

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Influência do Tipo de Solo no Dimensionamento do Comprimento de Reforço de Muro de Contenção para as Encostas da Região Metropolitana do Recife - PE

Martha Maria Bezerra Santos

Mestranda em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Brasil, martha.bezerra@ufpe.br

Ialysson da Silva Medeiros

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, Caruaru, Brasil, ialysson.medeiros@ufpe.br

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Professora Doutora em Engenharia Civil, UFPE, Caruaru, Brasil, isabelamcvbello@hotmail.com

RESUMO: A região metropolitana de Recife – PE apresenta pontos de instabilidade em seus morros e encostas. Para evitar os danos oriundos dessa situação, uma das técnicas utilizadas é o muro de solo reforçado com geossintético. Como essa técnica depende do tipo de solo, buscou-se analisar a variação no dimensionamento do comprimento de reforço do muro de acordo com a mudança do tipo de solo. Para isso, foi feita uma revisão de literatura para se obter os dados de ângulo de atrito e coesão das encostas da região, e com as dimensões e sobrecargas de um talude estudado por Gomes *et al.* (2021), dimensionou-se o comprimento de reforço. Dessa forma, os dados do solo foram obtidos do trabalho de Bandeira (2010) e pelos comprimentos de reforço resultantes percebeu-se que a variação da coesão influencia diretamente no comprimento final, porém não de forma constante. O ângulo de atrito, por outro lado, a medida que diminui provoca um aumento no comprimento de reforço de forma constante, de forma que foi possível a realização de uma regressão linear, obtendo-se, para este caso, um ângulo de atrito ideal de $32,54^\circ$, que resultaria num comprimento de reforço de 3,14 m.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Estabilidade; Ângulo de Atrito; Coesão; Reforço; Contenção;

ABSTRACT: The metropolitan region of Recife - PE presents points of instability in its hills and slopes. To avoid the damage resulting from this situation, one of the techniques used is the geosynthetic reinforced soil wall. As this technique depends on the type of soil, we sought to analyze the variation in the dimensioning of the reinforcement length of the wall according to the change of the soil type. For this, a literature review was made to obtain the data of friction angle and cohesion of the slopes of the region, and with the dimensions and overloads of a slope studied by Gomes *et al.* (2021), the reinforcement length was sized. Thus, soil data were obtained from Bandeira's (2010) work and by the resulting reinforcement lengths, it was noticed that the variation of cohesion directly influences the final length, but not in a constant way. The friction angle, on the other hand, the decreasing measure causes an increase in the reinforcement length in a constant way, so that it was possible to perform a linear regression, obtaining, for this case, an ideal friction angle of 32.54° , which would result in a reinforcement length of 3.14 m.

KEYWORDS: Stability Analysis; Friction angle; Cohesion; Reinforcement; Containment;

1 Introdução

A população brasileira, frequentemente, é afetada pelos movimentos de massa em encostas, seja por perda de vidas humanas ou por perda de seus patrimônios. A região metropolitana do Recife está entre essas regiões com diversos pontos de instabilidade e que apresentam casos constantes de deslizamentos.



De forma geral, a maioria da população da metrópole de Recife que habita tais locais de instabilidade, são pessoas menos favorecidas da sociedade. Isso está relacionado também com a exclusão social, que nega o espaço urbano à população de baixa renda (SANTANA, 2019). O autor ressalta também que esse movimento da comunidade mais vulnerável para os morros e encostas ainda ocorre insistentemente.

Assim, de forma a evitar os danos oriundos dessa situação, a estabilização desses taludes se torna cada vez mais necessária e recorrente. Dentre as técnicas de estabilização disponíveis uma delas é o muro reforçado com geossintético, que alia o uso do solo local com a execução de taludes mais íngremes e a facilidade de execução em locais de difícil acesso (GERSCOVICH, 2010).

