

Análise de Estabilidade de Talude Sobre Solos Moles: Estudo de Caso

Antonio Stecanella Neto

Engenheiro Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil,
antonioestecanella37@gmail.com

Jonatas Sosnoski

Doutorando, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, jonatas.sosnoski@posgrad.ufsc.br

André Luis Meier

Doutorando, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, de.luis.meier@gmail.com

Gabriela Menghini de Godoy

Engenheira Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil,
gabrielaminglindegodoy@gmail.com

RESUMO: O presente artigo apresenta a análise de estabilidade de um aterro sobre solos moles localizado às margens da BR 116, na região periférica de São José dos Pinhais/PR. A partir de investigações geotécnicas disponíveis, determinou-se as camadas do subsolo e seus respectivos parâmetros. A primeira camada foi caracterizada como uma turfa, variando de 5 a 7 metros de espessura, a segunda, uma argila arenosa com material orgânico, com espessura de 2 a 2,5 metros, e, por fim, uma camada de areia que segue até o final do ensaio de piezocone. Foram analisadas quatro seções transversais do aterro, primeiramente por meio do cálculo da altura admissível, a partir do qual se notou que três seções extrapolaram o valor limite, de 1,53 metros, demonstrando uma possível ruptura do aterro. Na sequência foram elaborados os modelos geológico-geotécnicos e realizadas análises de estabilidade a partir de um software, por meio do método de equilíbrio limite, resultando em fatores de segurança menores que 1.5. Deste modo, foi definido o método de reforço do solo como solução de estabilização e dimensionado geogrelhas, cuja resistência à tração de cálculo foi de 240 KN/m e espaçamento vertical de 0,5 metros entre camadas. Fazendo novas análises com o uso do geossintético, notou-se o aumento do fator de segurança de todas as seções, os quais ficaram maior que o valor mínimo, comprovando a eficiência da geogrelha como material de reforço para o aterro de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro, Solos moles, Análise de estabilidade, Geogrelhas.

ABSTRACT: This article presents a stability analysis of a landfill on soft soils located on the banks of BR 116, in the peripheral region of São José dos Pinhais/PR. From available geotechnical investigations, the subsoil layers and their partners were determined. The first layer was described as peat, varying from 5 to 7 meters thick, the second, a sandy clay with organic material, 2 to 2.5 meters thick, and, finally, a layer of sand that continues up to the end of the piezocone test. Four transversal bottles of the landfill were proven, firstly by calculating the permissible height, from which it was noted that three bottles exceeded the limit value of 1.53 meters, demonstrating a possible rupture of the landfill. Geological-geotechnical models were then developed and stability analyses were carried out using software, using the limit equilibrium method, resulting in safety factors lower than 1.5. In this way, the soil reinforcement method was defined as a stabilization solution and geogrids were dimensioned, whose design tensile strength was 240 KN/m and vertical spacing of 0.5 meters between layers. Carrying out new analyses using geosynthetics, an increase in the safety factor of all deposits was noted, which was greater than the minimum value, proving the efficiency of the geogrid as a reinforcing material for the study landfill.

KEYWORDS: Landfill, Soft soils, Stability analysis, Geogrids.

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional, tem-se um avanço considerável dos centros urbanos em direção às regiões periféricas, como várzeas e pântanos, que são áreas caracterizadas por depósitos sedimentares. Muitos desses locais, quando apresentam níveis d'água próximos à superfície aliados à ação de bactérias, de fungos e de ácidos sobre a matéria orgânica, constituem as regiões compostas por argilas orgânicas turfosas a poucos metros da superfície. A execução de fundações sobre esse tipo de material pode ocasionar diversos problemas técnicos, como a abertura de fendas de tração durante e após a construção do aterro, recalques excessivos e a instabilidade (Massad, 2010). Desta forma, o presente artigo tem como objetivo analisar a estabilidade de um aterro situado na região metropolitana de São José dos Pinhais/PR, a partir de investigações geotécnicas e dados do projeto do aterro.

