

Análise de Estabilidade de Falésias da Praia do Madeiro – Município de Tibau do Sul/RN

Gustavo Clementino Santos

Mestrando Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, gustavo.clementino@aluno.unb.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior

Professor Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil, olavo.santos@ufrn.br

Roberto Quental Coutinho

Professor Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, roberto.coutinho@ufpe.br

Ricardo Nascimento Flores Severo

Professor Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil, ricardo.severo@ifrn.edu.br

Osvaldo de Freitas Neto

Professor Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil, osvaldo.neto@ufrn.br

RESUMO: A linha costeira do estado do Rio Grande do Norte tem aproximadamente 400 km de extensão e é constituída principalmente por praias arenosas, dunas e falésias ativas constituída por solos da Formação Barreiras (FB); essas falésias afloram em diversos municípios do estado. Um dos municípios que tem uma extensa orla (em torno de 16 km) com estes afloramentos sob a forma de falésias é Tibau do Sul/RN. A beleza paisagística dessa região representa um atrativo para a ocupação das bordas das falésias, a qual está relacionada principalmente a residências e empreendimentos turísticos. Esse processo acelerado e muitas vezes desordenado de urbanização, pode aumentar os riscos geológico-geotécnicos de ocorrência de movimentos de massa, devido a sobrecargas, remoção da vegetação e aumento da erosão superficial. O objetivo deste estudo é avaliar a estabilidade de falésias da Praia do Madeiro, visando a mitigação e prevenção de desastres devido a ocorrência de deslizamentos de terra. As falésias da área de estudo possuem aproximadamente 20 metros de altura, inclinação média de 60 graus, são formadas por sedimentos da Formação Barreiras e têm seu topo ocupado por empreendimentos turísticos. Foram realizados ensaios de simples reconhecimento do tipo SPT, ensaios de caracterização dos solos que compõem as três camadas das falésias e ensaios de cisalhamento direto para obter as propriedades geotécnicas desses materiais obtidas a partir de amostras do tipo blocos indeformados. As análises de estabilidade, foram realizadas por ferramenta computacional, utilizado o software “Slope/W” desenvolvido pela GeoStudio. As análises foram realizadas em três seções transversais representativas das falésias obtidas a partir do levantamento topográfico da área de estudo, considerando duas situações, uma na situação com os solos saturados e outra na situação com os solos não saturados. Concluiu-se a partir das análises de estabilidade que na condição não saturada os Fatores de Segurança resultaram acima do mínimo recomendado pela NBR 11.682: Estabilidade de Encostas. Entretanto, na condição saturada, os Fatores de Segurança resultaram em valores abaixo de 1,3.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Estabilidade de Falésias Urbanas; Propriedades Geotécnicas; Formação Barreiras (FB).

ABSTRACT: The coastline of the state of Rio Grande do Norte is approximately 400 km long and is composed mainly of sandy beaches, dunes, and active cliffs formed by soils of the Barreiras Formation (BF); these cliffs outcrop in several municipalities of the state. One of the municipalities with an extensive shoreline (approximately 16 km) featuring these outcrops in the form of cliffs is Tibau do Sul/RN. The scenic beauty of this region represents an attraction for the occupation of the cliff edges, which is primarily associated with residential and tourist developments. This accelerated and often unregulated urbanization process can increase geological and geotechnical risks of mass movement occurrences due to overloads, vegetation removal, and increased surface erosion. The objective of this study is to assess the stability of the cliffs at Madeiro Beach,



aiming at the mitigation and prevention of disasters caused by landslides. The cliffs in the study area are approximately 20 meters high, with an average slope of 60 degrees, composed of sediments from the Barreiras Formation, and have their tops occupied by tourist developments. Standard Penetration Tests (SPT), soil characterization tests for the three layers composing the cliffs, and direct shear tests were performed to obtain the geotechnical properties of these materials, using block-type undisturbed samples. Stability analyses were conducted using computational tools, specifically the “Slope/W” software developed by GeoStudio. The analyses were carried out on three representative cross-sections of the cliffs, obtained from the topographic survey of the study area, considering two scenarios: one with saturated soils and another with unsaturated soils. Based on the stability analyses, it was concluded that under unsaturated conditions, the Safety Factors were above the minimum recommended by NBR 11.682: Slope Stability. However, under saturated conditions, the Safety Factors yielded values below 1.3.

