

Dimensionamento de geossintético para reforço de aterro sobre solo mole
Geosynthetic design for reinforcement of embankment on soft soil
Dimensionamiento de geosintético para el refuerzo de vertedeiro en suelo blando

Recebido: 07/06/2020 | Revisado: 16/06/2020 | Aceito: 25/06/2020 | Publicado: 07/07/2020

Diogo Fellipe Vênus Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4655-7712>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: diogofvenus@gmail.com

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3072-7836>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: isabelamcvbello@hotmail.com

Alison de Souza Norberto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4303-4847>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: alison_norberto@hotmail.com

Resumo

Construções sobre depósitos de solos moles são motivos de preocupação devido à alta compressibilidade e baixa resistência desses solos, sendo necessário conhecer suas propriedades geomecânicas e as técnicas de melhoramento. Na alternativa de reforço do solo, pode-se empregar geossintéticos na base do aterro, permitindo aumento da sua estabilidade, construção mais rápida e utilização de taludes mais íngremes. Este artigo apresenta o dimensionamento de geossintético para reforço de um aterro de solo mole localizado em Recife, Pernambuco, Brasil. O objetivo foi realizar a análise de estabilidade do aterro sem o reforço e com o reforço de geossintético, obtendo os respectivos valores dos fatores de segurança, e portanto, verificar a eficiência desse material para reforço da área estudada. Foram considerados os mecanismos de instabilidade de expulsão de solo mole de fundação e de ruptura generalizada envolvendo aterro, reforço e solo de fundação. Utilizou-se um programa computacional para realizar as análises de estabilidade. O fator de segurança contra expulsão do solo mole e o fator de segurança mínimo foram bem próximos, em torno de 1,3. O uso de geossintético como reforço para o caso estudado mostrou-se eficiente, com

significante elevação do fator de segurança de 0,98 para 1,32. O fator de segurança para o uso combinado de geossintético de reforço e a construção de uma berma foi de 2,37, sendo o maior valor das três opções de estabilização do aterro. A solução adotada em projeto dependerá do valor do fator de segurança mínimo determinado pelo projetista. Diversos fatores como porte da obra, custo e prazo, assim como a logística da construção podem interferir na escolha da solução mais adequada. Esse artigo busca melhor entendimento do tema, e em consequência, projetar aterros mais seguros e econômicos.

Palavras-chave: Melhoramento; Fator de segurança; Compressibilidade; Estabilidade.

Abstract

Constructions on soft soil deposits are cause for concern due to the high compressibility and low resistance of these soils, and it is necessary to know their geomechanical properties and improvement techniques. In the alternative of soil reinforcement, geosynthetics can be used at the base of the landfill, allowing for increased stability, faster construction and use of steeper slopes. This article presents the geosynthetic design for reinforcement of a soft soil embankment located in Recife, Pernambuco, Brazil. The objective was to carry out the landfill stability analysis without the reinforcement and with the geosynthetic reinforcement, obtaining the respective values of the safety factors, and therefore, verify the efficiency of this material to reinforce the studied area. The instability mechanisms for expelling soft soil from the foundation and generalized rupture involving embankment, reinforcement and foundation soil were considered. A computer program was used to perform the stability analyzes. The safety factor against expulsion from the soft soil and the minimum safety factor were very close, around 1.3. The use of geosynthetics as reinforcement for the case studied proved to be efficient, with a significant increase in the safety factor from 0.98 to 1.32. The safety factor for the combined use of reinforcement geosynthetics and the construction of a shoulder was 2.37, with the highest value of the three landfill stabilization options. The solution adopted in the project will depend on the value of the minimum safety factor determined by the designer. Several factors such as the size of the work, cost and time, as well as the construction logistics can interfere in the choice of the most appropriate solution. This article seeks a better understanding of the topic, and as a result, to design safer and more economical landfills.

Keywords: Improvement; Safe factor; Compressibility; Stability.

Resumen

Las construcciones en depósitos de suelos blandos son motivo de preocupación debido a la alta compresibilidad y baja resistencia de estos suelos, y es necesario conocer sus propiedades geomecánicas y técnicas de mejora. En la alternativa del refuerzo del suelo, se pueden usar geosintéticos en la base del relleno sanitario, lo que permite una mayor estabilidad, una construcción más rápida y el uso de pendientes más pronunciadas. Este artículo presenta el diseño geosintético para el refuerzo de un terraplén de suelo blando ubicado en Recife, Pernambuco, Brasil. El objetivo fue llevar a cabo el análisis de estabilidad del relleno sin el refuerzo y con el refuerzo geosintético, obteniendo los valores respectivos de los factores de seguridad y, por lo tanto, verificar la eficiencia de este material para reforzar el área estudiada. Se consideraron los mecanismos de inestabilidad para expulsar el suelo blando de los cimientos y la ruptura generalizada que implica el terraplén, el refuerzo y el suelo de los cimientos. Se utilizó un programa de computadora para realizar los análisis de estabilidad. El factor de seguridad contra la expulsión del suelo blando y el factor de seguridad mínimo estaban muy cerca, alrededor de 1,3. El uso de geosintéticos como refuerzo para el caso estudiado demostró ser eficiente, con un aumento significativo en el factor de seguridad de 0,98 a 1,32. El factor de seguridad para el uso combinado de geosintéticos de refuerzo y la construcción de un hombro fue 2,37, el valor más alto de las tres opciones de estabilización de vertederos. La solución adoptada en el proyecto dependerá del valor del factor de seguridad mínimo determinado por el diseñador. Varios factores, como el tamaño del trabajo, el costo y el tiempo, así como la logística de la construcción pueden interferir en la elección de la solución más adecuada. Este artículo busca una mejor comprensión del tema y, como resultado, diseñar vertederos más seguros y económicos.

Palavras clave: Mejora; Factor de seguridad; Compresibilidad; Estabilidad.

1. Introdução

A construção de um aterro sobre solo mole de fundação requer a definição de alguma solução de estabilização. Devido à baixa resistência e alta compressibilidade, estes depósitos são motivo de preocupação nas obras de engenharia, reduzindo a área de instalação de estruturas civis, como fundações, estradas e grandes edificações. A rápida expansão da cidade nas últimas décadas, resultando nas frequentes construções sobre depósitos de solos moles, faz surgir a necessidade de conhecer as propriedades mecânicas dos depósitos de argila mole, a fim de estudar técnicas de melhoramento que permitam a construção nesse tipo de solo.

Algumas soluções que permitem a utilização das áreas de solo mole são bermas de equilíbrio, aterro estaqueado, melhoramento do solo e reforço. A escolha de uma delas dependerá de inúmeros fatores, como condições do solo, nível de recalque aceitável, o espaço disponível, além de custos e prazos de execução. Na alternativa de reforço do solo, pode-se empregar geossintéticos de reforço na base do aterro, permitindo o aumento da estabilidade do aterro, a construção mais rápida e a utilização de taludes mais íngremes. Os geossintéticos comumente utilizados para reforço em aterros sobre solos moles são: geotêxteis tecidos (GTX-W), geogrelhas (GGR) e geocélulas (GCE).

