XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/89

Influência da variação da coesão e do ângulo de atrito interno em um muro de solo reforçado com geogrelhas

Júlia dos Santos Oliva - Discente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UNESP/FEB, Bauru, Brasil, julia.oliva@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta - Professora Assistente Doutora, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso - Professor Assistente Doutor, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, gabriel.pedroso@unesp.br

Camyla M Magalhães De Oliveira Cadavez, Coordenadora Técnica, Geo Soluções, São Paulo, Brasil, camyla.oliveira@geosoluçoes.com

Leandro Noronha Ferreira, Engenheiro Civil Trainee, Geo Soluções, São Paulo, Brasil, leandro.noronha@geosolucoes.com

RESUMO: A estabilidade de taludes é um aspecto essencial da engenharia geotécnica, uma vez que rupturas podem ocasionar danos estruturais e impactos ambientais. Este trabalho avaliou a influência do ângulo de atrito interno e da coesão na estabilidade de um talude reforçado com geogrelhas, considerando variações desses parâmetros no aterro compactado e no solo de fundação. O estudo foi desenvolvido em um talude localizado na Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (FEG – UNESP), a partir de dados topográficos e de sondagens SPT. As análises de estabilidade global e as verificações internas e externas da estrutura de contenção foram realizadas em ambiente computacional, conforme os critérios da ABNT NBR 16920-1 (2021). Os resultados indicaram um fator de segurança inferior ao mínimo normativo para o talude natural, evidenciando a necessidade de intervenção. As análises de sensibilidade demonstraram elevada influência dos parâmetros de resistência, especialmente do ângulo de atrito interno. Conclui-se que o uso de solo reforçado com geogrelhas constitui uma solução eficiente e tecnicamente segura, desde que associada à adequada caracterização geotécnica e ao controle de compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Solo reforçado; Geogrelhas; Contenção.

ABSTRACT: Slope stability is a fundamental aspect of geotechnical engineering, as failures can cause structural damage and significant environmental impacts. This study evaluated the influence of the internal friction angle and cohesion on the stability of a geogrid-reinforced slope. Variations in these parameters were considered for both the compacted backfill and the foundation soil. The study was conducted on a slope located at the College of Engineering and Sciences of Guaratinguetá (FEG–UNESP), using topographic survey data and Standard Penetration Test (SPT) results. Global stability analyses, as well as internal and external stability verifications of the reinforced soil structure, were performed using computational tools in accordance with the requirements of ABNT NBR 16920-1 (2021). The results indicated that the natural slope presented a factor of safety below the minimum value required by the standard, demonstrating the need for stabilization measures. The sensitivity analyses showed that soil strength parameters significantly affect slope stability, with the internal friction angle having the greatest influence. The study concludes that geogrid-reinforced soil is an effective and technically reliable stabilization solution, provided that adequate geotechnical characterization and compaction control are ensured.

KEYWORDS: Reinforced soil; Geogrids; Retining structures.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes é um dos fatores principais no âmbito da segurança de obras civis, especialmente em áreas urbanizadas. De maneira geral, todo talude exposto ao intemperismo pode apresentar instabilidade e requer intervenção específica e tecnicamente fundamentada (Gerscovich, 2016). Os geossintéticos começaram a ser amplamente aplicados na engenharia a partir da década de 1950, sendo incorporados no Brasil apenas na década de 1970 (Filho, 2017; Morais, 2021).

As geogrelhas, por sua vez, possuem aplicação principal de reforço do solo. Compostas por uma malha regular de polímeros, estas são aplicadas de modo a aumentar a resistência à tração do maciço, permitindo a interação do material com o solo a partir de suas aberturas, que promovem confinamento lateral e mobilização das tensões (Vertematti, 2015).

De acordo com Morais (2021) o uso das geogrelhas tem se mostrado eficaz na melhoria do desempenho estrutural de taludes instáveis. Estas proporcionam soluções mais leves e ambientalmente sustentáveis quando comparadas a métodos tradicionais. Ainda, Morais (2021) ressalta que a eficácia dessas soluções está condicionada à compreensão de fatores que influenciam a estabilidade do maciço, tais como as características geotécnicas do solo, presença de nível d'água, inclinação do talude, cargas aplicadas ou intervenções construtivas que podem contribuir para processos de instabilização.