2 MODOS DE RUPTURA DE ATERRO SOBRE SOLOS MOLES

O rompimento de um aterro pode manifestar-se de três maneiras, por instabilidade interna, por fundação e por ruptura global, conforme representado na Figura 1. O primeiro cenário ocorre quando o corpo do aterro rompe lateralmente sem danificar o solo da base. No segundo caso, o colapso resulta da baixa capacidade de carga do solo da fundação, levando o rompimento e expulsão do solo da base. Por último, a instabilidade global é caracterizada quando as tensões solicitantes superam ou igualam as de resistência, rompendo tanto a massa de aterro quanto o solo da fundação (Almeida & Marques, 2014).

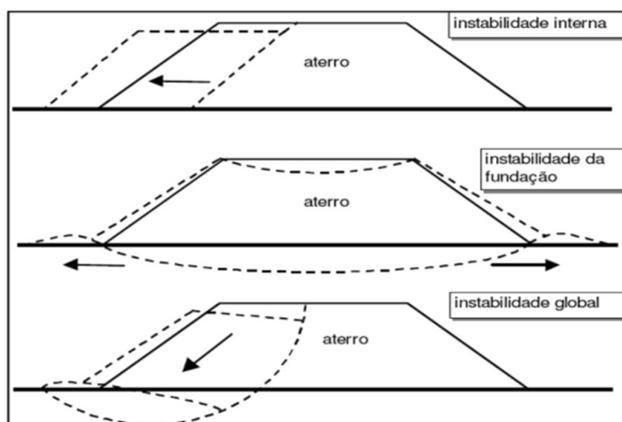


Figura 1. Modos de ruptura de um aterro (Almeida & Marques, 2014).

De acordo com Almeida e Marques (2014), das rupturas apresentadas, as mais recorrentes são as de instabilidade da fundação e global, as quais serão estudadas no presente trabalho.

2.1 Instabilidade da Fundação

É importante salientar que, no caso de instabilidade da fundação, toda massa de aterro atuará como um carregamento, podendo causar a ruptura do solo da fundação (Almeida & Marques, 2014). Sendo assim, Massad (2010) propõe o cálculo da altura admissível do aterro por meio da Equação 1.

$$H_{adm} = \frac{h_{cr}}{F_s} = \frac{5,14 \times S_u}{\gamma_{at} \times F_s} \quad (1)$$

Sendo S_u a resistência não drenada, γ_{at} o peso específico natural do aterro e F_s o fator de segurança mínimo de projeto.

2.2 Instabilidade Global

Os métodos mais utilizados para instabilidade global envolvem a análise de uma massa, talude, com uma possível superfície de ruptura, que, de acordo com Gerscovich (2016), pode ser representada por uma superfície de ruptura poligonal, circular ou de qualquer outra geometria. Adicionalmente, segundo Massad (2010), os métodos de equilíbrio limite partem do princípio de que o coeficiente de segurança é contínuo ao longo de toda a superfície de ruptura, e o solo rompe sem sofrer deformações. Nesse contexto, dentre os métodos de equilíbrio limite, destacam-se o de Bishop Simplificado, o de Spencer e o de Morgenstern-Price, todos utilizados no presente estudo.

3 ATERRO REFORÇADO

Segundo Jewell (1988), o reforço na base de aterros em solos moles aumenta a resistência ao cisalhamento, reduz a sollicitação da fundação e eleva as forças resistentes. Isso permite que os aterros reforçados atinjam alturas maiores que os aterros não reforçados ou ofereçam um maior ganho de segurança para as mesmas alturas. O autor ainda faz uma análise da variação do fator de segurança ao longo do tempo para aterros reforçados, assegurando que o reforço aumenta o fator de segurança no início da construção e que, ao longo dos anos, há um ganho da resistência do solo devido ao adensamento.

3.1 Especificação do Geossintético

A verificação de estabilidade de um aterro sobre solos moles pode ser feita de diversas formas, tais como o método de equilíbrio limite, a teoria da plasticidade ou os métodos numéricos. Dentre as opções, um dos mais utilizados na prática de engenharia geotécnica brasileira é o de equilíbrio limite. Segundo Futai (2015), os métodos de Milligan e Busbridge (1983) e de Low *et al.* (1990) são amplamente adotados.