Futai (2010) comenta que a melhor forma de se entender como o reforço atua para aumentar o fator de segurança em aterros sobre solos moles foi apresentada por Jewell (1982). No mecanismo de instabilidade de um aterro não reforçado, o carregamento vertical é a causa principal da instabilidade, porém, Jewell (1988) cita mais uma, que é a tensão cisalhante no contato entre o aterro e o solo mole. Essa tensão cisalhante surge, porque o aterro não está confinado e como não suporta as forças de tração lateral, ocorre o deslocamento lateral. O uso do reforço na base do aterro sobre solo mole restringe o deslocamento lateral e promove o aumento da capacidade de carga.

Futai (2010) comenta ainda que a análise do aterro reforçado é realizada através dos métodos de estados limite, o que é pouco usual em obras de geotecnia: o estado-limite último e o estado-limite de utilização. O estado-limite último está relacionado com a ruptura propriamente dita, enquanto o estado-limite de utilização é um limite imposto às deformações, com o objetivo de que a obra tenha um bom desempenho.

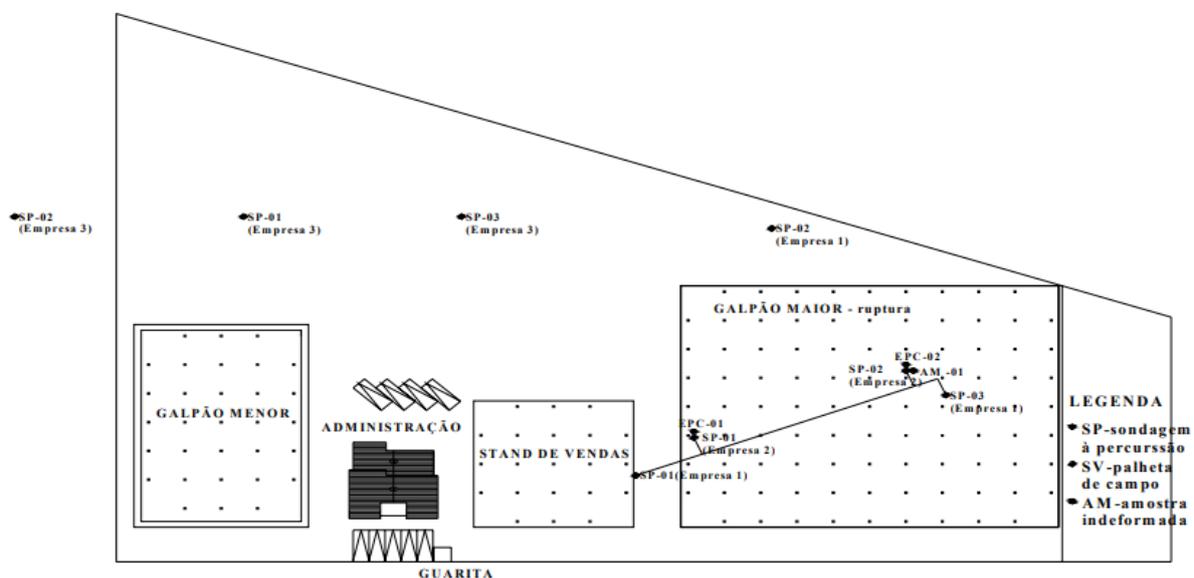
Se o geossintético usado como reforço tiver um módulo de rigidez adequado para a solicitação em questão, não haverá deformação excessiva do reforço. A força de tração máxima requerida para o reforço no estado-limite deve ser superior a força de tração máxima necessária para resistir o estado-limite de deslizamento rotacional, e também à soma das forças de tração máxima necessárias para resistir ao deslizamento lateral e a expulsão do solo de fundação.

Esta pesquisa apresenta um caso de dimensionamento de geossintéticos para reforço de um aterro sobre solo mole localizado em Recife, Pernambuco, estudado por Bello (2004). Trata-se de um aterro construído sem projeto técnico, e que veio a ter uma ruptura generalizada. O objetivo geral desta pesquisa é dimensionar geossintético para reforço do aterro sobre solo mole estudado por Bello (2004), considerando os mecanismos de instabilidade de expulsão de solo mole de fundação e de ruptura generalizada envolvendo aterro, reforço e solo de fundação.

2. Caracterização da Área de Estudo e Histórico da Obra

O terreno com cerca de 10.350 m² localiza-se na BR-101, Dois Irmãos, Recife-PE. Foram construídos 3 galpões, sendo um de grande porte com alvenarias de fechamento lateral (50 x 40 m), onde ocorreu a ruptura. É apresentada na Figura 1 a posição dos galpões, bem como as locações dos furos de sondagem, amostragem e ensaio de palheta. segue-se uma camada de argila siltosa, média a rija. O nível d'água situa-se em torno de 3,75 m de profundidade.

Figura 1 – Localização dos furos de sondagem, ensaio de palheta e retirada de amostras.



Fonte: Bello (2004).

Os galpões foram projetados em estruturas pré-moldadas de concreto armado, cujos pilares têm fundação superficial tipo bloco isolado de pedra rachão. O piso foi projetado com uma laje armada de 15 cm de espessura, assente diretamente no terreno.

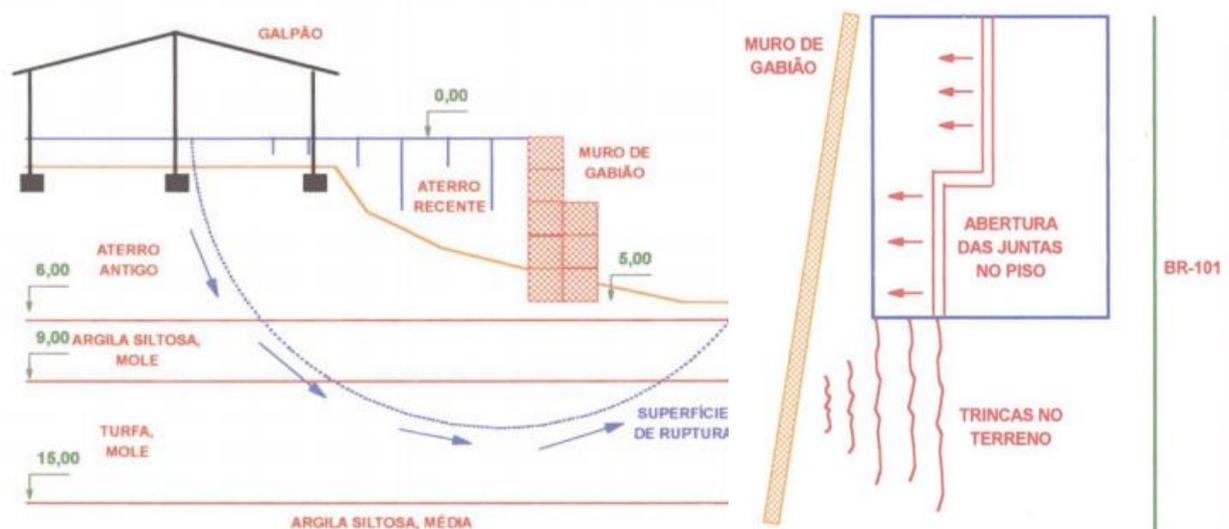
As sondagens mostraram um perfil composto inicialmente por uma camada de aterro de argila silto-arenosa, mal compactado, com cerca de 6 m de espessura. Abaixo do aterro tem-se uma camada de argila siltosa, muito mole a mole com espessura próxima de 1 m. Segue-se uma camada de turfa com argila orgânica, muito mole a mole, com cerca de 12 m de profundidade. Após os 12 m e até o limite das sondagens (cerca de 30 m de profundidade),