Segundo Ruiz *et al.* (2018) *apud* Rocha e Massimino (2019), a diferença entre um muro de contenção tradicional e um muro reforçado com geossintético pode ser vista na Figura 1.

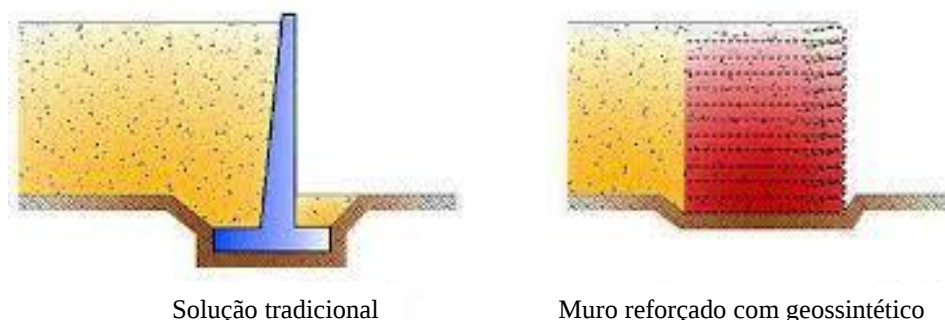


Figura 1. Muro tradicional e Muro Reforçado com Geossintético. Fonte: Ruiz *et al.* (2018) *apud* Rocha e Massimino (2019).

Como um estudo de caso, Gomes *et al.* (2021) dimensionaram um muro de solo reforçado com geossintético para uma encosta no bairro Jordão de Recife – PE. Os autores apresentam o projeto e método de dimensionamento desses comprimentos de reforços, verificando os critérios de análise de estabilidade interna e externa, de forma que o reforço atendesse ao deslizamento, tombamento e compressão. O detalhamento dos reforços finais foram da forma ilustrada pela Figura 2.

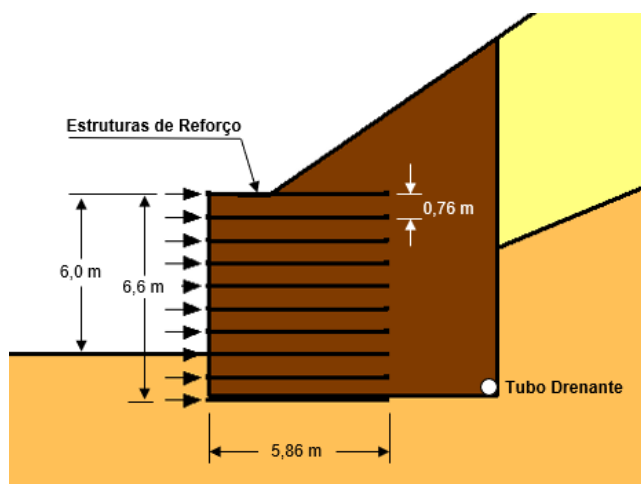


Figura 2. Arranjo dos reforços no dimensionamento do muro. Fonte: Gomes *et al.* (2021).

Rocha e Massimino (2019) apontam também a viabilidade de utilização dessa mesma técnica em encontros de pontes e viadutos. Devido a essas diferentes aplicabilidades do reforço com geossintético na construção civil, surge a necessidade do estudo sobre a influência do tipo de solo no dimensionamento dessa estrutura.



Desse modo, o presente trabalho busca analisar como a variação do tipo de solo influencia no dimensionamento do comprimento de reforço de um muro de contenção reforçado com geossintético nas cidades de Recife – PE, por meio dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Através disso, procura-se identificar qual deles correlacionam melhor o tipo de solo com o comprimento do reforço a ser adotado. Também existe a intenção de investigar a possibilidade de uma estimativa do comprimento de reforço com base apenas nesses parâmetros do solo.

2 Metodologia

Inicialmente foi feita uma revisão de literatura no intuito de se obter os dados de coesão e ângulo de atrito para diferentes solos em encostas da região metropolitana de Recife-PE, buscando autores que tivessem realizados ensaios semelhantes, a fim de evitar a variação dos dados devido ao método utilizado.