Nesse sentido, torna-se imprescindível a interpretação dos casos específicos e a utilização de ferramentas de análise de estabilidade capazes de considerar todas as variáveis de forma integrada. O emprego de ferramentas computacionais tem se consolidado como um importante recurso para a previsão do comportamento de taludes e dimensionamento de reforços (Dos Santos, 2020).

A confiabilidade das análises está intrinsecamente ligada aos parâmetros geotécnicos adotados. Falcão (2019) realizou uma pesquisa acerca da eficiência das contenções reforçadas à frente de carregamentos variáveis e mudanças nos parâmetros do solo, demonstrando a sensibilidade do fator de segurança às alterações dos parâmetros geotécnicos e das condições de carregamento.

No Brasil, os parâmetros geotécnicos são frequentemente obtidos por meio de correlações empíricas baseadas em ensaios SPT, o que implica em incertezas na caracterização do solo, que podem impactar em dimensionamento inadequados de estruturas geotécnicas (Sodré, 2018).

Ainda, a estabilidade de estruturas em solo reforçado está diretamente associada ao controle de compactação do maciço, uma vez que variações desse processo influenciam a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade do solo, afetando o desempenho global da estrutura (Abu-Farsakh *et al.,* 2003; Joppert, 2007). A norma ABNT NBR 16920-1 (2021) ressalta que a eficiência da interação solo-geossintético é essencial para garantir que as forças de tração nos reforços sejam transferidas ao maciço de forma segura, assegurando o comportamento integrado do sistema.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência das variações da coesão e o ângulo de atrito interno na estabilidade de um talude natural de uma contenção em solo reforçado com geogrelhas. Para isso, analisa-se a sensibilidade do fator de segurança frente às alterações dos parâmetros geotécnicos do solo de função e de aterro. Com base nos resultados obtidos propõe-se uma solução de contenção em solo reforçado com faceamento em placas modulares de concreto, em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16920-1 (2021).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão dos métodos abordados, desenvolveu-se o esquema na Figura 1, que demonstra as etapas e sequências para o desenvolvimento da pesquisa.

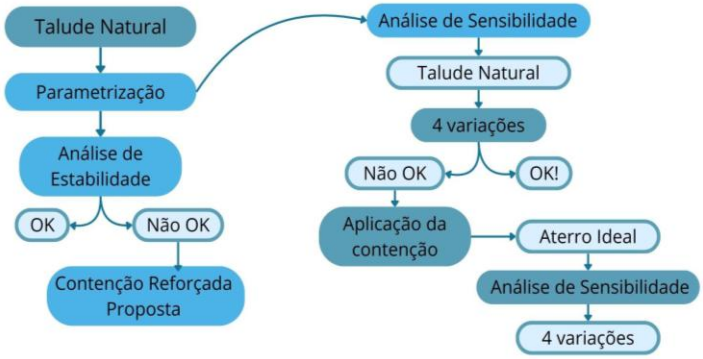


Figura 1: Esquema do fluxo de metodologia da pesquisa.

Inicialmente, adotou-se a condição natural do talude como objetivo de estudo.A geometria foi definida a partir de levantamento topográfico enquanto a caracterização geotécnica foi realizada com base em dados de sondagem à percussão (SPT). Os parâmetros de peso específico, coesão e ângulo de atrito interno foram estimados por meio das correlações empíricas propostas por Joppert (2007).

Na sequência, foi realizada a análise de estabilidade global do talude natural, utilizando como critério de aceitação o fator de segurança mínimo igual a 1,50, conforme a ABNT NBR 11682 (2009). Nos casos em que o talude apresentou condição de instabilidade (FS < 1,50), foi proposta uma solução de contenção em solo reforçado com geogrelhas.

Posteriormente, realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros de resistência do solo, avaliando a influência das variações da coesão e do angulo de atrito interno no fator de segurança do talude. Para os cenários considerados instáveis, a mesma análise foi aplicada à estrutura reforçada, permitindo avaliar a eficiência da solução proposta frente às incertezas associadas à caracterização geotécnica e às condições de compactação do aterro.

A pesquisa, portanto, busca analisar o impacto das variações dos parâmetros resistentes do solo na segurança do talude e verificar a eficácia da contenção adotada frente às incertezas inerentes à caracterização geotécnica.