No início da construção o terreno já se encontrava aterrado com restos de metralha e lixo. O terreno foi regularizado através de um aterro compactado com cerca de 1 m de espessura. Foram executados um muro de arrimo de gabião com altura entre 3 e 6 m. Durante

a execução de terraplenagem, ocorreu um deslizamento em um dos cantos do terreno vizinho, onde foram observadas várias trincas no terreno paralelas ao muro de arrimo, que foram vedadas naquela ocasião. Durante a construção do galpão de grande porte, foram observadas fissuras nas alvenarias de fechamento, e uma abertura das juntas de dilatação do piso. Essas evidências permitiram concluir que o terreno apresentava componentes vertical e horizontal de deslocamento.

A Figura 2 apresenta o deslocamento vertical, representado pelo recalque das camadas argilo-turfosas moles, devido ao peso próprio do aterro e da estrutura, e o deslocamento horizontal, causado pelo escoamento lateral das camadas na direção no desnível do terreno.

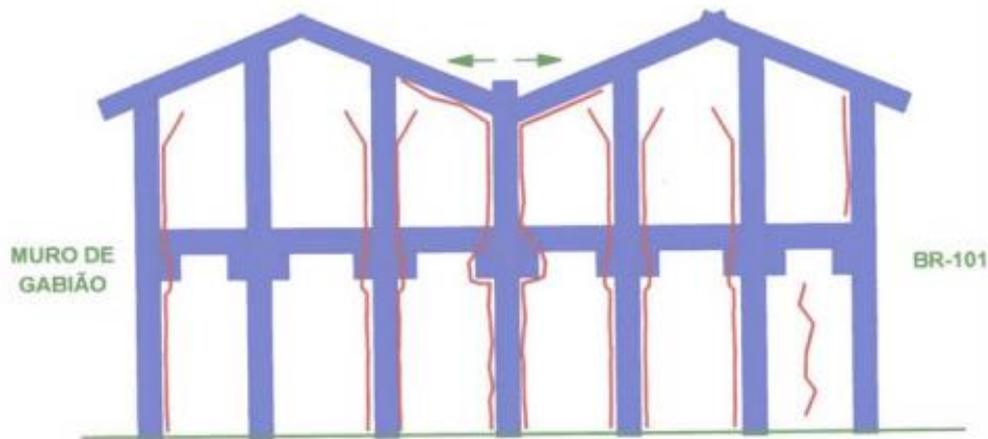
Figura 2 - Mecanismo e evidências de escoamento lateral do terreno.



Fonte: Bello (2004).

Na Figura 3 observa-se o deslocamento das alvenarias dos pilares de concreto, configurando um indício da ocorrência de recalques.

Figura 3 - Evidências do movimento vertical do terreno.



Fonte: Bello (2004).

Na época foram propostas duas soluções para combater os movimentos identificados: (a) para o movimento vertical foi sugerido o reforço de fundações através de estacas metálicas; e (b) para o movimento horizontal foi sugerida a execução de bermas no fundo do terreno. Como as soluções reparadoras eram onerosas em função do porte da obra, foi proposto monitorar o desempenho através da instalação de pinos nos pilares e marcos superficiais no terreno, com controle periódico de topografia da obra, e definir a necessidade de intervenções. Por decisão do proprietário, não houve monitoramento do local, e os pontos onde exibiam fissuras foram fechados com argamassa, ocorrendo neste período, a ruptura do terreno em grandes proporções.

Bello (2004) relata ainda que foram realizados ensaios de campo e laboratório. O proprietário, por sua conta, quebrou e retirou o piso de concreto, reaterrou o local com uma camada de pó de pedra, outra camada de brita, completando com a metralha do antigo piso. Após um ano do ocorrido, foram observadas evidências de um outro processo de ruptura no local de estudo, visto que após o primeiro deslizamento, reaterrou-se o local com objetivo de nivelamento, e o submeteu a altos índices de carregamento sem proporcionar de fato, um aumento significativo na capacidade de suporte do solo mole.

3. Metodologia

Inicialmente foi realizada a avaliação da estabilidade do aterro não reforçado com altura admissível considerando-se superfícies circular e não circular. Obtido um fator de

segurança (FS) inferior ao de projeto, parte-se para uma solução de reforço na base do aterro, com o objetivo de aumentar o FS.

A seção utilizada na análise de estabilidade do aterro foi selecionada a partir da observação de campo. A altura crítica, correspondente à ruptura do aterro foi de 6 m. Os valores dos parâmetros geotécnicos do aterro foram: $\gamma_{at}=18$ kN/m³ (peso específico), $c' = 10$ kN/m² (coesão), $\phi' = 30^\circ$ (ângulo de atrito). Os valores da resistência não drenada da fundação foram obtidos a partir do ensaio de palheta de campo e corrigidos segundo proposta de Bjerrum (1973).

A Tabela 1 apresenta os valores da resistência não-drenada utilizada na análise de estabilidade.

Tabela 1 - Resistências não drenadas utilizadas na análise de estabilidade – Galpão BR-101.

RESISTÊNCIA NÃO DRENADA UTILIZADA NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE (Su)			
Profundidade (m)		Su palheta de campo (kPa)	Su corrigido (kPa)
6 - 7,2	Argila orgânica siltosa	37,36	35,49
7,2 - 10	Turfa com argila orgânica	40,91	26,59
10 - 12,1		26,11	18,63
12,1 - 14		18,32	15,58
14 - 16	Argila orgânica siltosa	27,18	23,01
16 - 19		41,52	35,29

Fonte: Bello (2004).

Os valores da Tabela 1 foram obtidos por Bello (2004) que realizou análise de estabilidade considerando os valores da resistência não drenada (Su) da palheta corrigidos e os sem correção. Todos os valores dos fatores de segurança obtidos utilizando resistência não drenada corrigida segundo proposta de Bjerrum (1973) foram menores do que 1,00, o que de fato ocorreu, pois ocorreu o rompimento do aterro.

3.1. Definição do valor de tração mobilizada no reforço (T)

Para a determinação da tração mobilizada no reforço (T) faz-se necessário a avaliação da estabilidade considerando: o deslizamento lateral do aterro; ruptura por cunha; e

por meio de rupturas circulares, que podem ser avaliadas utilizando programas de estabilidade ou o método de Low et al. (1990).

