



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SAMUEL TORRES MENEZES

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ATERRO SOBRE SOLO MOLE
REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

CRATEÚS

2022

SAMUEL TORRES MENEZES

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES
REFORÇADOS COM GEOSINTÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof M.Sc. Marcio Avelino de Medeiros

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M513m Menezes, Samuel.
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES REFORÇADOS COM
GEOSSINTÉTICOS / Samuel Menezes. – 2022.
36 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Ciência da Computação, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros.
1. Solos moles. 2. Reforço. 3. Geossintéticos. 4. Modelagem numérica. 5. Simulação numérica. I. Título.
CDD 004
-

SAMUEL TORRES MENEZES

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES
REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
civil.

Aprovada em: 12/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Marcio Avelino de Medeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc. Weber Anselmo dos Ramos Souza
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

A Deus.

À minha Mãe Itacira Torres e à minha Tia
Maria Amélia Torres (In memorian).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força e coragem para chegar até aqui.

Ao professor M.Sc. Marcio Avelino de Medeiros pela valiosa orientação, empenho e disponibilidade para possibilitar a conclusão desse trabalho.

A minha família pelo apoio em todos os momentos.

Aos colegas de faculdade pela amizade e companheirismo durante a graduação.

RESUMO

A execução de aterros sobre solos moles pode ser considerado como um desafio da engenharia geotécnica, devido aos riscos de elevados recalques e rupturas que podem ocorrer, desde a construção, proporcionados pela baixa capacidade de suporte ao longo período de adensamento associado a esse tipo de solo. Em virtude disso, soluções que proporcionem um aumento na estabilidade e capacidade de carga dessas obras são imprescindíveis à sua segurança. A utilização de material geossintético como reforço vem se tornando uma maneira economicamente viável em obras desse tipo, devido a sua elevada resistência ao cisalhamento. Este trabalho apresenta um estudo do comportamento de um aterro sobre solo mole reforçado com geogrelha na interface aterro-solo mole, realizado a partir de uma modelagem computacional via método dos elementos finitos. Foram realizadas análises dos deslocamentos verticais, e do fator de segurança para 3 cenários distintos, e utilizando geogrelhas com diferentes resistências. Os resultados mostraram que para alguns casos a utilização do reforço proporcionou uma redução nos deslocamentos e também um incremento no fator de segurança do aterro.

Palavras-chave: Solos moles; Reforço; Geogrelha; Modelagem numérica; Simulação numérica

ABSTRACT

The execution of embankments on soft soils can be considered a challenge for geotechnical engineering, due to the risks of high settlements and ruptures that can occur, since construction, provided by the low support capacity over the long period of consolidation associated with this type of soil. As a result, solutions that provide an increase in the stability and load capacity of these works are essential for their safety. The use of geosynthetic material as reinforcement has become an economically viable way in works of this type, due to its high shear resistance. This work presents a study of the behavior of an embankment on soft soil reinforced with geogrid at the embankment-soft soil interface, carried out from a computational modeling via the finite element method. Analyzes of the vertical displacements and the safety factor were carried out for 3 different scenarios, using geogrids with different resistances. The results showed that for some cases the use of reinforcement provided a reduction in displacements and also an increase in the landfill safety factor.

Keywords: Soft soils; Reinforcement; Geogrid; Numerical modeling; numerical simulation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento e segurança de obras de reforço de solo.	13
Figura 2 - Ilustração dos carregamentos induzidos pelo aterro na fundação de solo mole com e sem reforço	14
Figura 3 - Ilustração esquemática da restrição das deformações na fundação de solo mole com e sem reforço	15
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.	17
Figura 5 - Modelagem do aterro	20
Figura 6 - Representação da malha utilizada para simulação do aterro reforçado com geogrelha sobre solo mole	22
Figura 7 - Gráfico de análise de convergência do domínio	23
Figura 8 - Gráfico excesso de poro-pressão (kN/m ²) x tempo (dias)	23
Figura 9 - Gráfico deslocamento vertical x reforço.....	26
Figura 10 - Pontos de plastificação nos casos G2 e G3.....	27
Figura 11 - Gráfico deslocamento vertical G2 e G3.....	28
Figura 12 - Gráfico fator de segurança situação 01.....	29
Figura 13 - Gráfico fator de segurança Situação 02.....	30
Figura 14 - Fator de segurança situação 03	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do material do aterro	18
Tabela 2 - Características do material do solo mole.....	19
Tabela 3 - Identificação do Reforço	20
Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos- DNIT 381/2021 PRO.....	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo Geral	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Solos Moles	12
2.2 Aterros reforçados	12
2.2.1 Cargas Solicitantes	13
2.2.2 Cargas Resistentes	14
2.3 Geossintéticos.....	15
2.3.1 Funções.....	15
3 METODOLOGIA	17
3.1 Descrição do Problema.....	17
3.2 Parâmetros dos materiais.....	18
3.2.1 Aterro.....	18
3.2.2 Solo mole.....	19
3.2.3 Reforço	19
3.3 Condições Iniciais.	20
3.3.1 Carregamento e condições de contorno.....	20
3.3.2 Etapas de carregamento	21
3.2.2.1 Cenário 01:	21
3.2.2.2 Cenário 02:	21
3.2.2.3 Cenário 03:	21
3.4 Geração da malha	21
3.5 Calibração do modelo numérico.....	22
3.7 Análise do Fator de Segurança	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26

4.1 Deslocamentos.....	26
4.1.1 Cenário 01	26
4.1.2 Cenário 02	28
4.1.3 Cenário 03	28
4.2 Influência da rigidez	29
4.3 Fatores de Segurança	29
4.3.1 Cenário 01	29
4.3.2 Cenário 02	30
4.3.3 Cenário 03	31
5 CONCLUSÕES.....	32
6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Solos moles são caracterizados por possuir uma baixa capacidade de suporte, baixa resistência, baixa permeabilidade e elevada compressibilidade, propriedades que comprometem qualquer carga imposta sobre os mesmos. A construção acima deste esse tipo de solo pode ser realizada a partir de diversos métodos construtivos como, aterro reforçado, bermas laterais, construção em etapas, estacas, colunas de brita etc. Além disso, caso a camada tenha uma pequena espessura e os transportes não sejam longos, pode ser realizada a remoção total da camada de solo mole e substituição por um solo com característica resistente. Porém, quando a remoção da camada instável não é possível, devido aos elevados custos de movimentação de terra, a utilização do reforço com o material geossintético torna-se uma solução econômica e eficiente para a execução da obra (ALMEIDA E MARQUES, 2014).

Devido às dimensões continentais do Brasil, associado ao alto investimento na malha rodoviária, o país detém uma grande extensão de estradas e rodovias, que são alguns dos principais modais utilizados tanto para transporte de cargas quanto de pessoas. Segundo Paludo e Boff (2018), durante a execução dessas obras de infraestrutura rodoviária, pode-se deparar com problemas decorrentes da presença de solos moles. Soluções podem ser adotadas para promover resistência a esses solos, no entanto, ainda deve-se atentar para recalques inesperados, deformações excessivas, movimentações não previstas e a necessidade de se construir o aterro em etapas.

A utilização de geossintético como reforço em aterros sobre solos moles é objeto de vários estudos numéricos e experimentais (Rowe e Soderman 1985; Jewell 1998; 1990; Li e Rowe, 2001; 2004; Palmeira e Ortigão, 2000; Neto e Futai, 2015; Smith e Tatari, 2016). Os estudos objetivam analisar e estimar a estabilidade de aterros reforçados, principalmente por métodos da literatura e também dão início à implementação de análises por meio de teoria computacional. O principal geossintético utilizado para reforço destes solos são geotêxteis, sabe-se que esses materiais geossintéticos possuem características de drenagem, separação e barreira, além da baixa resistência ao cisalhamento ao serem comparadas às geogrelhas.

A geogrelha é uma estrutura plana em forma de grelha, que tem a principal função aumentar a resistência à tração. Devido a essa característica, é um dos geossintéticos mais utilizados para a finalidade de reforço em aterros sobre solos moles.

Já está estabelecido que a utilização de reforço geossintético dentro de um aterro construído sobre um solo mole pode aumentar substancialmente a estabilidade e permitir a execução de aterros mais altos e íngremes, ao que seria praticável sem reforço, além de

aumentar o fator de segurança global deste tipo de obra. A utilização deste reforço em aterros também promove uma melhor distribuição de tensões no solo mole, pois o reforço é responsável por absorver as tensões cisalhantes que seriam distribuídas no solo (PALMEIRA, 2018). A utilização destes materiais também possibilita a redução de custos e de prazos, melhorias das metodologias de projeto, facilidade de aplicação, e transporte e redução de impactos ambientais frente aos modelos construtivos que não utilizam o reforço.