2.1 Caracterização do local de estudo

O estudo foi desenvolvido com base na caracterização geotécnica de um talude localizado no campus da Faculdade de Engenharia e Ciência de Guaratinguetá (FEG - UNESP), o talude foi formado a partir da escavação do terreno para construção de uma edificação.

Os parâmetros de resistência foram obtidos com base nos resultados de sondagem à percussão (SPT) e estimados a partir das correlações empíricas desenvolvidas por Joppert (2007). A Tabela 1 demonstra os parâmetros que foram estimados.

Tabela 1: Parametrização da sondagem por Joppert (2007).

Muro	Sondagem	Cota	Solo	Espessura	γ[kN/m³]	φ [º]	c [kPa]	NA
1	SP-03	556,581	Argila <5	0-2,97	16	23	15	10,62
			Argila <10	2,97-4,63	17	25	30	
			Argila >10	4,63-6,87	18	25	30	
			Areia	6,87-7,88	19	32	0	
			Areia Argilosa >5	7,88-9	18	28	5	
			Areia Argilosa <5	9-14,95	18	25	0	
			Argila Arenosa	14,95-17,53	19	20	50,0	
			Argila Arenosa >19	17,53-20,45	20	25	65,0	

Em conformidade com a ABNT NBR 1620-1 (2021), as condições de compactação do aterro reforçado influenciam diretamente o desempenho estrutural das obras de contenção. Dessa forma, com o objetivo de

avaliar o comportamento do aterro compactado atuante sobre o muro reforçado, foram analisados cenários representativos de condições ideais e não ideais de compactação.

No cenário de compactação ideal, adotaram-se os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 2, os quais representam condições adequadas de execução do aterro.

Tabela 2: Parâmetros das condições de compactação ideais.

γ[kN/m³]	φ [°]	c [kPa]
18	27	15

A variação dos parâmetros geotécnicos foi adotada com o objetivo de representar as incertezas inerentes à estimativa da resistência do solo obtida por correlações empíricas a partir de ensaios de SPT. Como valores de coesão e ângulo de atrito podem apresentar dispersão em função da heterogeneidade natural do maciço e das limitações dos métodos indiretos de obtenção desses parâmetros, realizou-se uma análise de sensibilidade baseada no Método de Redução de Resistência (Strength Reduction Method – SRM), no qual um dos parâmetros é mantido constante enquanto o outro é progressivamente reduzido, conforme a abordagem proposta por Zienkiewicz e Chang (1975). As Equações 1 e 2 apresentam a formulação adotada para a aplicação do método.

$$C'_r = C' \pm \frac{C\prime}{FS} \quad (1)$$

$$tan\varphi'_r = tan\varphi' \pm \frac{tan\varphi'}{FS} \quad (2)$$

Onde:

C'_r: Coesão efetiva reduzida do solo (Kpa);
C': Coesão efetiva do solo (Kpa);
φ'_r: Ângulo de atrito interno efetivo reduzido do solo (°);
φ': Ângulo de atrito interno efetivo do solo (°);
FS: fator de segurança (adotado o mínimo de 1,50 para todos os casos).

2.2 Muros de contenção

Consoante com a norma ABNT NBR 11682 (2009) o fator de segurança global considerado para o talude natural foi de 1,50. Por sua vez, para a proposição a contenção reforçada, foi utilizada todas as verificações exigidas pela norma ABNT NBR 16920-1 (2021). A solução em solo reforçado com geogrelhas foi selecionada por apresentar elevada aplicabilidade em obras de estabilização de taludes, além de proporcionar flexibilidade estrutural, facilidade executiva e menor impacto ambiental.

Para a contenção proposta foi utilizada uma solução de placas modulares de concreto com contraforte, o sistema atua como um muro segmentado, em que a interação entre o solo e os elementos constituintes (placa de concreto, contraforte e geogrelhas) são responsáveis pela estabilidade da estrutura. O sistema permite espaçamentos verticais de reforço de 40cm. A Figura 2 apresenta as medidas padrão de cada peça do painel, bem como o contraforte.