Diante disso, conforme o método de Low *et al.* (1990), aplicado neste estudo, para especificar o material de reforço é preciso ter como dado de entrada a tração mobilizada no geossintético, obtida a partir da associação das Equações 2 e 3 com os gráficos da Figura 2.

$$F_0 = N_1 \left(\frac{S_u}{\gamma_{at} \times H} \right) + N_2 \left(\frac{c'}{\gamma_{at} \times H} + \lambda \times \text{tg}(\phi) \right) \quad (2)$$

$$T = \left(1 - \frac{F_0}{F_R} \right) \times \left(\frac{\gamma_{at} \times H^2}{I_r} \right) \quad (3)$$

Onde F_0 é o fator de segurança mínimo para todos os círculos tangentes à linha horizontal na profundidade z , F_R fator de segurança mínimo para todas as superfícies tangentes à linha horizontal na profundidade z , H a altura do aterro, c' a coesão efetiva do aterro, ϕ o ângulo de atrito do aterro, N_1 , N_2 , I_r e λ números de estabilidade.

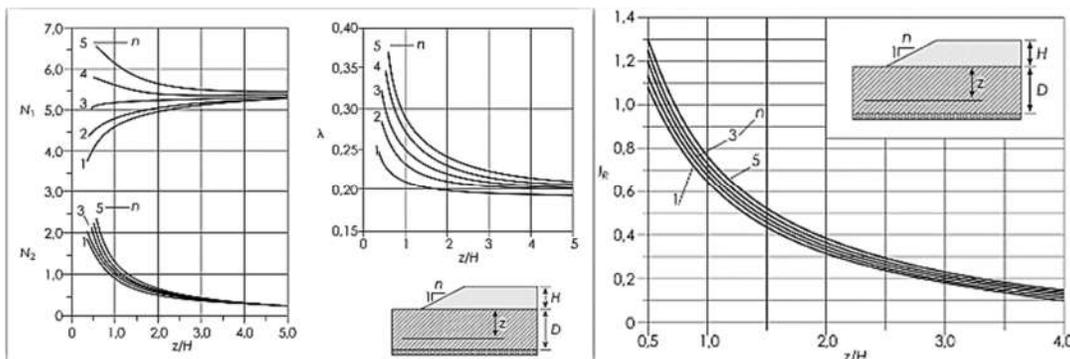


Figura 2. Números de estabilidade de Low *et al.* (1990 *apud* Vertematti, 2015).

4 RESULTADOS

Com uma área aproximada de 51.227 m², o local de estudo está localizado em São José dos Pinhais/PR, na BR 116, contorno leste. Situado no domínio do Escudo do Paraná, o terreno está sobre uma formação de depósitos aluvionares proveniente da Era Cenozoica, sendo composto principalmente por sedimentos arenos-argilosos aluvionares inconsolidados, restos de matéria orgânica e presença de seixos (CPRM, 2024).

O empreendimento a ser viabilizado no terreno é composto por um aterro cuja altura varia entre 1,0 e 3,0 metros, com edificações tanto ao centro do aterro quanto em sua extremidade, sendo uma delas sobre a crista de um dos taludes em análise, conforme representado na Figura 3. A fim de ter um bom entendimento das camadas do subsolo, foram disponibilizadas 4 verticais de sondagem do tipo CPTu (*piezocone penetration test*), nomeadas CPTu-01 a 04, porém nota-se pela Figura 3 que as verticais mais próximas dos taludes são as 01 e 04, portanto, as duas selecionadas para a análise de estabilidade do aterro em questão.