3.2. Verificação da possibilidade de expulsão do solo mole

O método de cálculo convencional estuda o equilíbrio do bloco de solo mole sob o talude do aterro. Assim, o fator de segurança contra a expulsão do solo mole pode ser estimado através da Equação 1.

$$F_e = \frac{P_p + R_B + R_T}{P_a} \quad (1)$$

Onde: P_p é a reação passiva contra o deslizamento do bloco de solo mole; R_T é a força de aderência no topo do bloco de solo mole; R_B é a força de aderência na base do bloco de solo mole; P_a é o esforço ativo atuante sobre o bloco de solo mole; σ_h é a tensão horizontal ativa.

3.3. Ruptura Generalizada

A hipótese de ruptura mais comum em análises preliminares de estabilidade de taludes para obras de solo reforçado é a de superfície de deslizamento com forma circular e o emprego de métodos de equilíbrio-limite. O método proposto por Low et al. (1990) que visa o dimensionamento preliminar por meio do método de equilíbrio-limite. Esse método é utilizado para obter o valor de T para geometrias simples, onde não há bermas de equilíbrio e onde o aterro pode ser considerado com “comprimento” infinito com plataforma horizontal e sem sobrecarga. O método fornece o fator de segurança mínimo para as superfícies de ruptura com centros sobre a vertical passando pelo meio do talude e tangentes a uma linha horizontal a uma profundidade arbitrada (Palmeira & Ortigão, 2004). Variando a profundidade de tangência, pode determinar o fator de segurança mínimo da obra. A Equação 2 fornece o fator de segurança mínimo do aterro reforçado para todas as superfícies tangentes à horizontal na profundidade z.

$$F_r = \frac{F_0}{1 - \frac{TIR}{H^2}} \quad (2)$$

Onde: F_0 é o fator de segurança mínimo para todas as tangentes à horizontal na profundidade z, no caso sem reforço; T é o esforço de tração mobilizado no reforço; IR é um coeficiente

obtido a partir de um gráfico e que depende da geometria do aterro e da profundidade tangência dos círculos; γ_{at} é o peso específico do material de aterro; e H é a altura do aterro.

Para a utilização do método proposto por Low et al. (1990), é necessário determinar o fator de segurança da obra, no caso sem reforço, variando a profundidade z (Equação 3).

$$F_0 = N_1 \times \frac{S_{ueq}}{\gamma_{at} \times H} + N_2 \left(\frac{c}{\gamma_{at} \times H} + \lambda \times \tan \phi \right) \quad (3)$$

Onde: γ_{at} , c e ϕ são os parâmetros do aterro; H é a altura do aterro; S_{ueq} é a resistência não drenada equivalente do solo mole; S'_{uo} e S_{uz} (S_u na profundidade z); N_1 , N_2 , λ são números de estabilidade.

Após calcular os diferentes valores de T para as diversas profundidades z , obtém-se o T_{max} que é o valor do esforço necessário para alcançar o F_r . Com o valor de $T_{máx}$ é possível escolher o tipo de reforço geossintético dentro das margens de segurança que serão discutidas mais adiante. O raio do círculo crítico, tangente à horizontal na profundidade z , para o caso reforçado é dado pela Equação 4.

$$R_r = \frac{3,128 \times \left(a - \frac{z \times T}{H^3 \times \gamma_{at}} \right)}{\left(\frac{z}{H} + 0,5 - \frac{T}{H^2 \times \gamma_{at}} \right)} \text{ com } R_r \geq z + H \quad (4)$$

$$\text{Onde: } a = \frac{1}{2} \times \left(\frac{z}{H} + 0,5 \right)^2 + \frac{(n^2 + 1)}{24} \quad (5)$$

Adota-se o maior valor de T entre os calculados para o F_s de projeto, sendo que esse valor deve atender aos critérios de T_{lim} . Caso não atenda, deve-se alterar a altura ou talude do aterro e repetir os cálculos.

3.4. Esforço de tração T mobilizada no reforço

Os solos de aterro e de fundação, ao se deslocarem horizontalmente, induzem deformações no geossintético, que reage e gera um esforço de tração resistente (T), o geossintético atua como um reforço passivo, restringindo o deslocamento das camadas de solo. O esforço de tração limite (T_{lim}) corresponde à soma do empuxo lateral no aterro e da força cisalhante do solo de fundação, este valor não pode ser excedido pelo valor do esforço de tração no reforço (T). Assim:

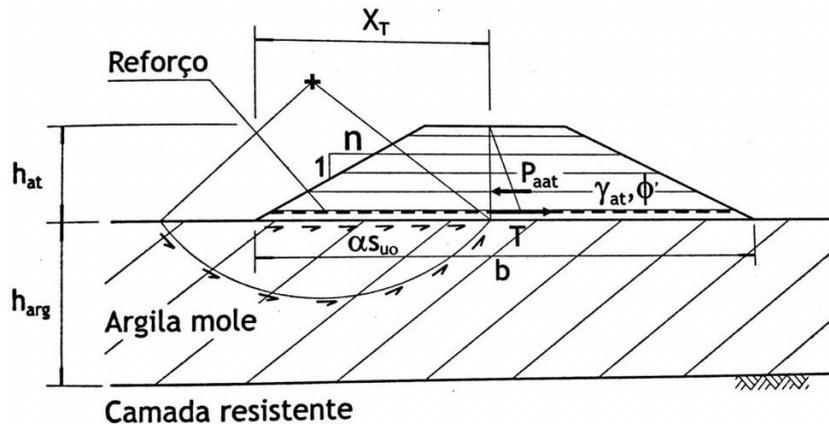
$$T \leq T_{lim} = P_{aat} + P_{ref} \quad (6)$$

$$P_{aat} = K_{aat}(0,5 \cdot \gamma_{at} \cdot h_{at}^2 + qh_{at}) \quad (7)$$

$$P_{ref} = X_T \left(\frac{\alpha S_{uo}}{F_s} \right) \quad (8)$$

Onde: S_{uo} é a resistência não drenada na interface solo-aterro; α é o fator de redução aplicado para refletir a minoração da resistência não drenada na interface aterro-solo compressível; X_T é a distância entre o local em que o círculo intercepta o reforço e o pé do talude; K_{aat} é o coeficiente de empuxo ativo; γ_{at} é o peso específico do aterro, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Ruptura circular de um aterro sobre solo mole.



Fonte. Almeida e Marques (2010).

3.5. Definição do esforço de referência do reforço

A resistência de referência do material de reforço (T_{ref}) pode ser obtida através de fatores de redução globais sobre a resistência disponível, também chamada de admissível (T) calculada em projeto. Esses fatores de redução globais são devidos à fluência, a danos mecânicos de instalação, à degradação química, e à degradação biológica (Almeida & Marques, 2010).

3.6. Definição da deformação permissível ε_a e do módulo da rigidez

Para determinar a deformação permissível ε_a no geossintético, no caso de solos de fundação com resistência constante e profundidade limitada, utilizar a Equação 9 e o ábaco apresentado em Almeida e Marques (2010):

$$\Omega = \frac{\gamma_{at} \cdot h_{cr}}{S_u} \frac{S_u}{E_u} \left(\frac{h_{arg}}{B} \right)^2 \quad (9)$$

Onde: h_{cr} é a altura de colapso do aterro não reforçado; B é a largura da plataforma; h_{arg} é a espessura da camada mole; S_u/E_u é a relação entre resistência e módulo de Young não drenado; γ_{at} é o peso específico do aterro.