A utilização de teoria computacional torna-se uma importante ferramenta pois, segundo Rowe e Soderman (1981) possibilita, a realização de simulações numéricas de construção de aterros para uma gama de situações construtivas diferentes, como variação no campo tensão-deformação e características dos materiais, podendo ainda fornecer uma base de dados que pode ser utilizada para validar métodos aproximados de análises e indicar condições em que essas análises são aplicáveis.

Portanto, este trabalho objetiva analisar o campo de tensão-deformação de um aterro reforçado com geossintético, comparando com um aterro convencional não reforçado, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) em uma análise de deformação plana (bidimensional).

1.1. Objetivo Geral

Analisar o desempenho de um reforço geossintético em aterros sobre solos moles utilizando o método dos elementos finitos.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- 1) Calibrar um modelo numérico para análise de tensão-deformação de aterros reforçados sobre solos moles;
- 2) Obter o campo de deslocamentos de um aterro com reforços de diferentes rigidezes;
- 3) Analisar o Fator de Segurança para diferentes situações de reforço.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Solos Moles

Solos moles são caracterizados geralmente como solos argilosos saturados, com baixíssima resistência ao cisalhamento, baixa permeabilidade e alta compressibilidade. Devido a isso, quando submetidos a cargas, apresentam tempo de adensamento muito elevado, que pode compreender em anos ou, até mesmo, décadas. Como consequência, esse efeito pode comprometer o prazo requerido para o término do projeto e/ou gerar problemas futuros associados a recalques. A partir disso, fez-se necessário, dentro da engenharia de se estudar diferentes técnicas construtivas que possam vir a minimizar ou até a evitar esse fenômeno, como a utilização de bermas de equilíbrio, construção de aterros estaqueados e a utilização de reforço com material geossintético (MARTINS E ABREU, 2002).

2.2 Aterros reforçados

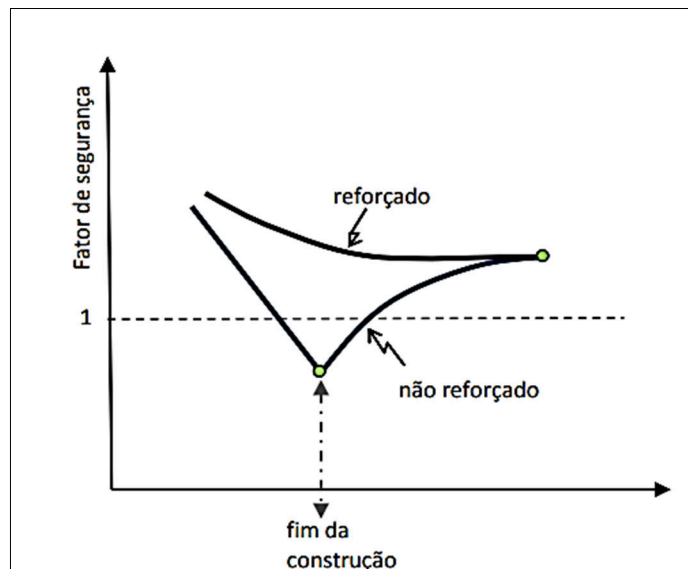
O emprego de geossintéticos no Brasil se iniciou em meados da década de 1970 sendo mais acelerado a partir da década de 1990 com a utilização de geotêxteis aplicados em obras com a finalidade de drenagem e filtração, os geossintéticos também podem ser utilizados em obras com o propósito de reforço, drenagem, barreira, separação, proteção e aderência. Esses produtos podem ser utilizados para aumentar a capacidade de suporte do solo, funcionando como reforço ou como meio drenante para aceleração de recalques por adensamento em aterros sobre solos moles saturados (PALMEIRA, 2018).

Segundo Jewell (1988) existem duas maneiras distintas para utilização de reforço em aterros. Quando posicionado na base do aterro, o reforço pode melhorar as condições de rolamento na fundação para permitir a construção de taludes mais altos e íngremes. E no caso em que o reforço é incorporado ao talude de muros de arrimo, o reforço pode proporcionar a construção de um talude mais estável e íngreme do que o ângulo natural de repouso do preenchimento. A grande diferença entre o papel do reforço nestes dois casos se dá pelo fato de que, em aterros sobre solos moles, o reforço é necessário apenas para manter a estabilidade durante a construção e até a ocorrência da consolidação e aumento da resistência ao cisalhamento do solo de fundação suficiente para manter a estabilidade. Já no caso de taludes, o reforço é necessário para resistir às forças solicitantes e manter a estabilidade durante toda a vida útil da obra.

O autor destaca que o problema de reforço de aterros sobre solos moles é similar ao de capacidade de carga em fundações lisas, porém no caso do aterro, devido à presença de

carregamentos e forças horizontais, geradas pela massa de solo dos taludes. A figura 01 representa o comportamento de segurança de aterros reforçados, é possível verificar que a utilização de reforço mantém o fator de segurança acima de 1 durante todo o processo de construção, ao contrário do que pode ser observado no caso não reforçado, quando o fator de segurança sofre uma redução até o final da construção e a partir disso é elevado.

Figura 1 - Comportamento e segurança de obras de reforço de solo.



Fonte: Jewell 1988, Aversani e Futai 2016)

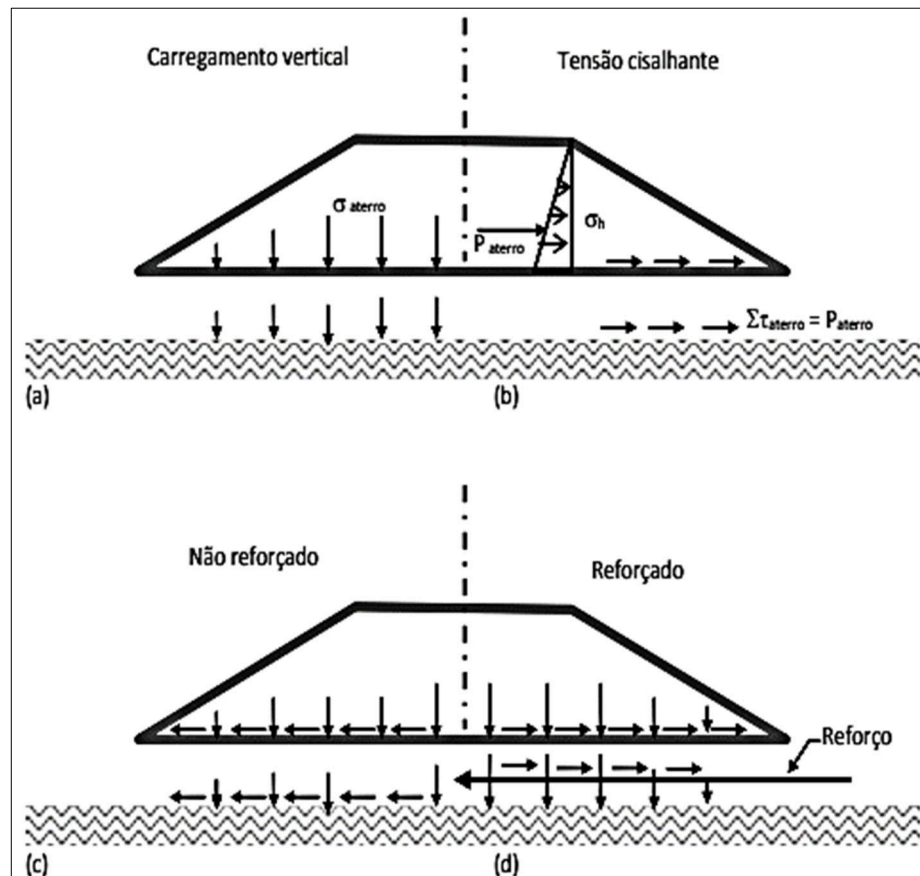
Como dito em Jewell (1988), a utilização de reforço na base de aterros sobre solos moles melhora a resistência ao cisalhamento, proporcionando redução de esforços solicitantes na fundação e aumento das forças resistentes. Dessa forma é possível a execução de aterros mais altos e seguros.

2.2.1. Cargas Solicitantes

Como mostrado na figura 2, o principal carregamento gerado pelo aterro são as tensões verticais. Mas também existem tensões horizontais devido a presença de taludes, o que gera na estrutura uma tensão de cisalhamento.

A figura 2 (a) e (b) representam as forças que atuam no solo mole, verticais devido ao peso do aterro e tensões cisalhantes decorrentes do talude.