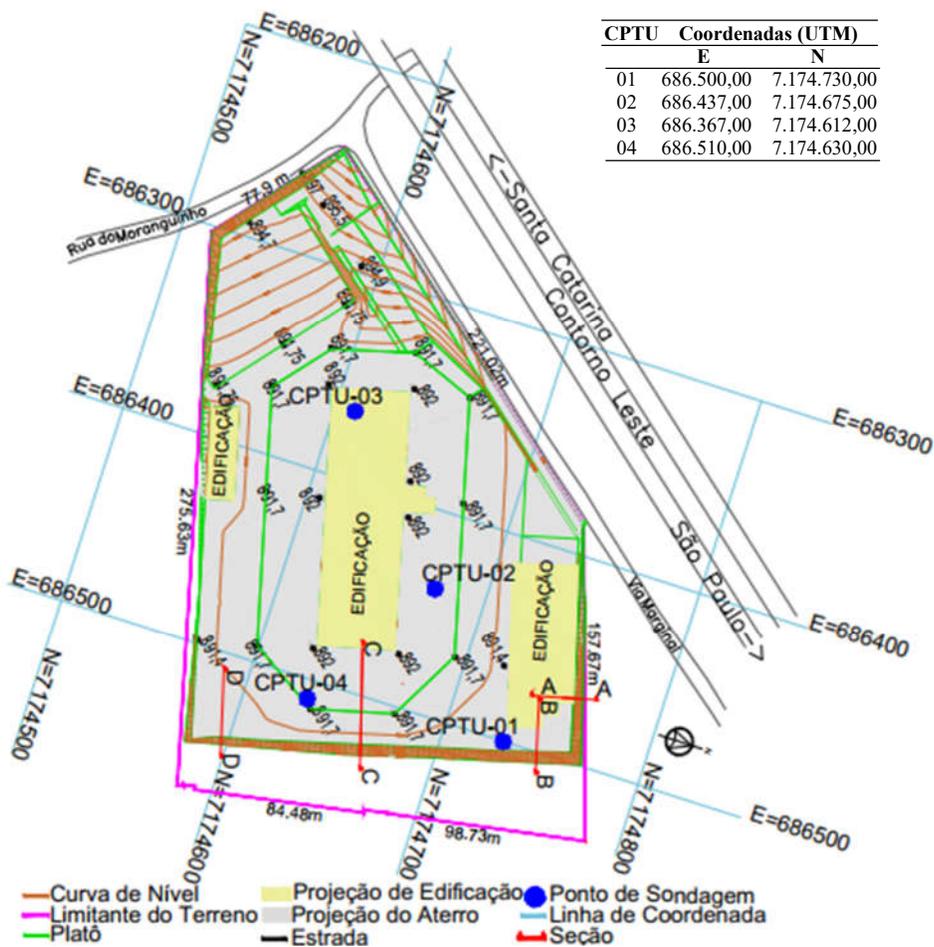


Figura 3. Mapa de terraplanagem (Adaptado de Stecanella, 2023).

Com base na geologia, na topografia e no ensaio de *piezocone* e de dissipação de poropressão, Stecanella (2023) definiu 4 seções geológica-geotécnicas, apresentadas na Figura 4. Para determinar a estratigrafia do subsolo dos modelos AA e BB utilizou-se a vertical 01, enquanto para as seções CC e DD a vertical 04. Em contrapartida, pela Figura 4, percebe-se que a projeção da vertical 01 não se encontra na seção AA devido à distância do ponto e a seção representada. Com perfis similares, ambos os modelos são compostos basicamente pelo material de aterro, cujo peso específico adotado foi de 19 kN/m³, ângulo de atrito de 35° e coesão efetiva de 10 kPa, seguidas por 3 camadas de solo.

A primeira camada é descrita como uma turfa, baseada nas características de um solo extremamente orgânico. Já a segunda camada é identificada como uma argila arenosa com material orgânico, com base na

baixa resistência de ponta do cone, no aumento da pressão neutra e em uma análise tátil-visual feita na presente camada de solo pela empresa executora das investigações em campo. Por fim, a última camada é designada como uma areia, apresentando uma elevada resistência de ponta e um excesso de poropressão inferior a hidrostática.

O nível d'água foi identificado variando entre 0,60 e 0,80 metros de profundidade. Por fim, os parâmetros geotécnicos são demonstrados na Tabela 1 com seus respectivos valores, baseados nos ensaios de *piezocone*.