A partir da relação da tração mobilizada T com a deformação permissível ε_a , obtém-se o módulo de rigidez J . O geossintético utilizado deve ser suficientemente rígido pra evitar deformações excessivas no aterro. Segundo Palmeira e Ortigão (2004), as deformações admissíveis no elemento de reforço variam de 3 a 10%.

3.7. Cálculo do comprimento do reforço – interação solo / geossintético

Para se garantir a estabilidade da obra, deve-se também ter um comprimento de reforço apropriado, e um dos fatores a ser analisado é o comprimento de ancoragem (L_{anc}) em ambos os lados do ponto de interseção da superfície circular de deslizamento crítica com a direção da camada de reforço. Para mobilizar o esforço de tração (T), o geossintético precisa estar com o devido L_{anc} segundo Equação 10.

$$L_{anc} = \frac{F_{anc} \times T}{2 \times C_i \times (c + \gamma_{at} \times H \times \tan \phi)} \quad (10)$$

Onde: F_{anc} é o fator de segurança contra ruptura por deficiência de ancoragem (geralmente $F_{anc} \geq 1,5$); γ_{at}, c, ϕ são os parâmetros do aterro; H é a altura do aterro; C_i é o coeficiente de interação do geossintético com o solo, obtido por meio de ensaios de arrancamento.

Segundo Almeida e Marques (2010), geogrelhas de malha quadrada com abertura entre 20 mm e 40 mm podem apresentar C_i superiores a 0,8. Para aberturas maiores e poucos membros transversais, C_i pode ser menor que 0,5. Para geotêxteis tecidos, geralmente o valor é em torno de 0,6. Caso o comprimento do reforço seja insuficiente para atender os requisitos de ancoragem, pode-se aumentar a resistência por ancoragem da camada de reforço por meio de abatimento do talude ou da utilização de bermas laterais. O comprimento total do reforço é apresentado na Equação 11:

$$L_{reforço} = X_T + L_{anc} \quad (11)$$

Onde: X_T é a distância entre o local em que o círculo intercepta o reforço e o pé do talude; e L_{anc} é o comprimento de ancoragem.

3.8. Propriedades dos materiais

Bello (2004) estimou as propriedades do aterro a partir da literatura, havendo necessidade pela falta de obtenção de amostras do aterro e realização de ensaios. Os valores considerados foram $\gamma_{at}=18 \text{ kN/m}^3$, $c' = 10 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 30^\circ$. Os valores da resistência não drenada da fundação foram determinados a partir do ensaio de palheta de campo, sendo corrigidos pela proposta de Bjerrum (1973), e variando entre as faixas de 15,58 a 35,49 kPa, em 6 (seis) subcamadas com diferentes.

Após os cálculos da tração mobilizada no aterro e o módulo de rigidez do reforço considerou-se que para atender os requisitos seria utilizada a geogrelha Fortrac R 300/50-30T, que é feita de poliéster (PET), possui uma resistência à tração de mais de 300 kN/m , um alto módulo de rigidez e baixa deformação.

3.9. Determinação das cargas do galpão

Para a determinação da carga total gerada pelo galpão foram analisadas as cargas incidentes em cada pilar da edificação, através de um relatório de cálculo estrutural. Os pilares foram divididos em centrais que têm carga individual incidente de $N_v = 150,58 \text{ kN}$ e em pilares laterais que possuem carga individual incidente de $N_v = 126,06 \text{ kN}$. Também foi analisada a carga gerada pelos veículos, considerou-se a ocupação máxima do galpão, onde cada veículo ocupa uma área de $A_{veículo} = 9,00 \text{ m}^2$ e tem uma massa de $M_{veículo} = 1000 \text{ kg}$, resultando numa carga total de $q = 4,04 \text{ kN/m}^2$.

3.10. Análise de estabilidade com uso de *software*

A verificação da estabilidade do aterro sem reforço foi determinada por meio de uma análise global, através do método de Bishop no software GEOSLOPE considerando a hipótese da superfície circular e o S_u corrigido. Foram admitidos os seguintes parâmetros para o aterro apresentados no item 3.8.

Na análise global do aterro pelo método de Bishop através do software GEOSLOPE com a inserção da resistência (T) obtida pelo método Low et al. (1990), e utilizando o comprimento do reforço geossintético ($L_{reforço}$).

4. Análise dos Resultados

4.1. Análise de estabilidade do aterro considerando reforço - Dimensionamento do geossintético

Para determinar a tração mobilizada (T) na ruptura por deslizamento lateral em razão do empuxo do aterro, foi determinado um coeficiente de empuxo ativo $K_{aat} = 0,47$. Utilizando os parâmetros de projeto tanto do aterro quanto do solo, foi realizado o equilíbrio das forças horizontais, resultando em uma tração mobilizada de $T = 3,97 \text{ kN/m}$.

Para determinar T na ruptura por cunha, foi realizado o somatório de forças resistentes, como o empuxo passivo $P_{parg} = 874,56 \text{ kN/m}$, e a força cisalhante mobilizada na argila mole $S_{arg} = 312,48 \text{ kN/m}$. Este resultado foi dividido pelo somatório das forças instabilizantes, como o empuxo ativo no aterro $P_{aat} = 152,28 \text{ kN/m}$ e empuxo ativo na camada de argila $P_{aarg} = 827,96 \text{ kN/m}$. Supondo um fator de segurança de $FS = 1,3$, tem-se como resultado então em uma tração mobilizada de $T = 87,27 \text{ kN/m}$.

Para determinar T na ruptura circular, foi calculado o fator de segurança mínimo para as superfícies tangentes à horizontal. No caso sem reforço, o fator de segurança foi $F_0 = 1,37$ e foi considerado um fator de segurança para o caso reforçado de $F_r = 1,45$. A tração mobilizada no reforço, para se garantir o fator de segurança F_r preestabelecido, é de $T = 72,40 \text{ kN/m}$.