As dimensões e sobrecargas do muro deste trabalho foram as mesmas utilizadas por Gomes *et al.* (2021), no projeto de um muro reforçado com geossintético em um talude no bairro Jordão, Recife – PE. As dimensões e sobrecarga da encosta são apresentados na Figura 3.

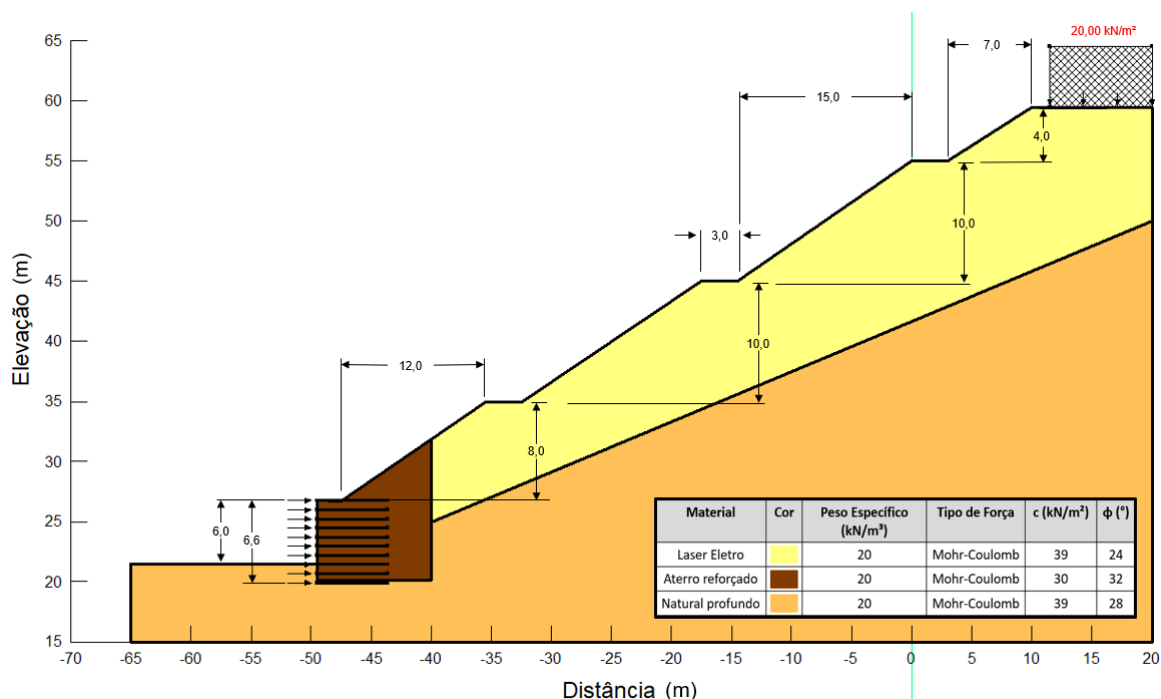


Figura 3. Seção transversal estaca 4 + 5 m analisada com geometria, materiais e reforço. Fonte: Gomes *et al.* (2021)

Por meio dessas informações, foram calculados o comprimento de reforço utilizando as teorias clássicas do equilíbrio limite, nas quais se verifica o deslizamento, o tombamento e a capacidade de carga na base do muro, sendo que a mudança principal ocorre na coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo. As equações utilizadas se encontram no Quadro 1.

Por fim, para se realizar a análise, correlacionou-se os comprimentos de reforço obtidos ao ângulo de atrito e à coesão dos diferentes tipos de solo por meio de gráficos de dispersão, através do *software* Excel.



Quadro 1. Equações utilizadas para o dimensionamento do comprimento de reforço.

