª Fita	3,51	2,03	5,53	5,54	1,08	90,00	53,87	4,10	9,73
13ª Fita	3,38	2,23	5,61	5,66	0,98	105,00	58,52	3,82	10,34
12ª Fita	3,26	2,47	5,73	5,79	0,89	120,00	61,64	3,52	10,65
11ª Fita	3,13	2,77	5,90	5,91	0,79	135,00	63,13	3,20	10,68
10ª Fita	3,01	3,01	6,02	6,04	0,73	150,00	65,79	3,00	10,90
9ª Fita	2,88	3,01	5,90	6,16	0,73	165,00	73,87	3,07	12,0
8ª Fita	2,76	3,01	5,77	6,29	0,73	180,00	82,22	3,13	13,1
7ª Fita	2,50	3,01	5,51	6,55	0,73	195,00	92,73	3,26	14,2
6ª Fita	2,13	3,01	5,14	6,92	0,73	210,00	105,58	3,44	15,3
5ª Fita	1,75	3,01	4,76	7,30	0,73	225,00	119,25	3,63	16,3
4ª Fita	1,38	3,01	4,39	7,67	0,73	240,00	133,74	3,82	17,4
3ª Fita	1,00	3,01	4,01	8,05	0,73	255,00	149,05	4,00	18,5
2ª Fita	0,63	3,01	3,64	8,42	0,73	270,00	165,17	4,19	19,6
1ª Fita	0,25	3,01	3,26	8,80	0,73	285,00	182,11	4,38	20,7