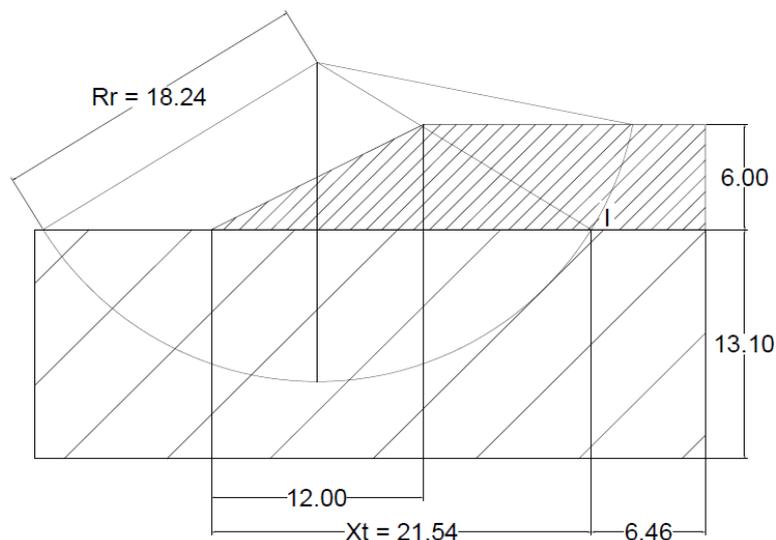
Após a avaliação das possibilidades de ruptura do aterro, em relação ao deslizamento lateral do aterro, à ruptura por cunha e à ruptura circular, o valor definido da tração no reforço deve ser o maior entre os casos analisados, sendo o mais crítico a ruptura por cunha com uma tração $T = 87,27 \text{ kN/m}$. Para efeito de projeto e a favor da segurança a tração foi majorada através de fatores de redução dos geossintéticos (Almeida & Marques, 2010), resultando em uma tração de $T = 211,19 \text{ kN/m}$.

O valor do esforço de tração no reforço a ser utilizado nos cálculos de estabilidade não deve exceder o esforço de tração limite que pode ser mobilizado (T_{lim}) que corresponde à

soma do empuxo lateral no aterro $P_{aat} = 163,67 \text{ kN/m}$ e a força cisalhante do solo de fundação $P_{ref} = 250,54 \text{ kN/m}$.

Para calcular a força cisalhante foi necessário determinar a distância (X_T) entre o local em que o círculo de ruptura intercepta o reforço e o pé do talude, como pode ser observado na Figura 5. O somatório de P_{aat} e P_{ref} resultou em um $T_{lim} = 414,21 \text{ kN/m}$ que é maior que a tração utilizada em projeto.

Figura 5 - Ruptura circular de um aterro sobre solo mole.



Fonte: Os autores (2020).

Após a determinação do equilíbrio de solo mole sob o talude do aterro, foram somados os empuxos passivos $P_p = 1823,45 \text{ kN/m}$ e a força de aderência no topo e na base do bloco de solo mole $R_T = 312,48 \text{ kN/m}$ e $R_B = 312,48 \text{ kN/m}$, estes foram divididos pelo somatório pelo empuxo ativo $P_A = 1873,76 \text{ kN/m}$, foi encontrado um fator contra a expulsão de solo mole de $F_e = 1,31$, mostrando que o aterro é estável para esta análise.

Utilizando um módulo de Young não drenado $E_u = 5000 \text{ kPa}$, determinou-se o parâmetro adimensional $\Omega = 0,006$ e inserindo este parâmetro no ábaco de Almeida e Marques (2010) foi determinado que a deformação permissível no reforço é $\varepsilon_a = 6\%$. Através do esforço de tração $T = 211,19 \text{ kN/m}$ e da deformação permissível, foi possível determinar o módulo de rigidez (J), que neste caso foi $J = 3519,8 \text{ kN/m}$.

Na definição do comprimento do reforço, foi primeiro necessário a determinação do comprimento de ancoragem, para garantir a fixação do geossintético ao solo. Através do esforço de tração determinado $T = 211,19 \text{ kN/m}$, com um $FS = 1,5$, parâmetros de projeto do

aterro, além de dados específicos do geossintético, como o coeficiente de interação do geossintético com o solo $C_i = 0,6$, foi determinado o comprimento mínimo de ancoragem de $L_{anc} = 3,6m$, resultando em um comprimento total do reforço de $L_{reforço} = 25,14m$.

No Quadro 1 é apresentado um resumo dos parâmetros de dimensionamento do geossintético de reforço obtidos para o caso estudado. Verifica-se uma grande quantidade de parâmetros calculados e estimados a partir de correlações ou reportados na literatura técnica.

Quadro 1 - Resumo dos parâmetros calculados no Projeto de reforço do aterro.

Tabela Resumo				
Tração mobilizada no reforço	Deslizamento lateral	$T = 3,97 \text{ kN/m}$	Coeficiente de empuxo ativo	$K_{aat} = 0,47$
	Ruptura por cunha	$T = 87,27 \text{ kN/m}$	Fator de minoração da resistência	$\alpha = 0,67$
	Ruptura circular	$T = 72,40 \text{ kN/m}$	Carga total gerada pelo galpão	$q = 4,04 \text{ kN/m}^2$
Características do aterro	Peso específico	$\gamma_{at} = 18 \text{ kN/m}^3$	Esforço de tração limite	$T_{lim} = 414,21 \text{ kN/m}$
	Altura	$h_{at} = 6,0 \text{ m}$	Empuxo passivo na argila	$P_{parg} = 874,56 \text{ kN/m}$
	Coesão	$c = 10 \text{ kN/m}^2$	Força cisalhante mobilizada na argila	$S_{sarg} = 312,48 \text{ kN/m}$
	Ângulo de atrito	$\phi = 30^\circ$	Empuxo ativo na camada de argila	$P_{aarg} = 827,96 \text{ kN/m}$
Raio do círculo crítico do caso reforçado		$R_r = 18,24 \text{ m}$	Empuxo ativo no aterro	$P_{aat} = 152,28 \text{ kN/m}$
Raio do círculo crítico do caso sem reforço		$R_0 = 19,33 \text{ m}$	Fator de segurança contra a expulsão	$F_e = 1,31$
Reação passiva contra o deslizamento do bloco de solo mole		$P_p = 1823,45 \text{ kN/m}$	Força de aderência na base do bloco de solo mole	$R_b = 312,48 \text{ kN/m}$
Força de aderência no topo do bloco de solo mole		$R_t = 312,48 \text{ kN/m}$	Esforço ativo atuante sobre o bloco de solo mole	$P_a = 1873,7 \text{ kN/m}$
Tração mobilizada no reforço		$T = 211,19 \text{ kN/m}$	Deformação permissível	$\epsilon_a = 6 \%$
Ângulo de atrito mobilizado no aterro		$\phi = 21^\circ$	Módulo de rigidez	$J = 3519,8 \text{ kN/m}$
Distância entre o local em que o círculo intercepta o reforço e o pé do talude		$X_T = 21,54 \text{ m}$	Coeficiente de interação do geossintético com o solo	$C_i = 0,6$
Fator de segurança mínimo para todas as tangentes à horizontal na profundidade z		$F_0 = 1,369$	Comprimento de ancoragem	$L_{anc} = 3,65 \text{ m}$
			Comprimento do reforço	$L_{reforço} = 25,19 \text{ m}$