Verificação		Equações	Simbologia
Estabilidade Externa	Fator de segurança ao deslizamento	$FS_d = \frac{(\gamma \times H + q) \times L_r \times \tan \phi}{E} \geq 1,5$	γ = peso específico do solo; H = altura do muro em análise; ϕ = ângulo de atrito; q = sobrecarga uniformemente distribuída; L_r = comprimento do reforço; E = empuxo ativo; k_a = coeficiente de empuxo de terras no estado ativo; FS_d = fator de segurança contra o deslizamento ao longo da base do muro ($\geq 1,5$); γ_1 = peso específico do solo reforçado; ϕ_1 = ângulo de atrito entre a base do maciço reforçado e o solo de fundação
		$E = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2 \times k_a$	
		$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$	
		$L_r = \frac{FS_d \times E}{(\gamma_1 H + q) \times \tan \phi_1}$	
	Fator de segurança ao tombamento	$FS_t = \frac{(\gamma_1 H + q) \times (L_r)^2}{2 E \times y_E} \geq 2,0$	FS_t = fator de segurança contra o tombamento; L_r = comprimento de reforço ou largura da base da massa de solo reforçado; y_E = braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura.
		$L_r = \sqrt{\frac{2 FS_t \times E \times y_E}{(\gamma_1 H + q)}}$	
	Verificação das tensões na base do talude	$e = \frac{k_a \times H^2}{6 \times L_r} \leq \frac{L_r}{6}$	L_r = comprimento de reforço, que deve manter a base totalmente comprimida
		$L_r \leq \sqrt{k_a} \times H$	
	Capacidade de carga do solo de fundação	$q_{\max} = c' N_c + q_s N_q + 0,5 \gamma_f B' N_\gamma$	$q_{\max}$ = capacidade de carga do solo de fundação; c' = coesão do solo de fundação; q_s = sobrecarga no nível da base da estrutura; γ_f = peso específico do solo de fundação; B' = menor dimensão horizontal da sapata; N_c , N_q e N_γ são os fatores de capacidade de carga
		$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$	
		$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$	
		$N_\gamma = 1,80 (N_q - 1) \tan \phi$	
	Distribuição uniforme das tensões normais na base do muro	$\sigma = \frac{3 (\gamma_1 H + q)}{3 - k_a \left(\frac{\gamma_2 H + 3q}{\gamma_{2H+q}} \right) \times \left(\frac{H}{L_r} \right)^2}$	
	Fator de segurança para ruptura do solo de fundação	$FS_f = \frac{q_{\max}}{\sigma} \geq 3,0$	
	Ruptura global do maciço	$FS_g = \frac{\sum M_R}{\sum M_s}$	$\sum M_R$ = somatório dos momentos dos esforços de resistência em relação ao centro de rotação; $\sum M_s$ = somatório dos momentos dos esforços solicitantes em relação ao centro de rotação.
Estabilidade Interna	Ângulo de atrito	$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi'}{f_\phi} \right)$	f_ϕ = fator de redução; ϕ' = ângulo de atrito do solo.
	Comprimento mínimo	$L_r = 0,8 \times H$	
		$L_r = 0,6 \times H$	
	Coeficiente de Empuxo	$L_b = \left(\frac{T_d}{2 \times H \times \gamma} \right) \left(\frac{1}{1 - R_u} \right) \left(\frac{1}{F_b \times \tan \phi'} \right)$	F_b = coeficiente de interação solo-reforço; R_u = parâmetro de poropressão
		$K_d = \frac{k_{req}}{1 - \frac{L_b}{L_r}}$	
	Dimensionamento das geogrelhas	$S_u = \frac{T_d}{K_d \times H \times \gamma}$	S_u = espaçamento entre as geogrelhas; T_d = resistência da geogrelha a tração.

Fonte: Autores (2021).