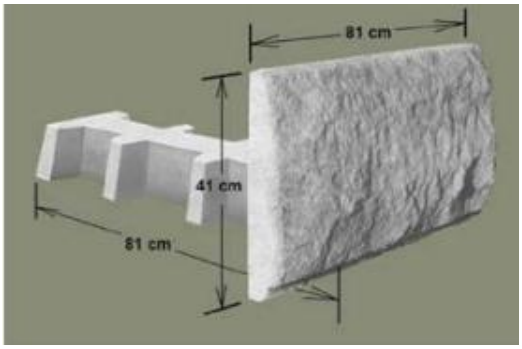


Figura 2: Peça de fechamento da contenção.

Assim, a estrutura reforçada foi proposta contendo 17 camadas de reforço e peças de face, na seção crítica. Além disso, são propostas geogrelhas com resistência de 50 kN/m ao longo da seção e 2 geogrelhas de 100 kN/m no pé da estrutura.

2.3 Ferramentas computacionais

As análises de estabilidade do talude natural e da estrutura de contenção foram realizadas por meio de dois softwares, selecionados de acordo com o tipo de verificação. A estabilidade global foi avaliada utilizando o software Slide (Rocscience), com base no método do equilíbrio limite, considerando diferentes superfícies de ruptura, condições de carregamento e reforços.

As verificações de estabilidade interna e externa do maciço reforçado foram realizadas com o plugin GeoQore (GeoSoluções), integrado AutoCAD (AutoDesk), permitindo a análise de estabilidade quanto a deslizamento, tombamento, capacidade de carga, arrancamento e ruptura dos reforços, conforme exige a ABNT NBR 16920-1 (2021).

Dessa forma, foi possível avaliar a estabilidade do talude natural e o desempenho da contenção em solo reforçado. As análises de sensibilidade permitiram investigar a influência das incertezas geotécnicas no comportamento das estruturas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Talude Natural

O fator de segurança do terreno natural, com os parâmetros de solo obtidos diretamente na sondagem está demonstrado pela Figura 3.

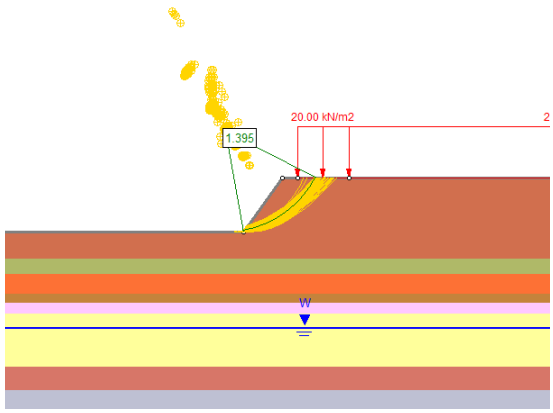


Figura 3: Fator de segurança global do terreno natural.

Observa-se que este não está em conformidade com a norma ABNT NBR 11682 (2009), uma vez que FS<1,50. Fica explicita a necessidade de uma intervenção para a adequação do maciço.

3.1.1 Estrutura proposta

Consoante com a instabilidade do talude demonstrada pela Figura 3, nota-se a necessidade da aplicação de uma estrutura no local. Verifica-se pela Figura 4, que a estabilidade global da estrutura está nos requisitos da norma.

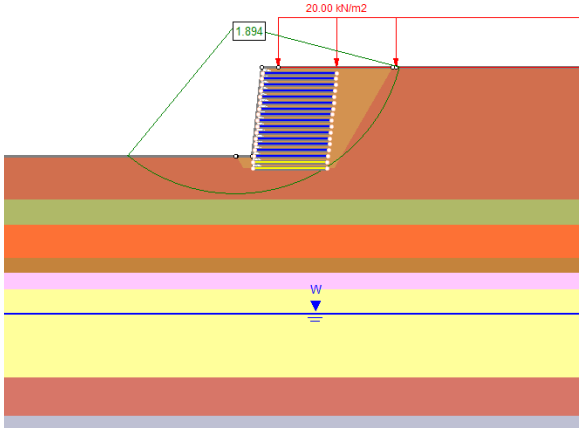


Figura 4: Estabilidade global da contenção proposta.

Ainda, a Tabela 3 demonstra que todos os resultados obtidos estão em conformidade com a norma ABNT NBR 16920-1 (2021).