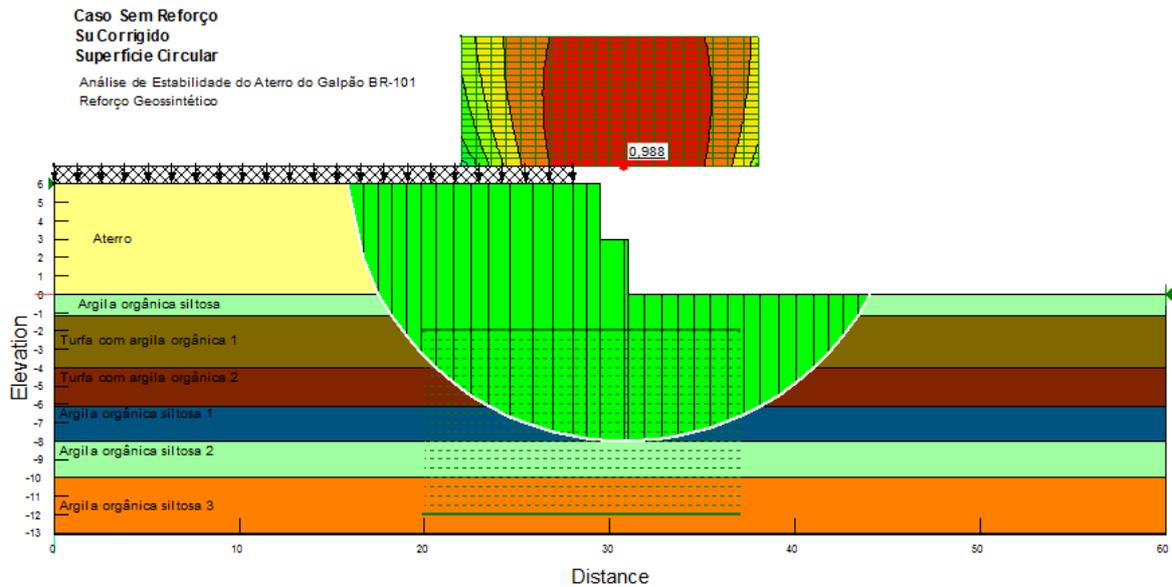
Fonte: Os autores (2020).

4.2. Análises comparativa da de estabilidade do aterro sem reforço, com reforço geossintético, e uso combinado de reforço geossintético e berma

Bello (2004) constatou que a proposta de construção da berma, eleva o valor do fator de segurança de 0,98 para 1,66, comparando com a situação sem reforço. Já com a utilização do reforço de geossintético com comprimento de: $L_{reforço} = 25,14m$ e resistência (T) obtida pelo método Low et al. (1990) e com parâmetros geotécnicos de: $\gamma = 20 \text{ t/m}^3$, $c = 10 \text{ kPa}$ e $\phi = 35^\circ$ e dimensões: 2,5 m de altura e 27,0 m de largura, na condição com apenas o reforço o FS apresentou valor de 1,32. Na situação com a utilização de bermas, foi obtido um FS de 2,37, sendo o maior valor das três opções de estabilização do aterro.

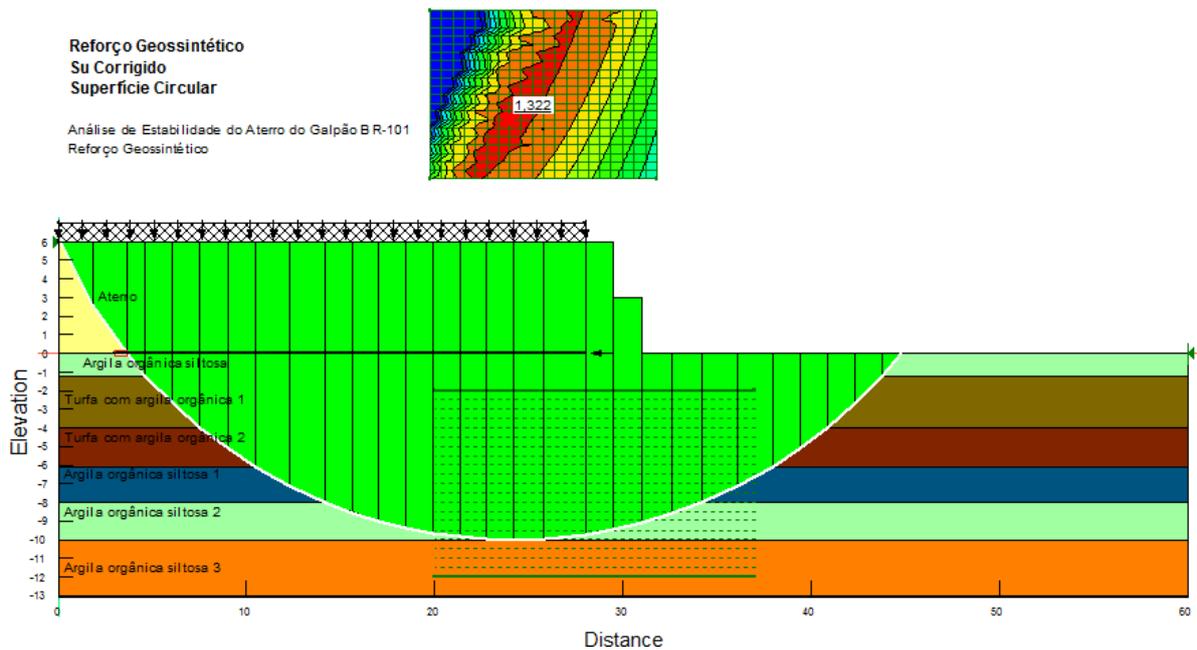
As Figuras 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, os resultados na análise de estabilidade para os casos do aterro sem reforço, aterro reforçado com geossintético, e aterro reforçado com geossintético e berma.

Figura 6 - Fator de segurança para o caso do aterro sem reforço.



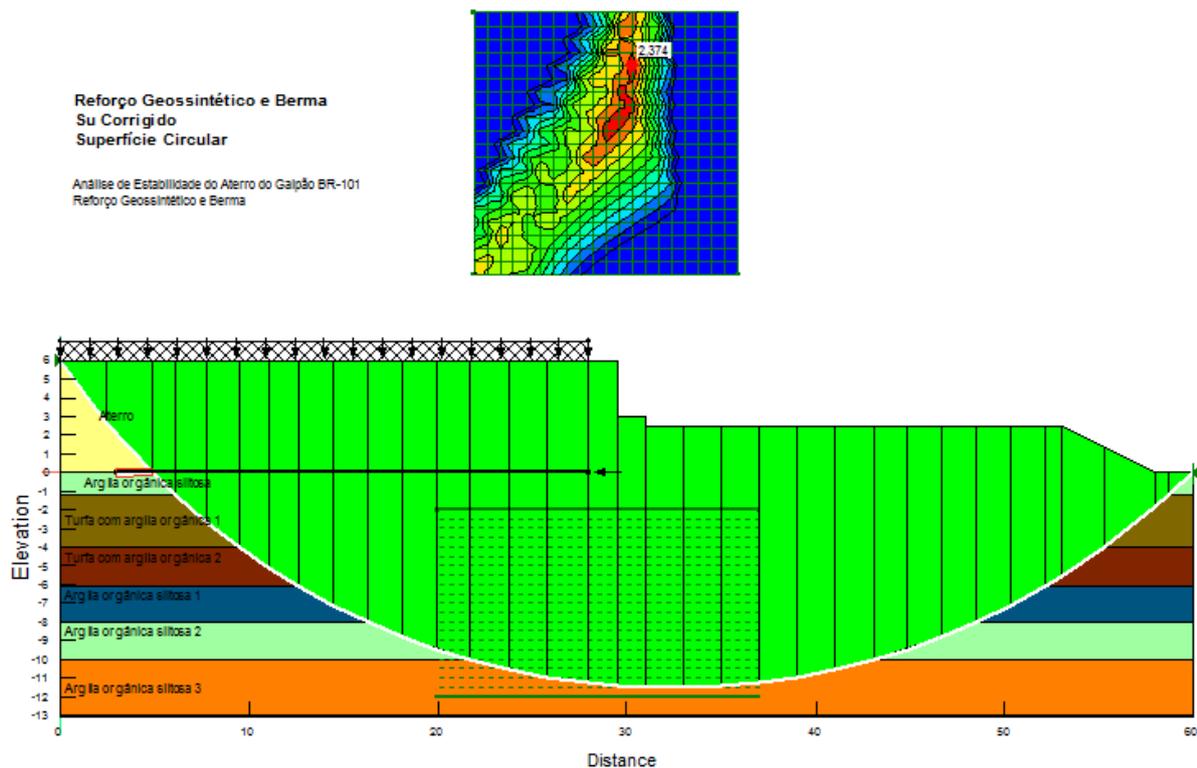
Fonte: Os autores (2020), apud Bello (2004).