Figura 2 - Ilustração dos carregamentos induzidos pelo aterro na fundação de solo mole com e sem reforço



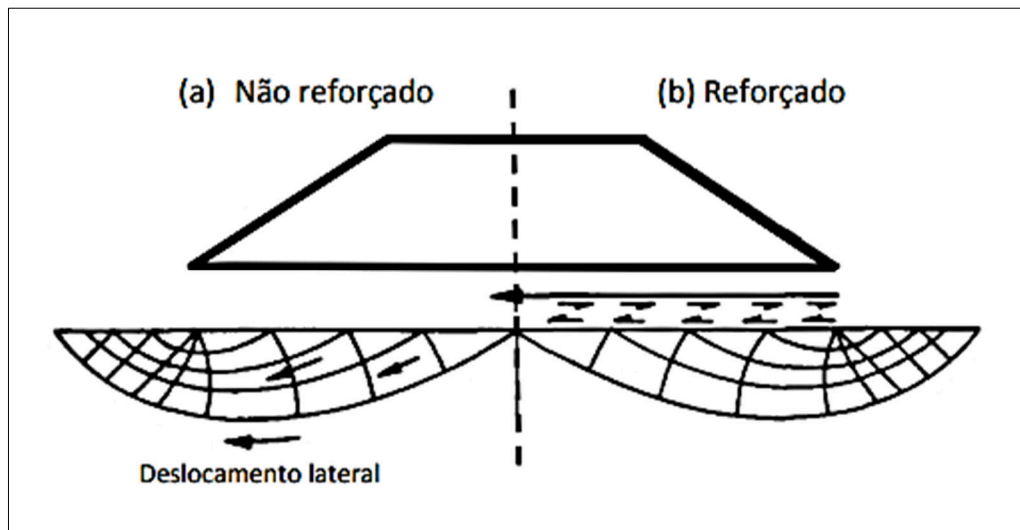
Fonte: Jewell 1988, Aversani e Futai 2016)

Quando da ausência de reforço, as tensões de cisalhamento reduzem significativamente a sua capacidade de carga (Figura 2c). Já em aterros que contam com reforço em sua base (Figura 2d), este aterro é capaz de suportar as tensões horizontais geradas pelo talude, impedindo ou reduzindo que estas tensões gerem tensões cisalhantes na fundação e evitando a redução da capacidade de carga (Jewell 1988, Aversani e Futai 2016).

2.2.2. Cargas Resistentes

Jewell (1988) cita que um aterro reforçado não é capaz de suportar forças de tração laterais, dessa forma não pode impedir que o solo de fundação se desloque lateralmente sob o carregamento de peso próprio do aterro (Figura 3a). Impedir que o movimento lateral na superfície de uma fundação pode melhorar a capacidade de carga do aterro como mostrado na Figura 3b.

Figura 3 - Ilustração esquemática da restrição das deformações na fundação de solo mole com e sem reforço



Fonte: (Jewell 1988, Aversani e futai 2016)

2.3 Geossintéticos

2.3.1- Funções

Geossintéticos podem ser classificados como produtos poliméricos oriundos de polímeros manufaturados ou naturais, que podem ser utilizados em diversas áreas da geotecnia devido as suas diversas possibilidades de aplicações e funções, sendo as principais reforço e drenagem.

Atualmente, existe uma grande variedade de geossintéticos no mercado, a NBR 12553/2003 define os termos relativos a estes materiais.

Segundo Palmeira (2018) os principais tipos e funções que podem ser desenvolvidas pelos geossintéticos são:

- a) **Reforço:** A presença da camada de geossintético tem a finalidade de reforçar um maciço de solo, proporcionando maior resistência mecânica e menor deformabilidade.
- b) **Drenagem:** Alguns tipos de geossintéticos funcionam como meio drenante, escoando fluidos e gases para regiões apropriadas
- c) **Filtração:** O geossintético funciona como filtro de um sistema drenante em obras geotécnicas. Sendo um elemento permeável capaz de reter partículas.
- d) **Barreira:** A camada de geossintético tem a função de barrar ou minimizar a passagem de fluidos, gases e sólidos. Impedindo assim a homogeneização de camadas.

O autor destaca ainda que a aplicação de geossintéticos em aterros sobre solos moles pode proporcionar diversos benefícios como:

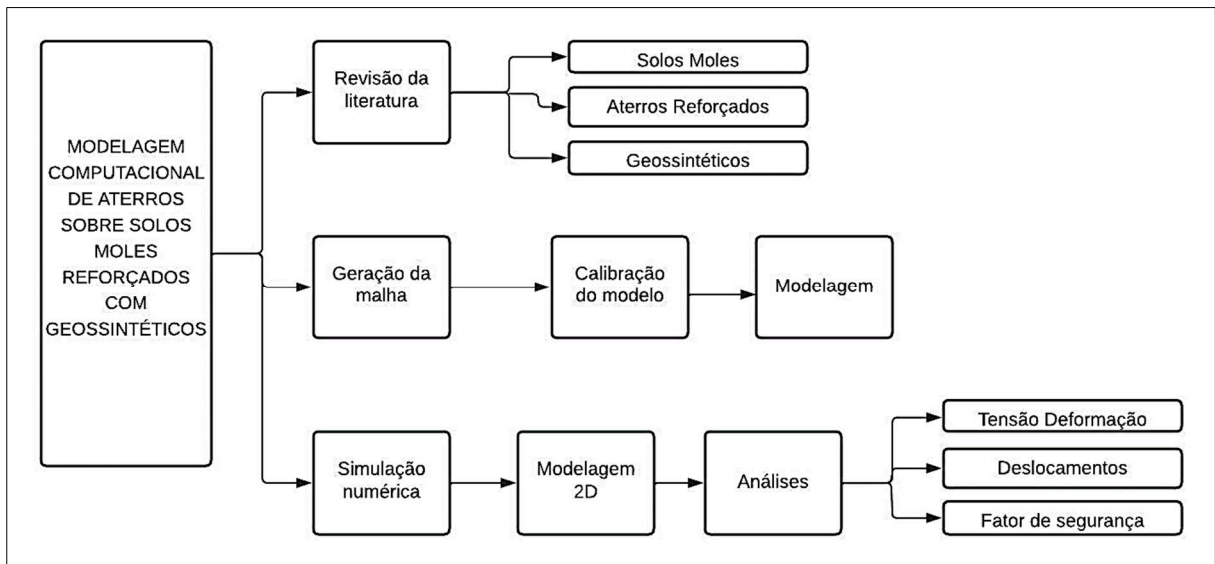
- i) Melhoria na estabilidade global
- ii. Aumento do fator de segurança
- iii. Execução de aterros mais altos e íngremes
- iv. Distribuição de tensões cisalhantes
- v. Aceleração do processo de adensamento

3. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido a partir de uma revisão de literatura, foram extraídas condições de contorno de solos e em seguida com o auxílio do software de elementos finitos plaxis 2D deu-se início à modelagem computacional, simulações numéricas e análises.

Na Figura 4 é apresentado o fluxograma da metodologia deste trabalho, que foi dividida em três tópicos principais: a revisão da literatura, calibração do modelo e a simulação numérica.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: O autor

3.1. Descrição do Problema

O presente estudo analisa a deformação plana de um aterro rodoviário reforçado com geogrelha executado sobre uma camada de argila mole compressível. Foi modelado um aterro com altura de 10 metros e reforço com rigidez variadas para que possa obter a melhor configuração possível da execução do modelo estudado além disso, foram feitas verificações dos fatores de segurança e de estabilidade.

3.2. Parâmetros dos materiais

Para validar a metodologia adotada nesta pesquisa, foram tomados como base os dados apresentados por Li e Rowe (2001) que estudaram o comportamento de aterros reforçados com geossintéticos construídos sobre solos moles. As características do solo de fundação utilizado no estudo foram obtidas pelos autores conforme mostra a tabela 01.

Tabela 1 - Características do material do aterro

Modelo de ruptura por cisalhamento	-	Mohr Coulomb
Tipo de Comportamento	-	Drenado
Peso específico unitário	γ	20 Kn/m ²
Permeabilidade horizontal	k_x	1 m/dia
Permeabilidade vertical	k_y	1 m/dia
Módulo de young		20.000 kn/m ²
Coefficiente de Poisson	ν	0,35
Coesão	C_{ref}	1,10e-6 kn/m ²
Ângulo de atrito	φ	37°
Ângulo de dilatação	ψ	6°

Fonte: O autor

3.2.1. Aterro

O corpo do aterro é constituído por um solo granular com ângulo de atrito de 37°, peso específico 20 kN/m³. O ângulo de dilatação utilizado foi 6°, adotado com base na equação 1 proposta por Bolton (1986). Os autores modelaram o comportamento elástico não linear do material do aterro usando a Equação 1:

(1)

$$\Psi = n \cdot D_{rc}$$

onde:

Ψ = dilatação do solo (graus)

n = coeficiente que depende do tipo de ensaio de resistência ao cisalhamento

D_{rc} = densidade relativa corrigida (graus).