3 Resultados e Discussões

3.1 Parâmetros geotécnicos de diferentes solos das encostas na região metropolitana de Recife

Por meio de uma revisão bibliográfica, encontrou-se o estudo de Bandeira (2010), no qual a autora obteve parâmetros técnicos para o gerenciamento de áreas de risco da região metropolitana do Recife – PE. Ao total foram oito locais estudados, compreendendo os municípios de Camaragibe, Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Foi decidido utilizar apenas os dados provenientes desse trabalho, já que a autora realizou o mesmo procedimento para todos os 8 (oito) tipos de solo de diferentes encostas da região próxima à Recife – PE, de forma que não deverá haver variações devido ao método de ensaio utilizado. Dessa forma a Tabela 1 contém os dados utilizados da autora, enquanto o Quadro 2 traz a definição da identificação dos solos analisados.

Tabela 1. Ângulo de atrito e coesão de diferentes tipos de solo.

	Solo	Local	Classe	Condição do corpo de prova	c' (kPa)	ϕ
Formação de barreiras	Canal Fluvial estrelação	Recife	SC	Inundação	10,2	28,6
			SC	Inundação	15	30,4
	Leque Distal / Planície Aluvial	Camaragibe	SM	Inundação	4,5	32,3
			CL	Inundação	4,4	28,2
			CL	Inundação	10,5	26,8
			MH	Inundação	14,4	28,8
	Leque Aluvial Proximal	Camaragibe	SC	Inundação	0	35
	Leque Aluvial Mediano / Proximal	Jaboatão	CL	Inundação	13,7	29,7

Fonte: Adaptado de Bandeira (2010).

Quadro 2. Classificação dos solos identificados.

Classificação	Definição	Detalhamento
SC	AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila
SM	AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte
CL	Argila inorgânica de baixa compressibilidade	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras
MH	Silte inorgânico de alta compressibilidade	Siltos inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltos elásticos

Fonte: Adaptado de Bandeira (2010).

3.2 Comprimentos de reforços obtidos para cada tipo de solo

De posse dos dados de coesão e ângulo de atrito para diferentes solos, foi calculado o comprimento de reforço que atendesse ao deslocamento e ao tombamento do muro e também o espaçamento entre os reforços, de acordo com as equações do Quadro 1. Esses resultados se encontram na Tabela 2.



Tabela 2. Comprimento de reforço e respectivos espaçamentos de acordo com o tipo de solo.

	Solo	Local	Lr/Desl (m)	Lr/Tomb (m)	e (m)
Formação de barreiras	Canal Fluvial estrelação	Recife	4,243	3,394	0,722
			3,668	3,273	0,707
			3,150	3,149	0,691
	Leque Distal / Planície Aluvial	Camaragibe	4,384	3,421	0,725
			4,917	3,516	0,735
			4,175	3,380	0,720
	Leque Aluvial Proximal	Camaragibe	2,540	2,975	0,664
	Leque Aluvial Mediano / Proximal	Jaboatão	3,882	3,320	0,713

Fonte: Autores (2021).

Para uma melhor visualização, os pontos foram plotados em dois gráficos, representados na Figura 4 e na Figura 5, onde é possível analisar a influência da coesão e do ângulo de atrito, respectivamente. Sendo os pontos pretos correspondentes ao Lr/Tomb e os vermelhos aos Lr/Desl