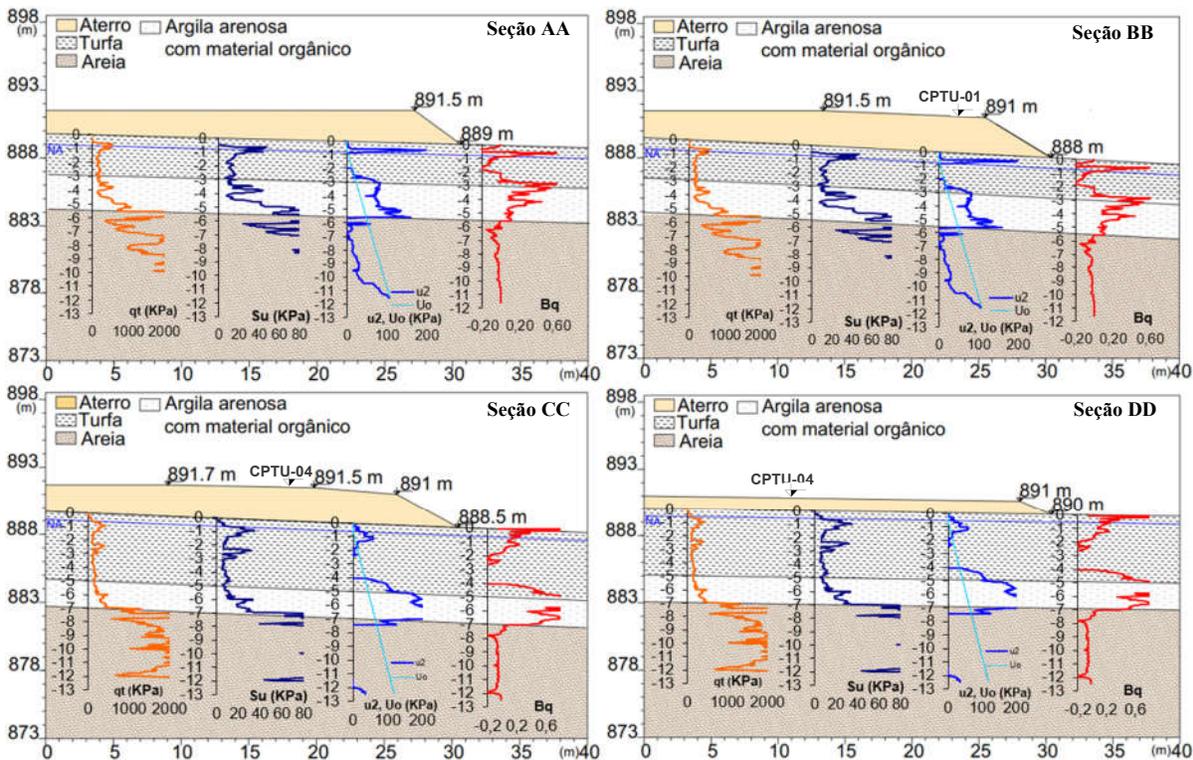


Figura 4. Modelos geológico-geotécnico (Adaptado de Stecanella, 2023).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos.

Seções	Solo	S _u (kPa)	c' (kPa)	φ (°)	γ (kN/m ³)
AA e BB	Aterro	-	10	35	19
	Turfa	12,6	-	-	14
	Argila arenosa	33	-	-	14
	Areia	-	1	35	15
CC e DD	Aterro	-	10	35	19
	Turfa	8,5	-	-	14
	Argila arenosa	18	-	-	14
	Areia	-	1	35	15

A partir das seções transversais e dos parâmetros dos solos estimados, determinou-se a altura admissível do aterro através da proposta de Massad (2010). Segundo Almeida e Marques (2014), nesta etapa já é possível definir a necessidade de reforço da estrutura do aterro. Portanto, para a análise, utilizou-se a Equação 1 com os valores de 8,5 kPa para resistência não drenada da turfa, 19 kN/m³ do peso específico do aterro e $F_s = 1.5$.

$$H_{adm} = \frac{5,14 \times S_u}{\gamma_{at} \times F_s}$$

$$H_{adm} = 1,53 \text{ m}$$

Nota-se pela Figura 4 que, exceto para a seção DD, todas as seções apresentam uma altura de aterro superior a 1,53 metros, o que resultaria em fatores de segurança inferiores a 1.5. Sendo assim, para verificar a estabilidade global dos taludes, utilizou-se o software Slide 2 da empresa Rocscience, licença de teste gratuita, por meio de uma análise de equilíbrio limite, através dos métodos de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Seguindo a recomendação da NBR 11682 (ABNT, 2009), foi considerada uma sobrecarga acidental de 20 kPa na crista do aterro e um fator de segurança mínimo de 1.5, em conformidade com os padrões de nível alto contra danos a vidas humanas e de danos materiais.