(2)

$$\frac{E}{Pa} = K \left(\frac{\sigma}{Pa} \right)^m$$

onde:

E: Módulo de young do solo

Pa: Pressão atmosférica

σ : Menor tensão principal

K e m: Constantes selecionadas para preenchimento de materiais típicos e são respectivamente 300 e 0,5.

3.2.2. Solo mole

As características da camada de solo argiloso sob o aterro estão contidas na Tabela 2, e foram obtidas a partir do estudo de Li e Rowe (2011).

Tabela 2 - Características do material do solo mole

Modelo de ruptura do material	-	Mohr Coulomb
Tipo de Comportamento	-	Não Drenado
Peso unitário acima do lençol freático	γ	14 Kn/m ²
Peso unitário abaixo do lençol freático	γ_{sat}	15,2 Kn/m ²
Permeabilidade horizontal	k_x	8,6e-5 m/dia
Permeabilidade vertical	k_y	8,6e-5 m/dia
Módulo de young	E_{ref}	2000 kn/m ²
Coefficiente de Poisson	ν	0,35
Coesão	C_{ref}	3,70 kn/m ²
Ângulo de atrito	ϕ	27°
Ângulo de dilatação	ψ	0°

Fonte: Li e Rowe (2011)

3.2.3. Reforço

O material utilizado como reforço é uma geogrelha e está inserida ao longo da base do aterro, na interface aterro-solo mole. O reforço foi modelado com característica elástica. Foram modelados aterros na situação não reforçada e com rigidezes variadas, a tabela 3 exemplifica as características do reforço utilizado.

Tabela 3 - Identificação do Reforço

SR	Sem Reforço
G1	250 Kpa
G2	500 Kpa
G3	1000 Kpa
G4	2000 Kpa

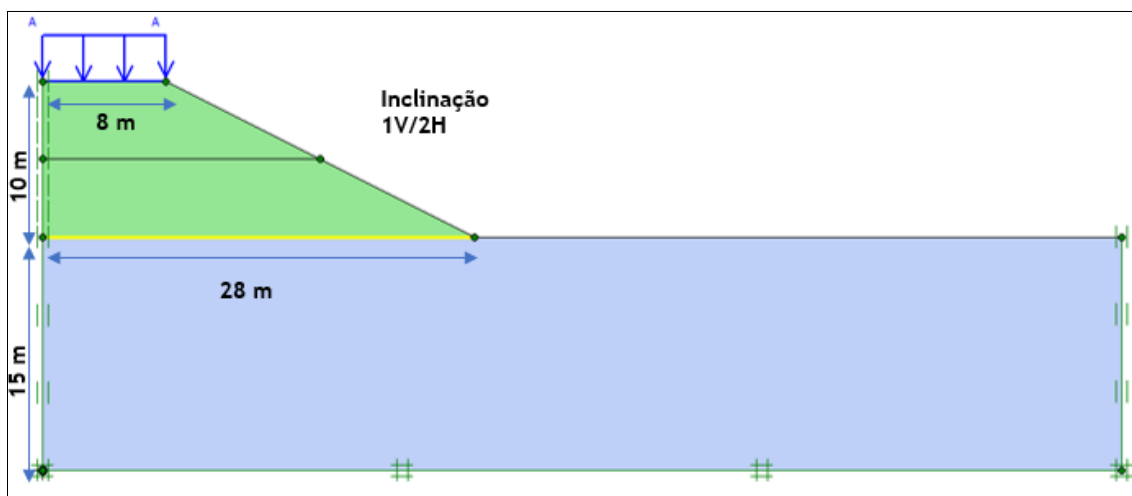
Fonte: O autor

3.3. Condições Iniciais.

3.3.1. Carregamento e condições de contorno

A figura 5 ilustra o modelo estudado, trata-se de um aterro com 10 m de altura, uma crista com 8 m de largura e inclinação 1V:2H, que dispõe de um reforço com material geossintético em sua base. Por se tratar de um problema simétrico foi modelado uma metade do aterro para reduzir o tempo computacional da pesquisa. A sobrecarga adicionada no seu topo tem um valor de 10 kPa conforme indicado pela norma DNIT 381/2022-PRO.

Figura 5 - Modelagem do aterro



Fonte: O autor.

3.3.2. Etapas de carregamento

O Software Plaxis auxilia na modelagem da construção do aterro em etapas. O aterro foi dividido em duas camadas de 5 metros de altura, o período de construção das camadas é de 5 dias e após a construção de cada uma foi inserido um período de consolidação para que haja a dissipação dos excessos de poro-pressão. Foram analisadas 3 cenários:

3.2.2.1. Cenário 01:

O aterro foi construído em camadas com tempo de construção de 5 dias, o tempo de consolidação adotado foi de 500 dias. Esse valor foi obtido a partir da análise de poropressão com o tempo no próprio software, que indicava que aos 500 dias cerca de 95% da poro-pressão já havia sido dissipada.

3.2.2.2 Cenário 02:

O aterro foi construído em camadas com tempo de construção de 5 dias, o tempo de consolidação adotado foi de 1 dia.

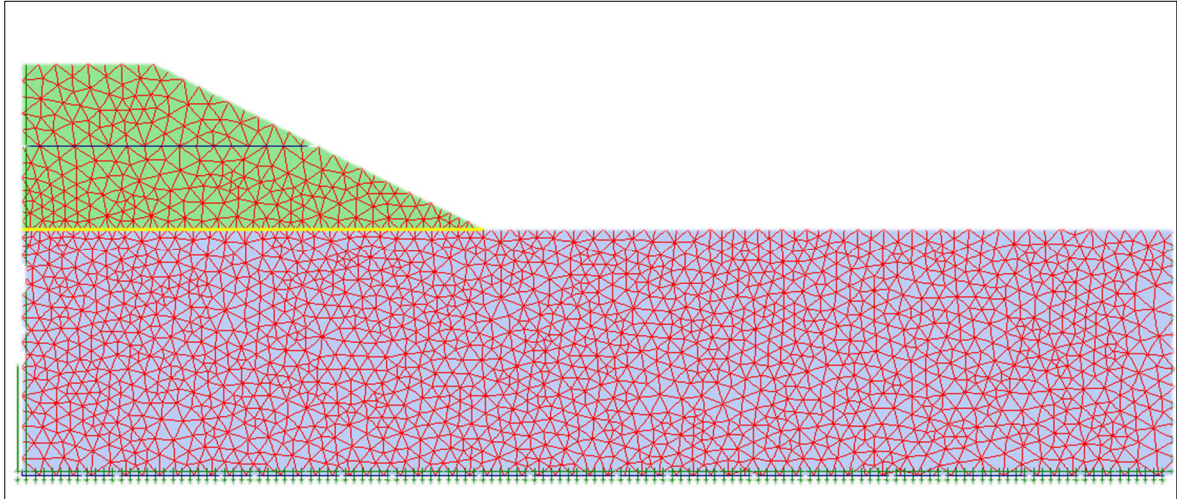
3.2.2.3 Cenário 03:

O aterro foi modelado como uma camada única, o tempo de construção adotado foi de 5 dias e o tempo de consolidação foi de 1000 Dias.

3.4. Geração da malha

Foi considerado estado plano de deformação, utilizada uma malha de elementos triangulares de 15 nós (T15) de deformação linear plástica e contendo 3780 elementos. As unidades padrão para comprimento, força e tempo são utilizadas (m, kN e dia). A malha foi definida com impedimento aos deslocamentos na direção horizontal nas fronteiras laterais, deslocamentos horizontais e verticais impedidos na fronteira inferior. Além disso, os materiais do aterro seguem o critério de modelo Mohr-coulomb e tipo não drenado.