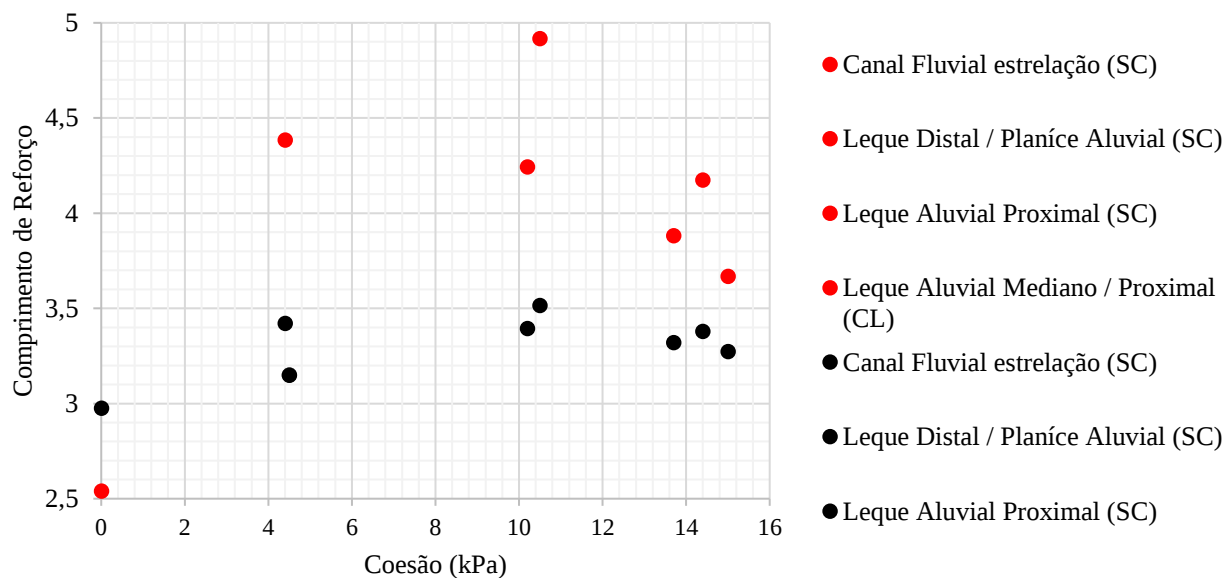


Figura 4. Relação entre coesão e o comprimento de reforço. Fonte: Autores (2021).

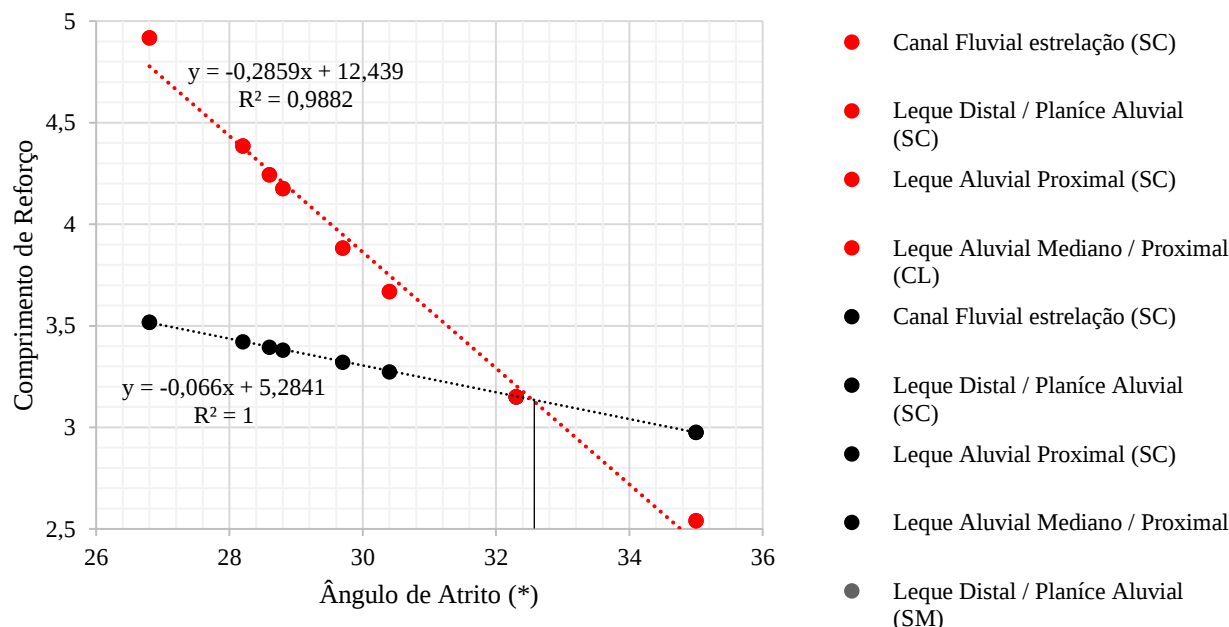


Figura 5. Relação entre ângulo de atrito e comprimento de reforço. Fonte: Autores (2021).