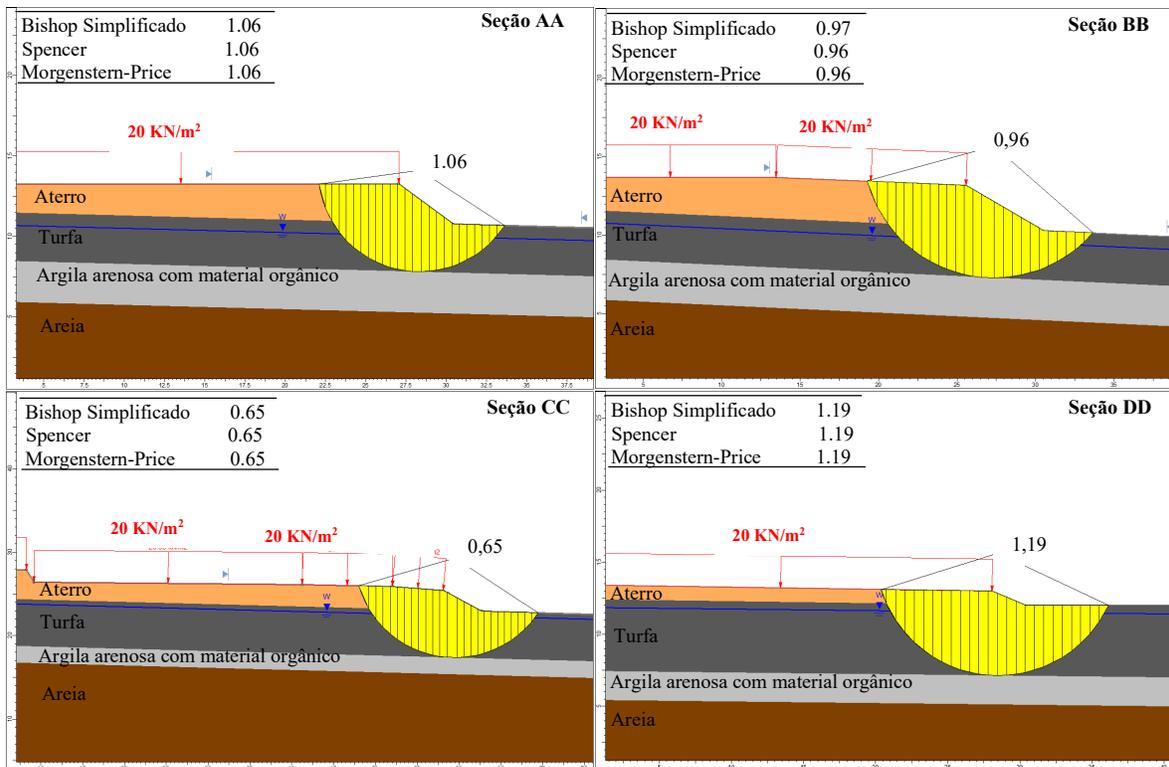


Figura 5. Análise de estabilidade global sem reforço.

Ao analisar a Figura 5, percebe-se que os taludes das seções AA, BB e CC apresentaram um fator de segurança menor ou igual a 1, indicando que, em condições reais, já teriam rompido. Na seção DD, embora o fator de segurança seja superior a 1, está abaixo do limite de $F_s=1.5$. Salienta-se que todas as superfícies de ruptura tendem a tangenciar o limitante entre as camadas de turfa e de argila arenosa, comprovando a influência da representatividade das camadas do subsolo. Dada a instabilidade de todos os taludes, utilizou-se o reforço do aterro por meio do geossintético geogrelha como possível método de solução, cuja função é distribuir as tensões ocasionadas pela massa de aterro sobre o solo da fundação e suportar a tração mobilizada pelo aterro.