Figura 6 - Representação da malha utilizada para simulação do aterro reforçado com geogrelha sobre solo mole

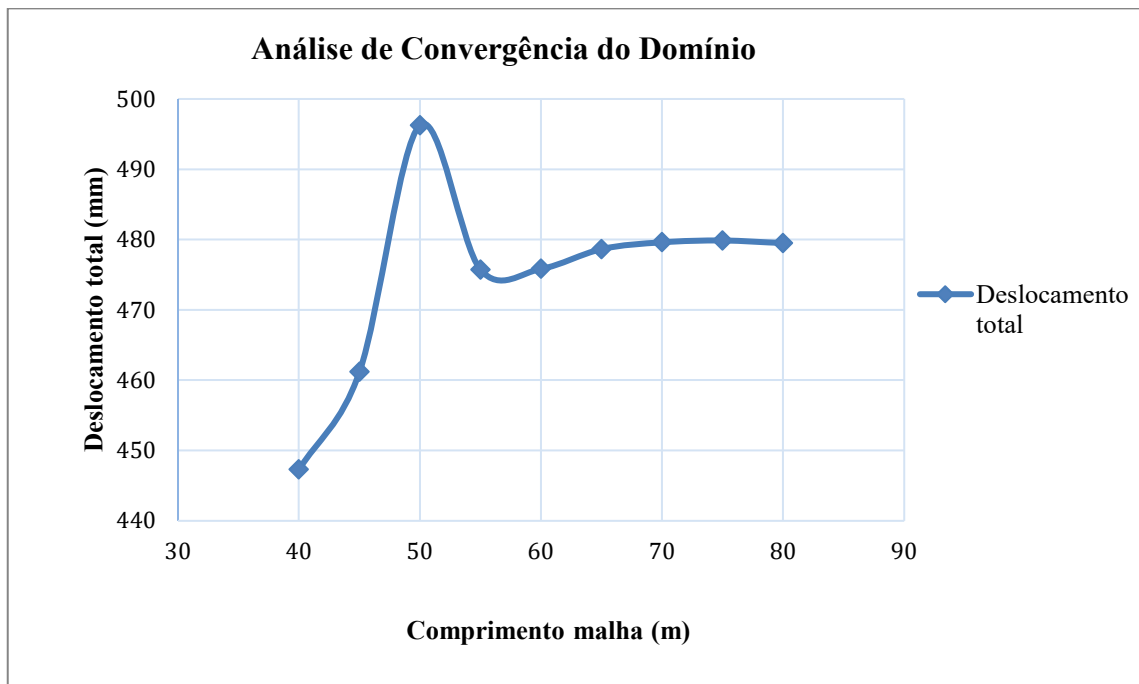


Fonte: O autor.

3.5. Calibração do modelo numérico

Para validar a pesquisa fez-se uma análise de convergência do domínio e da malha. Efetuou-se uma análise do deslocamento total do aterro, elevando a área de solo mole horizontalmente. Dessa forma foi possível avaliar para qual dimensão do sistema a malha convergiu, e definir um domínio que se aproxime da realidade. A figura 7 compara o deslocamento total obtido em função da largura da área de solo mole. Podemos verificar que a convergência da malha se deu para 70 m onde o deslocamento total aproxima-se de 480 mm se mantém constante.

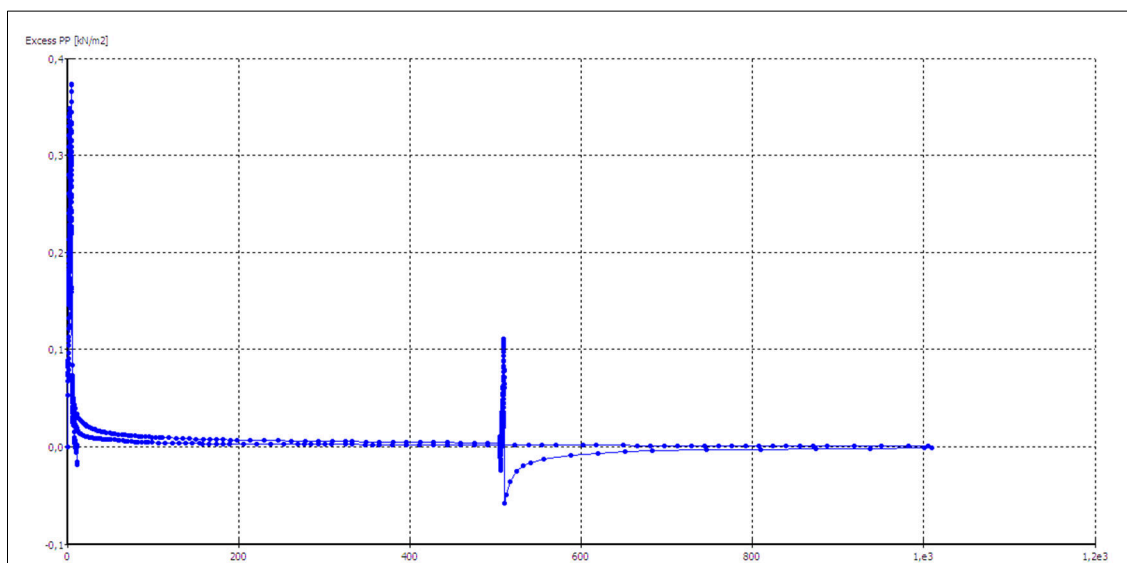
Figura 7 - Gráfico de análise de convergência do domínio



Fonte: O autor.

O tempo de consolidação foi determinado como sendo o período necessário para dissipação de cerca 95% do excesso de poro-pressão, esse dado foi através de uma análise de excesso de poropressão pelo tempo como está mostrado na figura 8:

Figura 8 - Gráfico excesso de poro-pressão (kN/m²) x tempo (dias)



Fonte: O autor.

3.7 Análise do Fator de Segurança

O fator de segurança pode ser definido como a razão entre a carga de colapso e a carga de trabalho. Porém para aterros nem sempre essa definição é útil, pois devido a maior parte do carregamento ser causada pelo peso do solo, um aumento no peso do solo não necessariamente levaria o aterro ao colapso. Dessa forma uma definição mais apropriada do fator de segurança é:

$$F_s = \frac{S \text{ máximo disponível}}{S \text{ para o equilíbrio necessário}} \quad (3)$$

Onde:

S é a resistência ao cisalhamento.

A razão entre a resistência real e a resistência mínima necessária para o equilíbrio é o fator de segurança. Ao introduzir a condição de Coulomb padrão, o fator de segurança obtido é função de:

$$F_s = \frac{c - \sigma_n \tan \varphi}{c_r - \sigma_n \tan \varphi_r} \quad (4)$$

Onde:

c e φ são parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito de intensidade de entrada);
 σ_n é a componente de tensão normal real.

Os parâmetros c_r e σ_r são parâmetros de resistência reduzida suficientemente necessários para manter o equilíbrio. O princípio descrito acima é utilizado como base do método de redução Phi/c, para calcular o fator de segurança global utilizado no software plaxis. Neste caso a coesão e a tangente do ângulo de atrito são reduzidas na mesma proporção:

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \Sigma M_{sf} \quad (5)$$

A redução dos parâmetros de resistência é controlada pelo multiplicador total ΣM_{sf} , que é aumentado em um procedimento passo a passo até ocorrer uma falha. O fator de segurança será definido como o valor de ΣM_{sf} na falha, desde que na falha um valor constante seja obtido para um número de etapas de carga sucessivas.

A norma DNIT 381/2021 PRO, que trata sobre projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias, estabelece os fatores de segurança mínimos para cada etapa de construção,

independentemente de sua classe. Os valores estão contidos na Tabela 02, a norma ressalta também as análises de período construtivo e final de construção deverão ser realizadas considerando parâmetros de resistência não drenados para os solos argilosos moles, e a longo prazo deverão considerar parâmetros de resistência drenados.

Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos- DNIT 381/2021 PRO

Tipo de verificação	FS mínimo
Período construtivo	1,2
Final de construção	1,3
Longo Prazo	1,5
Rebaixamento Rápido	1,3

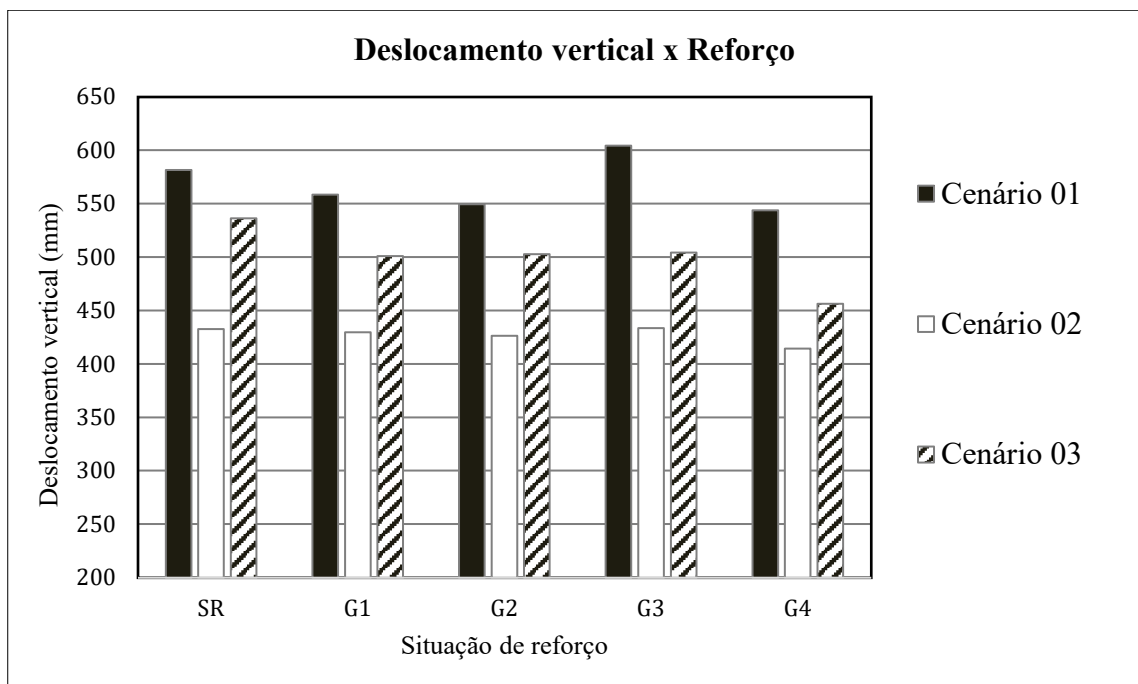
Fonte: DNIT 381/2021 PRO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Deslocamentos

A figura 9 apresenta os valores obtidos para os deslocamentos verticais em função do tipo de reforço utilizados relacionando os 3 cenários analisados.

Figura 9 - Gráfico deslocamento vertical x reforço

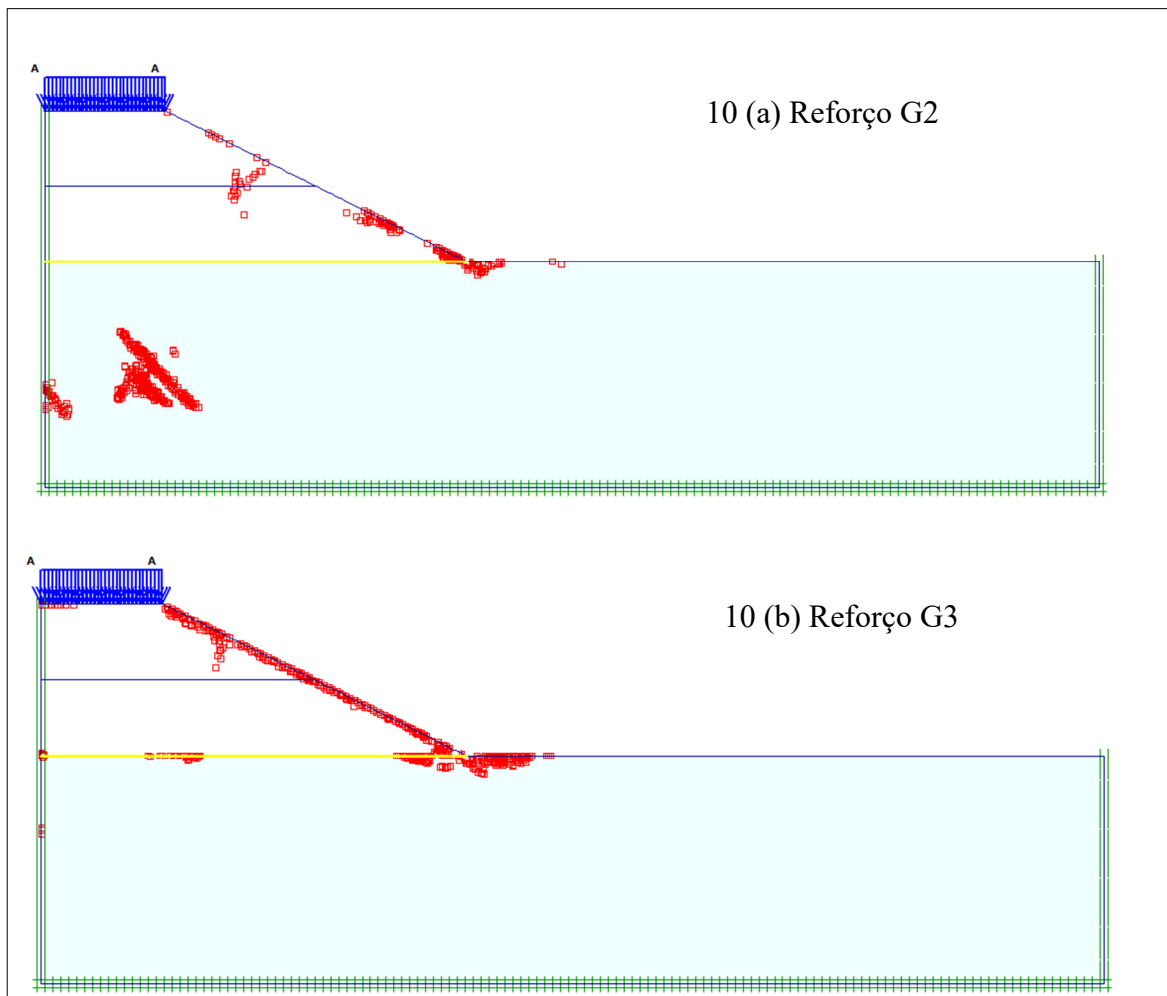


Fonte: O autor

4.1.1. Cenário 01

Neste caso pode-se verificar que o deslocamento vertical sofre um declínio à medida que ocorre um aumento na rigidez do reforço. Todavia pode ser visto a ocorrência de um aumento no valor do deslocamento no caso em que se utiliza o reforço G3, esse aumento pode ser explicado devido a uma elevação nos pontos de plastificação ocorrida na utilização deste reforço em comparação com o G2 como pode ser visto na Figura 10:

Figura 10 - Pontos de plastificação nos casos G2 e G3

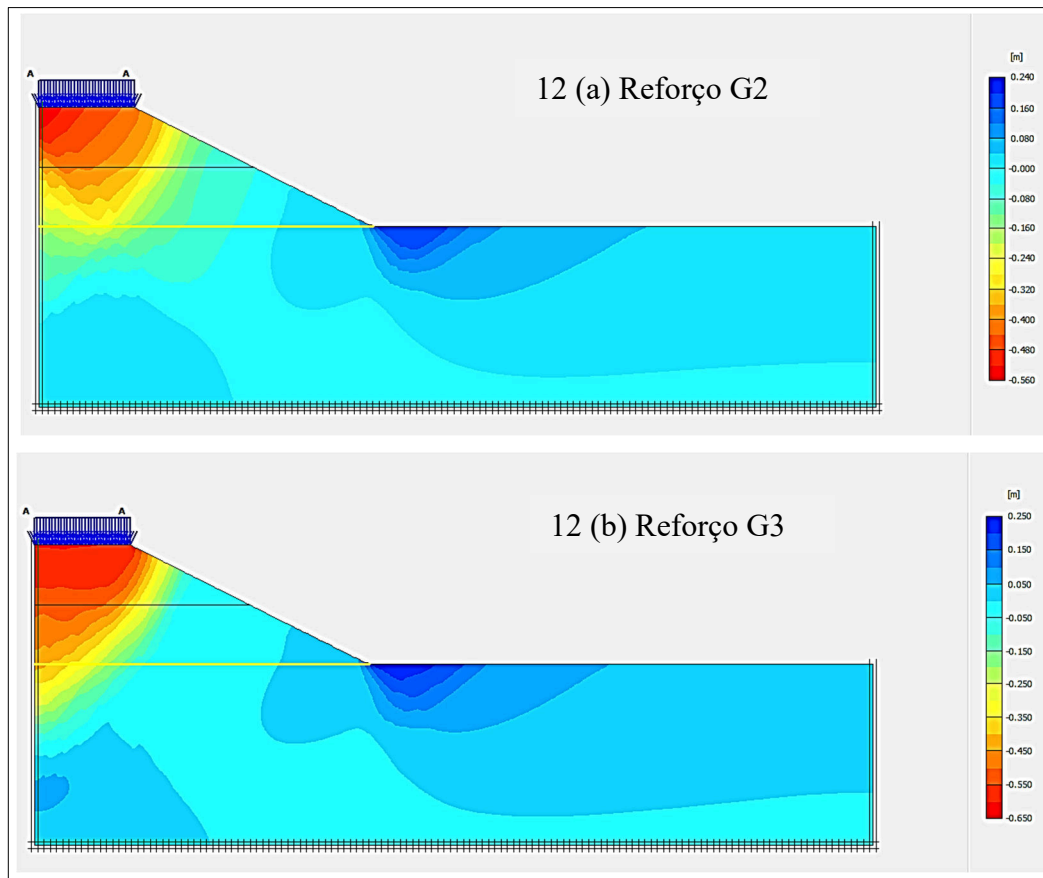


Fonte: O autor.