Tabela 3: Resultados obtidos na estrutura reforçada proposta.

Verificação	FS exigido pela norma	FS obtido	Situação
Deslizamento	1,5	5,88	Ok
Tensão admissível no solo de fundação	2	5,08	Ok
Tombamento	2	12,39	Ok
Arrancamento do reforço	1,5	10,98	Ok
Rasgamento do reforço	1,5	1,5	Ok
Global	1,5	1,894	Ok

3.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros de fundação

A análise de sensibilidade dos parâmetros de fundação do terreno natural demonstrou instabilidades associadas tanto à redução do ângulo de atrito interno, quanto à redução da coesão. As Figuras Figura *5* e 7 demonstram os resultados obtidos pelo software, respectivamente.

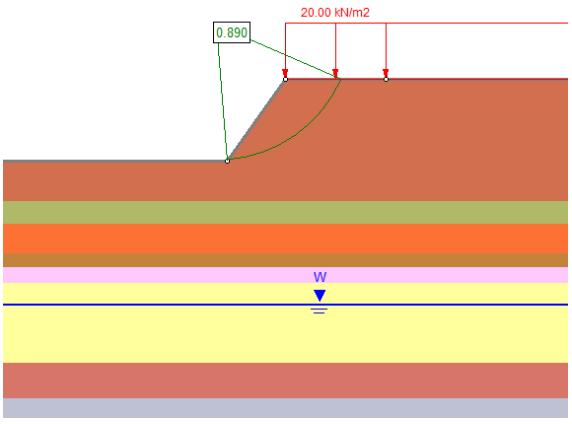


Figura 5: Redução do atrito interno.

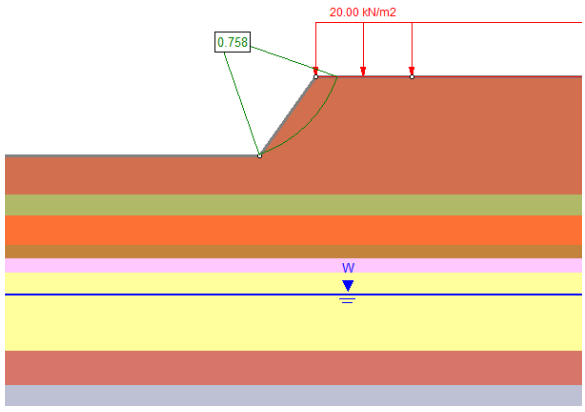


Figura 6: Redução da coesão.

Sendo assim, para ambos os casos foram aplicados o muro reforçado, utilizando os parâmetros reduzidos na fundação. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise de sensibilidade nos parâmetros de fundação.

Variação	Verificação	FS exigido pela norma	FS obtido	Situação
Coesão (-)	Deslizamento	1,5	2,09	Ok

	Tensão admissível no solo de fundação	2	3,03	Ok
	Tombamento	2	5,22	Ok
	Arrancamento do reforço	1,5	10,98	Ok
	Rasgamento do reforço	1,5	1,5	Ok
	Global	1,5	1,465	Não Ok
Atrito (-)	Deslizamento	1,5	1,11	Não Ok
	Tensão admissível no solo de fundação	2	1,06	Não Ok
	Tombamento	2	4,76	Ok
	Arrancamento do reforço	1,5	10,98	Ok
	Rasgamento do reforço	1,5	1,5	Ok
	Global	1,5	1,065	Não Ok

Observa-se que o ângulo de atrito possui maior sensibilidade frente aos fatores de segurança avaliados. Isso pode ser atribuído ao fato de que a resistência ao cisalhamento dos solos de fundação é dependente de grande parcela do atrito interno. Dessa forma, a redução deste parâmetro provoca diminuição da resistência mobilizada ao longo das superfícies potenciais de ruptura, comprometendo não apenas a estabilidade global, mas também a capacidade de suporte da fundação. Em contrapartida, a redução da coesão produz um efeito menos expressivo, uma vez que a contribuição do atrito permanece disponível para resistir aos esforços atuantes.

3.3 Análise das condições de compactação não ideais.

O maciço reforçado com as condições de compactação alteradas, por sua vez, tem os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Análise dos parâmetros não ideias de compactação.