Para a especificação da geogrelha, adotou-se como método de estudo a proposta de Low *et al* (1990) e os fatores de redução sugeridos por Koerner e Hsuan (2001 *apud* Almeida & Marques, 2014), sendo 1.1 para danos mecânicos de instalação e degradação química, 1.0 para degradação biológica e, por fim, 2.0 devido a fluência, para o tempo de vida útil da obra. Com isso, encontrou-se o esforço de tração (T) e de referência (T_{ref}) os quais são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2. Trações mobilizadas.

Seção	AA	BB	CC
T (kN/m)	61	91	240
T_{ref} (kN/m)	148	220	581

Devido a seção DD apresentar um pequeno valor de tração mobilizada, foi desconsiderada da Tabela 2 e para o presente estudo, sendo assim, a função da geogrelha na seção é apenas auxiliar na distribuição de esforços. Como premissa para a análise do aterro reforçado uma resistência à tração de cálculo de 240 kN/m, com uma taxa de cobertura de 100%, ou seja, geogrelhas em um plano contínuo com toda superfície do aterro coberta. Para o encontro de seções, como é o caso de AA e BB, considerou-se uma sobreposição das geogrelhas, contudo, devido à maior quantidade de reforço, essa porção não foi avaliada em termos de grelhas bidirecionais, pois não possui um fator de segurança crítico. Como o geossintético sofre diversos esforços de tração ao longo da construção do aterro, foi considerado como um sistema passivo. Por fim, foram adotados como parâmetro de interface da geogrelha com o solo 90% dos valores de parâmetros de resistência do aterro, sendo 9 kPa de coesão e 32° para o ângulo de atrito, conforme recomendação do fabricante.

Para a metodologia de dimensionamento, foi introduzida uma camada da geogrelha para toda seção e realizadas análises iterativas de comprimento do reforço em busca de valores de fator de segurança superiores ao mínimo. Para a Seção CC, contudo, somente com uma camada de reforço não foi suficiente para a estabilização, dessa forma, foram inseridas mais camadas no corpo do aterro, com um espaçamento vertical de 0,5 metros. A Figura 6 apresenta os resultados das análises de estabilidade do aterro reforçado para cada seção.