A ocorrência desses pontos de plastificação são devidas as grandes deformações sofridas no solo resultado das tensões atuantes, essas deformações são irreversíveis, contudo, não levam a ruptura do solo.

Também foi verificada a ocorrência de um acúmulo de tensões no topo do aterro com reforço G3 em relação ao G2, pode-se notar que a distribuição de tensões deu-se de forma mais gradual em G2 do que em G3, o que pode ter provocado um aumento nos pontos de plastificação quando utilizado o reforço G3, a figura 11 representa os deslocamentos verticais obtidos.

Figura 11 - Gráfico deslocamento vertical G2 e G3



Fonte: O autor.

4.1.2. Cenário 02

Quando adotado um tempo de consolidação de 1 dia, verificou-se uma redução acentuada nos deslocamentos verticais em todas as situações do reforço. Estes valores são menores que os obtidos para os outros cenários analisados, tal redução pode ser explicada pelo curto tempo de consolidação adotado.

4.1.3. Cenário 03

Neste caso foi verificado uma tendência linear nos valores obtidos para todas as situações avaliadas. Mas pode ser constatado para esta situação em que o aterro foi modelado como uma camada única de 10 metros e após o período de consolidação adotado de 1000 dias os valores obtidos de deslocamento vertical foram menores do que nas situações 01 e 02 apresentadas anteriormente.

4.2. Influência da rigidez

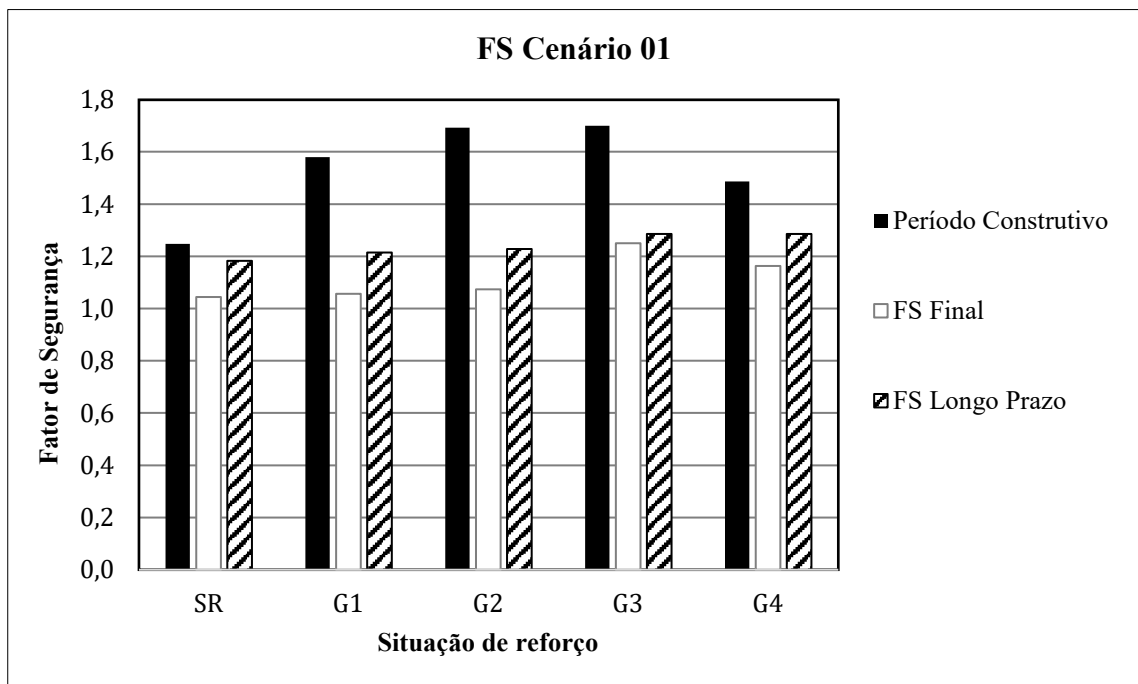
As análises dos deslocamentos indicaram que um incremento na rigidez do reforço proporciona uma redução dos deslocamentos verticais, salvo no caso em que o tempo de consolidação adotado foi de 500 dias e o reforço G3 aplicado, onde foi constatado um aumento no deslocamento em relação aos demais casos.

4.3. Fatores de Segurança

4.3.1 Cenário 01

Neste caso, os resultados mostram para a primeira etapa o FS aumentou até o reforço G3 e a partir disso, houve um declínio. Já a análise do FS final e a longo prazo apresentaram um aumento no reforço G3 e G4 em relação aos demais casos. A figura 12 demonstra os valores obtidos.

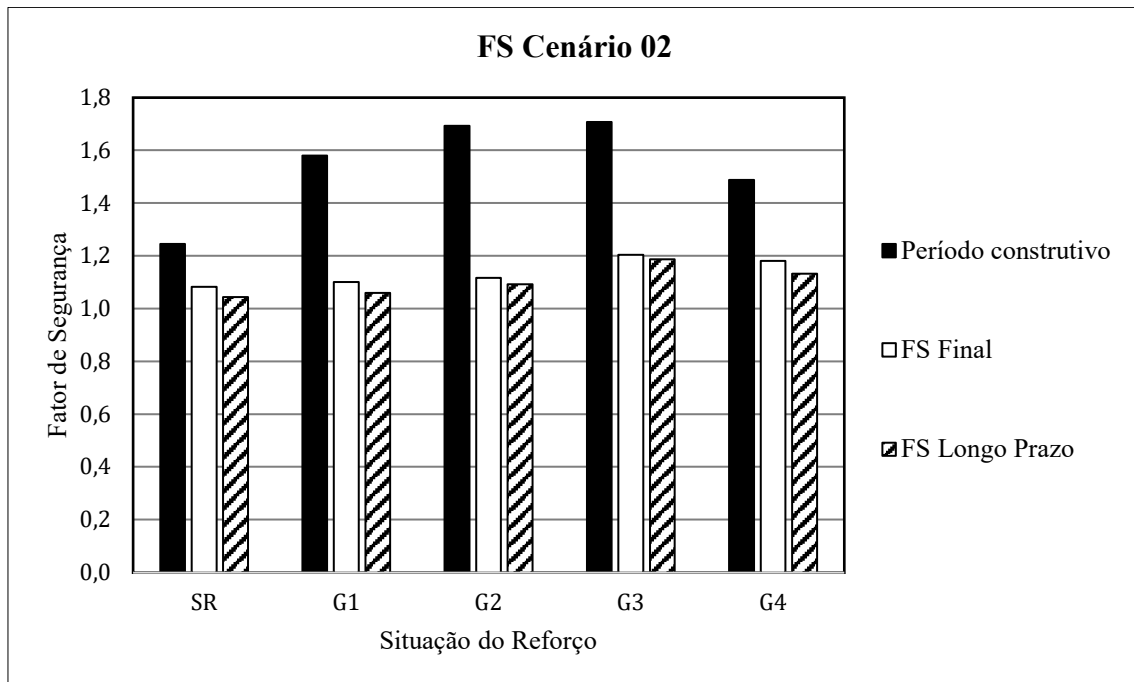
Figura 12 - Gráfico fator de segurança situação 01.



Fonte: O autor.