Figura 7 - Fator de segurança para o caso do aterro reforçado com geossintético.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 8 - Fator de segurança para o caso do aterro reforçado com geossintético e berma.



Fonte: Os autores (2020).

Após as diversas análises feitas através do software GEO SLOPE, considerando a hipótese de superfície circular, com o Su corrigido, foi possível comparar o FS obtido antes e após a utilização do reforço geossintético. Percebe-se que a proposta da utilização do geossintético como solução para estabilizar o aterro, eleva o fator de segurança de 0,988 para 1,322, o que possivelmente evitaria a ruptura do mesmo.

Bello (2004) constatou que a proposta de construção da berma, eleva o valor do fator de segurança de 0,988 para 1,665, o que possivelmente evitaria a ruptura. Nesta pesquisa, verificou-se ainda a estabilidade do aterro considerando o uso combinado de geossintético de reforço e a construção de berma. O fator de segurança encontrado foi de 2,374, sendo o maior valor das três opções de estabilização do aterro estudado.

Todas as soluções atendem à segurança contra a ruptura do aterro, considerando os FS variando de 1,332 a 2,374. A solução adotada em projeto dependeria do valor do fator de segurança mínimo determinado pelo projetista e proprietário da obra. Diversos fatores como porte da obra, custo e prazo, assim como a logística da construção podem interferir na escolha da solução mais adequada.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos resultados da análise comparativa.

Tabela 2 - Valores de FS mínimos para diferentes condições de estabilidade.

RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE				
Condição de estabilidade	SEM REFORÇO	COM REFORÇO (GEOSSINTÉTICO)	BERMA	BERMA + REFORÇO (GEOSSINTÉTICO)
FS _{mín}	0,98 Bello (2004)	1,32 Presente pesquisa	1,66 Bello (2004)	2,37 Presente pesquisa

Fonte: Os autores (2020).

É importante verificar que todas as soluções consideradas (aterro reforçado com geossintético, uso de bermas de equilíbrio, e o uso combinado de bermas e reforço com geossintético), atendem à segurança contra a ruptura do aterro, considerando os FS variando de 1,33 a 2,37.

A solução adotada em projeto dependeria do valor do fator de segurança mínimo determinado pelo projetista e proprietário da obra. Diversos fatores como porte da obra, custo e prazo, assim como a logística da construção podem interferir na escolha da solução mais adequada.

5. Conclusões

Esta pesquisa apresentou os procedimentos para dimensionamento de geossintético de reforço para um aterro de solo mole. Na análise de estabilidade do aterro considerando reforço, determinou-se na ruptura por deslizamento lateral, uma tração mobilizada de $T = 3,97 \text{ kN/m}$. Na ruptura por cunha, a tração mobilizada foi de $T = 87,27 \text{ kN/m}$. Na ruptura circular tração mobilizada no reforço, para se garantir o fator de segurança F_r de 1,37, foi de $T = 72,40 \text{ kN/m}$. O esforço de tração limite que pode ser mobilizado foi $T_{lim} = 414,21 \text{ kN/m}$ que é maior que a tração utilizada em projeto ($T = 211,19 \text{ kN/m}$). O fator contra a expulsão de solo mole de $F_e = 1,31$, mostrando que o aterro é estável nessa análise. A deformação permissível no reforço (ϵ_a) foi de 6%. O módulo de rigidez (J), foi igual a $3519,8 \text{ kN/m}$. O resultado do comprimento total do reforço foi $L_{reforço} = 25,14 \text{ m}$.

A proposta do uso do geossintético como solução para estabilizar o aterro, elevou o fator de segurança de 0,988 para 1,322, o que possivelmente evitaria a ruptura do mesmo. A proposta de construção da berma, elevaria o valor do fator de segurança de 0,98 para 1,66, o

que possivelmente também evitaria a ruptura. O fator de segurança para o uso combinado de geossintético de reforço e construção de berma foi de 2,37, sendo o maior valor das três opções de estabilização do aterro. Todas as soluções analisadas atenderam à segurança contra a ruptura do aterro.

Esta pesquisa apresentou os procedimentos para dimensionamento de geossintético de reforço para um aterro de solo mole estudado por Bello (2004). Considerou-se os mecanismos de instabilidade de expulsão de solo mole de fundação e de ruptura generalizada envolvendo o aterro, reforço e solo de fundação. Para futuras pesquisas sugere-se para aterros com diferentes parâmetros geotécnicos e com outros tipos de geossintéticos.

Referências

- Almeida, M., & Marques, M. E. (2010). *Aterros Sobre Solos Moles Projeto e Desempenho*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 1, 254.
- Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays, State of the art report, Session 4. *Proc. of 8th ICSMFE, Moscow*, 3, 109-159.
- Bello, M. I. (2004). *Estudo de ruptura em aterros sobre solos moles – aterro do galpão localizado na BR-101 - PE*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. P.p. 207.
- Futai, M. M. (2010). *Theoretical and Practical Concepts on Behavior Analysis of Some Rio de Janeiro Clays*. DSc. Seminar, COOPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 133 pp.
- Jewell, R. A. (1982). A limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles* (pp. 671-676). USA:[sn].
- Low, B. K., Wong, K. S., Lim, C., & Broms, B. B. (1990). Slip circle analysis of reinforced embankments on soft ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 9(2), 165-181.

Palmeira, E. M.; & Ortigão, J. A. R. (2004). Aplicações em reforço – aterros sobre solos moles. In: *Vertematti, J. C.* (Ed.). Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo: Edgar Blücher.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Diogo Fellipe Vênus Magalhães – 60%

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello – 30%

Alison de Souza Norberto – 10%