KEYWORDS: Stability Analysis of Urban Cliffs; Geotechnical Properties; Barreiras Formation (BF).

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma das regiões mais dinâmicas do planeta. Sua posição e forma são modificadas por uma série de fatores, como as variações do nível do mar, que ocorrem em velocidades variadas através dos tempos, até eventos diários, como as precipitações pluviométricas.

Nesta zona costuma ocorrer grande quantidade de intervenções humanas. A ocupação antrópica potencializa o problema de movimentações gravitacionais de massa, pois se fixando na zona costeira as populações se colocam na trajetória de recuo natural desta. Os fenômenos que causam alterações na zona costeira estão sobrepostos em ciclos de diferentes escalas temporais. No entanto, as escalas de tempo mais curtas são as mais relevantes quando se trata de sua ocupação.

Respeitar as limitações ambientais é o mais importante ao se observar que a zona costeira é uma região extremamente frágil submetida a um equilíbrio dinâmico ténue entre os processos que nela atuam. Quebrar esse equilíbrio resultará em sérios impactos ambientais como vem ocorrendo em várias partes do mundo.

Um dos mais importantes impactos observados nessas regiões é o recuo da linha de costa sobre as áreas ocupadas no continente. Neste contexto, o litoral do Rio Grande do Norte vem passando por um processo de ocupação acelerado e desordenado, intensificado a partir da década de 80 através da expansão urbana, do turismo e das habitações para veraneio. A área de interesse deste trabalho está localizada no litoral leste do RN. Essa área foi escolhida devido a sua diversidade morfológica e à intensa pressão de uso e ocupação do solo.

Ao longo do tempo foram feitos vários estudos sobre a ocorrência de movimentação gravitacional de massa e problemas de erosão costeira em alguns trechos do litoral oriental do RN conforme se observa nos trabalhos de Severo (2005 e 2007) e Santos Jr et al. (2008, 2014 e 2015).

Movimentos gravitacionais e os transportes de massa estão intimamente relacionados às características geométricas, geológicas e geotécnicas de taludes naturais. O objetivo deste trabalho foi analisar a estabilidade das falésias da Praia do Madeiro, no município de Tibau do Sul – RN, visando a mitigação e prevenção de desastres devido a ocorrência de deslizamentos de terra.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área estudada é a Praia do Madeiro, situada na “Baía do Madeiro”, localizada no município de Tibau do Sul/RN, aproximadamente 60 km ao sul de Natal/RN (Figura 1). A Baía do Madeiro possui uma extensão de aproximadamente 1800 metros de uma extremidade a outra, já a praia possui em torno de 700 metros de extensão, como é mostrado na Figura 2.

A área é caracterizada por falésias de aproximadamente 20 metros de altura, com uma inclinação média de 60° com a horizontal, além de serem cobertas em praticamente toda área por uma vegetação bastante densa (muitas árvores e arbustos), conforme é mostrado na Figura 3. O material consiste em sedimentos da Formação Barreira na maioria da sua extensão (Figura 4) e em alguns locais observa-se a presença de depósitos coluviais (Figura 5).

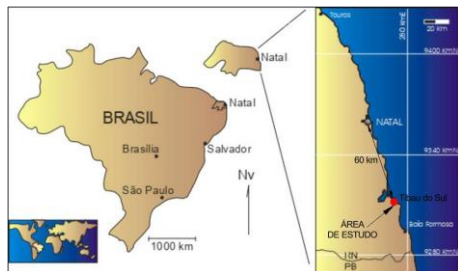


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Autor, 2024.



Figura 2. Localização da Praia do Madeiro. Fonte: Google Earth, 2024.



Figura 3. Falésias com vegetação densa na Praia do Madeiro, levantamento realizado por Drone. Fonte: Autor, 2024.



Figura 4. Sedimentos da Formação Barreiras, onde se observa a extremidade sul e norte da Baía do Madeiro, respectivamente. Fonte: Autor, 2024.



Figura 5. Depósito de colúvio. Fonte: Autor, 2024.

Foram observados a ocorrência de processos erosivos pela ação do mar em algumas partes no pé da falésia (falésia viva), quedas de blocos e deslizamentos superficiais de materiais (Figuras 6 e 7). Em alguns afloramentos da FB, podem ser visualizadas algumas descontinuidades (Figura 8).