4.3.2 Cenário 02

Figura 13 - Gráfico fator de segurança Situação 02

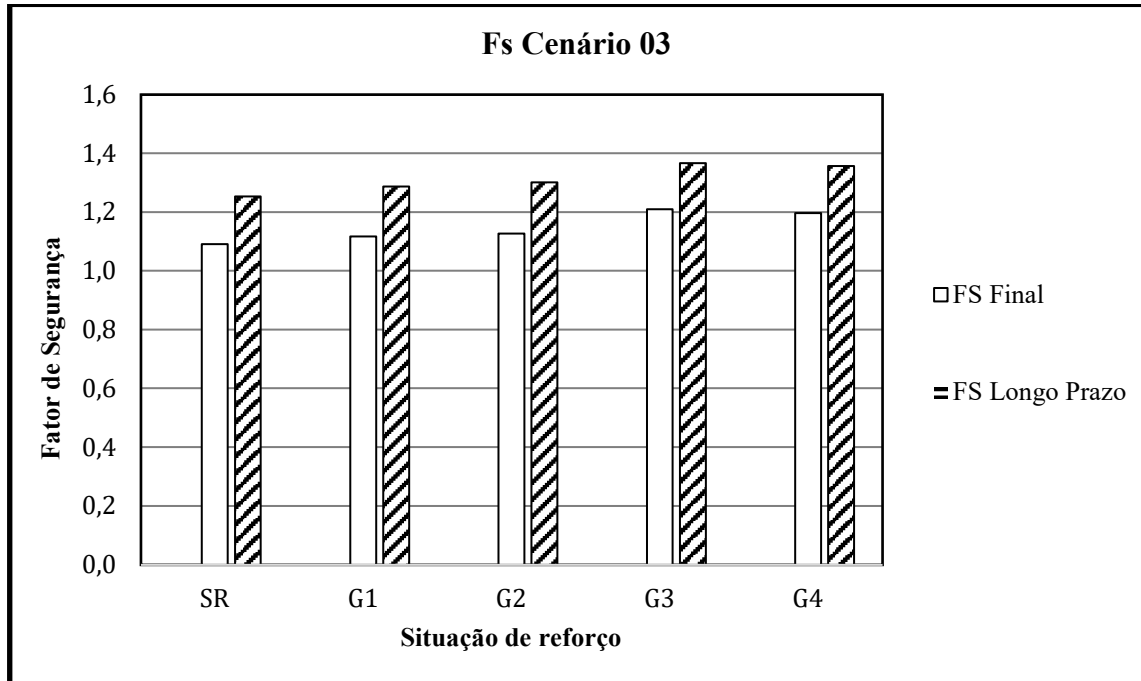


Fonte: O autor.

Pode-se verificar que a utilização de reforço com geossintético teve uma boa influência no FS do em relação ao período construtivo. É possível também verificar um incremento na situação G3 e G4 em relação as demais. A pequena variação foi FS a longo prazo em relação ao FS final representada no gráfico pode ser justificada pelo curto prazo de dissipação de excesso de poro-pressão estabelecido, 1 dia.

4.3.3 Cenário 03

Figura 14 - Fator de segurança situação 03



Fonte: O autor.

Na situação 03 foi adotado um período de consolidação de 1000 dias, que foi determinado como sendo o tempo necessário para dissipação de cerca 99% do excesso de poropressão neste caso em que o aterro foi construído como uma camada única. Os resultados do fator de segurança indicaram que houve um acréscimo à medida que a rigidez do reforço foi aumentada, principalmente a partir do reforço G3. Além disso ocorreu um aumento significativo nos valores obtidos a longo prazo em relação ao final para todas as situações de reforço utilizadas. Neste caso não foi possível a análise do FS no período construtivo pois o aterro foi modelado como uma camada única.

5.CONCLUSÕES

A execução de aterros sobre solos moles é considerada uma obra complexa, pois a ocorrência de recalques diferenciais e rupturas é iminente desde o período construtivo. Porém as diversas soluções geotécnicas existentes aliadas a estudos numéricos viabilizam a execução dessas obras. Como mostrado no decorrer do estudo, a utilização da geogrelha como material de reforço na base de aterros sobre solos moles proporcionou redução nos deslocamentos verticais e aumento no fator de segurança do sistema.

A utilização de reforço com material geossintético gerou um aumento nos fatores de segurança, principalmente durante o período construtivo, também houve um incremento pequeno no FS final e a longo prazo. Entretanto, os valores de fator de segurança quando comparados com os valores mínimos estabelecidos pela Norma do DNIT 380, mostram que os resultados aceitáveis ocorreram apenas para o fator de segurança final do cenário 01, quando utilizado o reforço G3.

Em relação aos deslocamentos verticais, foi verificado que o reforço não resultou em uma redução significativa para os casos em que o período de consolidação adotado foi de 500 dias e também para o caso em que foi modelado como camada única, havendo, porém, uma maior porcentagem de redução destes deslocamentos quando da utilização do tempo de consolidação de 1 dia quando comparado a situação não reforçada com a utilização do reforço G4.

Por fim, cabe destacar a importância de se realizar análises e estudos detalhados em obras geotécnicas de aterros compactados executados sobre solo mole. Além disso é importante que sejam analisadas novas geometrias do aterro e posições do reforço, a fim de obter a melhor configuração possível para cada caso.

6. Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestão para trabalhos futuros a realização de novas análises incluindo outros parâmetros como os descritos abaixo seria de grande importância para se ter resultados mais completos acerca da utilização de material geossintético como reforço em aterros.

- a) Comparar a inclinação e a geometria de um aterro com e sem reforço
- b) Definir a posição ótima do reforço
- c) Comparar com métodos analíticos e valores da literatura
- d) Aliar a utilização de geossintéticos a outras metodologias (aterros estaqueados por exemplo)

REFERÊNCIAS

AVERSANI, José O.; BUENO, Benedito S.; FUTAI, Marcos M. **Desenvolvimento de um método de cálculo de reforço de aterros sobre solos moles usando geocélulas**. XVIII Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Belo Horizonte, out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR12553/2003: **Geossintéticos- Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ALMEIDA, Márcio de Sousa S.; Marques, Mária Esther Soares. **Aterros sobre solos moles: Projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 380/2022- **PRO Utilização de geossintéticos em aterros sobre solos moles para obras viárias- Procedimento**. Brasília, jun.2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 380/2021- **PRO Utilização de geossintéticos em aterros sobre solos moles para obras viárias**. Brasília, ago.2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 381/2022- **PRO: Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias- Procedimento**. Brasília, jun.2022.

DELGADO, Bruno G.; Caliari, Lucas. **Análise tensão-deformação para definição da entreevia na duplicação de um aterro ferroviário sobre solo mole**. São Paulo, 2011.

JEWELL, R.A. The Mechanics of Reinforced Embankments on Soft Soils. **Geotextiles and Geomembranes**, Reino Unido, v. 7, n. 4, p. 237-273, jul. 1988.

JEWELL, R.A. Application of revised design charts for steep reinforced slopes. **Geotextiles and Geomenbranes**, Reino Unido, v.10 , n. 3, p. 203-233, Mar. 1990.

KRISHNASWAMY, N.R; RAJAGOPAL, K; Latha, Madhavi. Model studies on geocell supported embankments constructed over a soft clay foundation. **Geotechnical testing journal**, v.23, n. 1, p45-54, Mar. 2000.

LI, A.L.; ROWE, R. Kerry. Combined effects of reinforcement and prefabricated vertical drains on embankment performance. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 6, p. 1266-1282, Dez. 2001.

MARTINS, I. S. M., ABREU, F. R. S., Uma solução aproximada para o adensamento unidimensional com grandes deformações e submersão de aterros, **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 25, p. 3-14, 2002.

NETO, José Orlando Avesani; FUTAI, Marcos Massao. **Aspectos gerais do uso de geossintéticos em reforço de aterro sobre solos moles**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Minas Gerais, p 19-22, out. 2016.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMEIRA, Ennio Marques; FAHEL, André Ricardo Da Silva; ORTIGÃO, José Alberto Ramalho. **Aterros reforçados com geossintéticos sobre solos moles**. Encontro sobre propriedades de argilas brasileiras, Rio de Janeiro-Brasil, nov. 2001.

PALUDO, Emily Lupreri, BOFF, Fernando Eduardo. **Reforço de um aterro para implantação de uma rodovia sobre solos moles com utilização de geossintético**. IV Congresso de pesquisa e extensão da FSG IV Salão de extensão, Caxias do sul -RS, out. 2018

ROWE, R.K.; SODERMAN, K.L. An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 22, n.3, p. 392-398, Abr. 1985.

ROWE, R.K.; LI, A.L. Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations. **Geosynthetics International**, Edição especial sobre as conferências de Giroud, v.12, ed. 01, p. 50-85, Jan. 2005.

ROWE, R.K.; SODERMAN, K.L. Stabilization of very soft soils using high strength geosynthetics: the role of finite element analyses. **Geotextiles and geomembranes**, v. 6, n. 1-3, p.53-80, 1987.

SMITH, C.C; TATARI, Alireza. Limit analysis of reinforced embankments on soft soil. **Geotextiles and geomembranes**, Reino Unido, v. 44, n. 4, p. 504-514, ago. 2016.

ZHANG L.; ZHAO M.; SHI C.; ZHAO H. Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. **Geotextiles and Geomembranes**, v.28, n. 5, p. 475 – 482. Out. 2010.