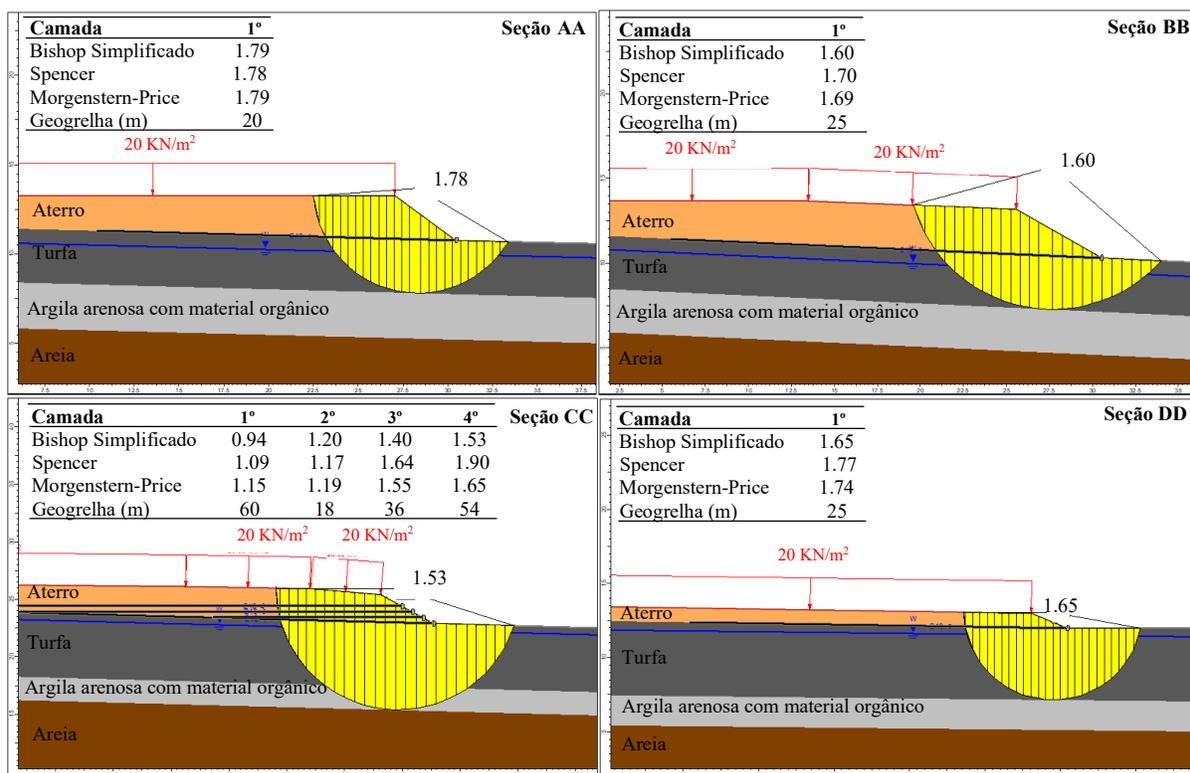


Figura 6. Análise de estabilidade global com reforço.

Nota-se que as análises do aterro reforçado atingiram o fator de segurança mínimo prescrito pela norma, comprovando a eficiência do método escolhido para este estudo de caso.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo foram realizadas análises de estabilidade em um aterro seguindo recomendações normativas e da literatura. Os valores de fator de segurança encontrados para os taludes sem reforços variaram de 0.65 a 1.19, necessitando, assim, de uma solução de reforço. Foi definida a aplicação de geogrelha na estrutura do aterro para garantir as condições de estabilidade conforme NBR 11682 (2009) o que garantiu a estabilidade do aterro. Vale ressaltar que todas as superfícies de ruptura tangenciaram ou ficaram próximas as mudanças de camadas, o que remete a importância da representatividade do subsolo para estudos geotécnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M., Marques, M. (2014) *Aterros Sobre Solos Moles: projeto e desempenho*, 2nd ed., Oficina de Textos, São Paulo, 254 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Campanha de Pesquisa de Recursos Minerais. *Mapas Geocientíficos do Brasil*. Disponível em: <<https://geoportal.cprm.gov.br/geosgb/>>. Acesso em: 3 fev. 2024.
- Futai, M. (2015) *Definição da Força Mobilizada no Reforço, devido à Compatibilização de Deformações, em Aterros Reforçados Sobre Solos Moles e em Condição Não Drenada*. Disponível em: <<https://sites.usp.br/geoinfrausp/wp-content/uploads/sites/714/2021/10/2015-Geossinteticos-Conferencia-Futai.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2024.
- Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*, 2nd ed., Oficina de Textos, São Paulo.
- Jewell, R. A. (1988) The Mechanics of Reinforced Embankments on Soft Soils. *Geotextile and Geomembranes*, 7 (4), p.237-273.
- Koerner, R. M.; Hsuan, Y. G. (2001). Geosynthetics: characteristics and testing. In: Rowe, R. K. (Eds.). *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. Springer Science Business Media, New York, NY, USA. Cap 7, p.173-196.
- Low, B. K., Wong, K. S., Lin, C., Brons, B. B., (1990) Slip circle analysis of reinforced embankment on soft ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 9 (2), p.165-181.
- Massad, F. (2010) *Obras de terra: curso básico de geotecnia*, 2nd ed., Oficina de Textos, São Paulo.
- Milligan, V., Busbridge, J. R. (1983) *Guidelines for the use of tensor in reinforcement of fill over weak Foundation*.
- Stecanella A. (2023) *Análise de estabilidade de talude sobre solos moles: estudo de caso*. Trabalho de Conclusão de Curso, Programa de Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina/UEDESC, 81 p.
- Vertematti, J. C. (2015) *Manual brasileiro de geossintéticos*, 2nd ed., Editora Blucher, São Paulo.