Embora pareça que o mecanismo principal de ruptura pode estar relacionado ao comportamento do meio descontínuo, como quedas e tombamentos, devido a geometria bastante escarpada das falésias, observa-se que

de acordo com Severo (2005) os deslizamentos são muito mais frequentes do que as quedas e tombamentos que são menos frequentes e de volumes pequenos.

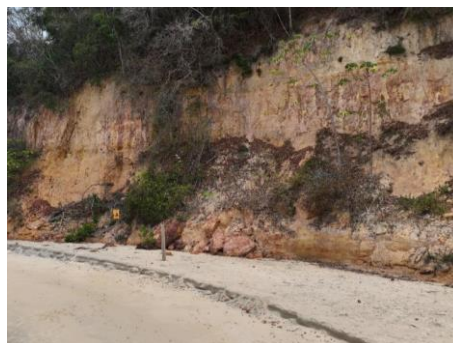


Figura 6. Erosão no pé da falésia. Fonte: Autor, 2024.



Figura 7. Quedas de blocos, deslizamento superficial e quedas de árvores. Fonte: Autor, 2024.

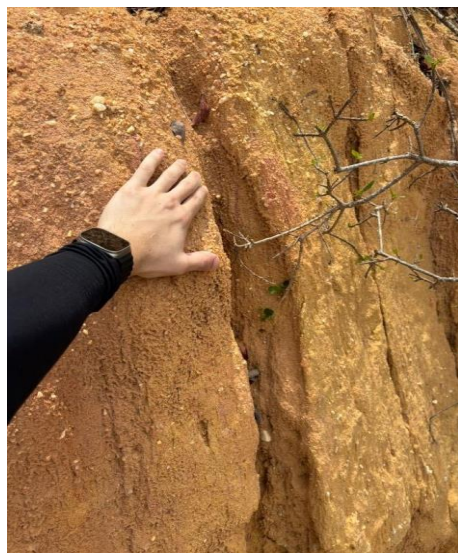


Figura 8. Fraturas no maciço da Formação Barreiras (FB). Fonte: Autor, 2024.

3 METODOLOGIA E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS

Bressani (2009) afirma que nos períodos secos no centro da Inglaterra, têm sido medidos valores de sucção muito elevados, os quais se reduzem durante o período chuvoso, mas não a ponto de zerá-los. Assim, é possível fazer projetos em que estes valores de sucção, e a correspondente resistência ao cisalhamento, possam ser considerados. No caso da falésia objeto deste estudo realizou-se a análise de estabilidade levando-se em conta a contribuição da sucção no aumento da resistência ao cisalhamento na estabilidade da falésia.

A metodologia do trabalho foi desenvolvida em quatro etapas distintas: i) Visitas de campo com vistas a determinar os mecanismos da dinâmica superficial atuantes na área; ii) Realização de levantamento planialtimétrico e sondagens de simples reconhecimento; iii) Obtenção dos parâmetros de resistência dos solos; iv) Estudos de estabilidade dos taludes considerando a saturação e não saturação dos solos.

3.1 Topografia da Área de Estudo

Foi gerado o levantamento topográfico (Figura 9) a partir do voo de drone (Mavic 3 Classic) e posteriormente traçadas três seções para a análise de estabilidade da falésia local.

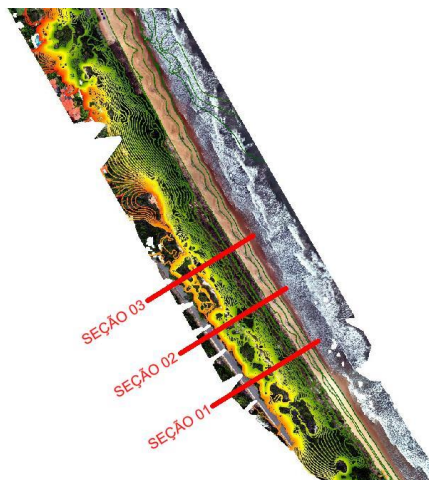


Figura 9. Localização das seções transversais no levantamento topográfico feito por drone. Fonte: Autor, 2024.