Variação	Verificação	FS exigido pela norma	FS obtido	Situação
Coesão (-)	Deslizamento	1,5	5,88	Ok
	Tensão admissível no solo de fundação	2	5,08	Ok
	Tombamento	2	12,39	Ok
	Arrancamento do reforço	1,5	10,98	Ok
	Rasgamento do reforço	1,5	1,5	Ok
	Global	1,5	1,64	Ok
Atrito (-)	Deslizamento	1,5	5,88	Ok
	Tensão admissível no solo de fundação	2	5,08	Ok
	Tombamento	2	12,39	Ok
	Arrancamento do reforço	1,5	0,26	Não Ok
	Rasgamento do reforço	1,5	0,75	Não Ok
	Global	1,5	1,243	Não Ok

Os resultados obtidos evidenciam a importância do controle tecnológico da compactação durante execução do aterro reforçado. A redução do atrito interno, associado as condições inadequadas de compactação, resultou em fatores de segurança inferiores aos exigidos pela norma e comprometeu os mecanismos de interação solo-geogrelha. Isso demonstra que falha executivas podem reduzir de forma significativa o desempenho da contenção, mesmo com o dimensionamento de reforço adequado.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve objetivo avaliar a estabilidade de um talude natural e a eficiência de uma solução de contenção em solo reforçado com geogrelhas, considerando a influência dos parâmetros geotécnicos do solo e

das condições de compactação do aterro. A análise do talude natural indicou um fator de segurança inferior ao mínimo recomendado pela ABNT NBR 11682 (2009), evidenciando a necessidade de intervenção estrutural.

A solução de contenção proposta demonstrou desempenho satisfatório nas verificações de estabilidade global, interna e externa, atendendo aos mínimos exigidos pela ABNT NBR 16920-1 (2021). Entretanto, as análises de sensibilidade dos parâmetros de fundação demonstraram que a redução do ângulo de atrito interno pode comprometer de maneira significativa a estabilidade da estrutura, tanto na verificação global quanto nas verificações internas do sistema.

Os resultados obtidos também evidenciam que a compactação do aterro desempenha um papel fundamental no comportamento do maciço. Enquanto a redução da coesão apresentou pouco ou nenhum impacto nas verificações, a redução do atrito resultou em falhas críticas nos mecanismos de arrancamento e ruptura dos reforços, confirmando a predominância do atrito interno na interação solo-geogrelha.

Assim sendo, o estudo reforça a importância de uma caracterização e interpretação geotécnica criteriosa, bem como do controle rigoroso do processo de compactação do maciço. Conclui-se que o emprego de geogrelha constitui uma alternativa tecnicamente viável e segura para problemas de estabilidade de taludes, desde que associada às práticas geotécnicas adequadas. Ainda, para estudo futuros, sugere-se a realização de ensaios laboratoriais para melhor avaliação do solo local, bem como avaliação de diferentes configurações de reforço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Geo Soluções pela oportunidade da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-FARSAKH, M.; CORONEL, J.; TAO, M. Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil–geosynthetic interactions using large direct shear tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 19, n. 7, p. 540–549, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16920-1: muros e taludes em solos reforçados – parte 1: solos reforçados em aterros. Rio de Janeiro, 2021.

DOS SANTOS, D. R. Comparativo de metodologias de dimensionamento de estruturas reforçadas com geossintéticos em talude: análise determinística e probabilística. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2020.

FALCÃO, H. B. de A. Aplicação de geossintéticos como proposta de solução na estabilização de talude em João Pessoa/PB. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019.

FILHO, L. F. dos S. Análise da estabilização de taludes com a utilização de geogrelhas. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2017.

GERSCOVICH, D. M. S. G. Estabilidade de taludes. 2. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2016.

JOPPERT, J. Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução. São Paulo: Pini, 2007.

MORAIS, E. Projeto de contenções em solos reforçados com blocos segmentais: estudo de caso. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2021.

SODRÉ, J. L. Análise das correlações entre o ensaio de SPT e os parâmetros resistentes do solo por meio de um caso de estudo. Palmas: Centro Universitário Luterano de Palmas, 2018.

VERTEMATTI, J. C. Manual brasileiro de geossintéticos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CHANG, C. T. Strength reduction method in stability problems. *Géotechnique*, v. 25, n. 3, p. 537–552, 1975.