Analisando as correlações obtidas, nota-se que a variação da coesão influencia diretamente no comprimento final, porém isso não ocorre de forma constante. O ângulo de atrito por sua vez, permite uma melhor visualização dessa correlação, onde o aumento do ângulo de atrito do solo resulta em uma diminuição no comprimento de reforço de uma forma regular.

Essa constância permitiu que fosse realizado uma regressão linear, como pode ser vista também na Figura 5. Com isso, obteve-se as equações das retas geradas, e notou-se que elas se cruzam em um determinado ponto. É neste ponto que se obteria o maior aproveitamento do reforço, pois este estaria funcionando perto de sua capacidade máxima tanto na condição de tombamento quanto na condição de deslizamento. Para este caso em análise, esse ângulo de atrito ideal do solo seria de 32,54°, resultando em um comprimento de reforço de 3,14 m.

4 Considerações Finais

Os solos reforçado com geossintético possuem uma boa aplicabilidade, principalmente em estruturas de contenção de taludes instáveis. Como é um tipo de técnica que além do geossintético, depende também do tipo de solo utilizado, se faz importante analisar como as mudanças nesse material influencia no dimensionamento desse reforço.

Dessa forma, analisando principalmente a mudança de ângulo de atrito e coesão do solo, conclui-se que dentre os dois, o ângulo de atrito permite uma melhor visualização da relação entre o tipo de solo e o comprimento de reforço do que a coesão.

Analisando o comprimento de reforço versus coesão percebeu-se que, ao se variar a coesão, o comprimento de reforço também se altera, porém não de forma linear como foi percebido na relação entre comprimento de reforço e ângulo de atrito, o que possibilitou até mesmo a regressão linear dos dados. Pelas equações obtidas, o ângulo de atrito ideal é 32,54° para atender às verificações que determinam o comprimento de reforço, aproveitando ao máximo o geossintético utilizado. Nesse estudo, o comprimento de reforço correspondente a esse ângulo é de 3,14 m.

Por fim, a relação entre coesão e comprimento de reforço pode ainda ser estudada, de forma que há a possibilidade de que, com uma maior quantidade de dados, seja possível traçar uma maior relação entre os dois.

AGRADECIMENTOS

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ambos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) campus Caruaru e Recife.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ananias, E. J., Teixeira, A. M., Duran, J. da S. (2013) O uso crescente de solos reforçados em áreas urbanas: uma ênfase aos 20 anos da solução Terramesh no Brasil. *Unoeste Journal*, p. 121-131.
- Bendeira, A. P. N. (2010) *Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco / UFPE, 369 p.
- Gerscovich, D. M. S., (2010) *Estruturas de Contenção: Muros de Arrimo*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 48 p.
- Gomes, E. D. G., Gomes, F. de S., Bello, M. I. M. da C. V., Medeiros, I. da S., Santos, M. M. B., Ferreira, S. R. de M. (2021) Dimensionamento de uma estrutura de contenção em muro reforçado com geossintético. *Research, Society and Development*, e14210817217.
- Rocha, B. F. de M., Massimino, B. de M. (2019) Solos reforçados com geossintéticos: obras de contenções de aterros de pontes e viadutos. *Unoeste Journal*, p. 121-131.
- Santana, J. K. R. de, (2019) Análise Evolutiva da Ocupação dos Morros da Cidade do Recife. In: Simpósio Nacional de Geografia Urbana- XVI simpurb, Espírito Santo. *Anais do XVI SIMPURB*. v. 1, p. 3754-3768.