3.2 Caracterização Geotécnica dos Solos

Foram realizados 05 (cinco) ensaios de sondagem de simples reconhecimento (SP 01 a SP 05) com medidas de NSPT no topo da falésia, perfazendo um total 147,0 metros perfurados. As perfurações foram executadas pelo método de percussão, de acordo com as recomendações da ABNT (NBR – 6484/20201). Os ensaios de sondagem foram paralisados ao atingirem o impenetrável à percussão, que ocorreu a uma profundidade que variou entre 22,0 m e 36,0 m.

Também foram executados 03 (três) furos de sondagem a trado, perfazendo um total perfurado de 6,30 metros. As perfurações foram executadas com a utilização de um trado cavadeira, com diâmetro de 4”, de acordo com as recomendações da ABNT (NBR - 9603).

A partir da análise das amostras coletadas nestes ensaios observou-se que o material da parte superior da falésia é constituído por areias finas com consistência pouco compacta de cor creme até a profundidade aproximada de 4,0 metros (camada de topo). Subjacente a essa camada, observou-se uma camada de areia fina pouco argilosa compacta de cor avermelhada e cinza até aproximadamente 11,0 metros de profundidade (camada do meio).

Entre 11,0 e 20,0 metros de profundidade encontra-se uma camada de areia fina argilosa compacta de cor esbranquiçada com incrustação de nódulos de óxidos de ferro avermelhados.

O material do topo (solo arenoso com poucas cimentação) apresenta alta permeabilidade e não é susceptível ao processo erosivo. Entretanto, as camadas inferiores da encosta apresentam permeabilidade muito baixa conforme estudos sobre a FB dessa área (Coutinho e Severo, 2009).

Os ensaios de laboratório foram realizados seguindo-se os procedimentos recomendados pelas normas Brasileiras (NBR 7181:2018; NBR 6458:2017; NBR 6459:2017 e NBR 7180:2016).

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram baseados na ASTM D3080-12. Para cada amostra, quatro corpos de prova cilíndricos foram entalhados diretamente dos blocos indeformados e submetidos a um período de inundação de no mínimo 24h antes do estágio de cisalhamento. Os corpos de prova apresentaram dimensões aproximadas de 60 mm de diâmetro e 30 mm de altura. Ao longo do estágio de inundação, os corpos de prova foram submetidos à sua respectiva tensão normal

vertical de adensamento. Adotou-se as tensões normais verticais de 50, 100, 150, 200 kPa. O estágio de cisalhamento foi do tipo deslocamento controlado, com velocidade de deslocamento da prensa constante, igual a 0,04 mm/min, adotada em função do tipo de solo. A partir dos resultados, traçou-se envoltórias de Mohr-Coulomb.

3.3 Parâmetros Geotécnicos dos Solos

Quanto aos parâmetros de resistência utilizados nas análises de estabilidade das falésias (ângulo de atrito e coesão), salienta-se que os mesmos foram estimados com base nos valores de NSPT, obtidos na sondagem de simples reconhecimento realizada, utilizando as correlações apresentadas por Schnaid e Odebrecht (2012) e também com base em ensaios de cisalhamento direto naquelas camadas em que foi possível a coleta de blocos indeformados. Na Figura 10 são apresentados as fotos dos blocos indeformados das camadas de Topo, Meio e Base ao chegarem no laboratório de Mecânica dos Solos.



(a) Camada de Topo



(b) Camada do Meio



(c) Camada da Base

Figura 10. Blocos indeformados das camadas de solos das falésias da Ponta do Madeiro. Fonte: Autor, 2024.

Os parâmetros geotécnicos foram estimados nas condições saturada e de umidade natural, conforme mostram as tabelas 01 e 02, respectivamente.

Tabela 1. Solos Saturados.

Classe de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)
Areia Siltosa	16,5	8	31
Areia Pouco Argilosa	18,5	25	30
Areia Argilosa	20,0	60	30

Tabela 2. Solos Não Saturados.

Classe de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)
Areia Siltosa	15	20	31
Areia Pouco Argilosa	17	42	30
Areia Argilosa	18,2	90	30

3.4 Metodologia das Análises de Estabilidade

Foram feitas duas análises de estabilidade para cada uma das três seções representativas da falésia da Praia do Madeiro, uma na situação com os solos saturados e outra na situação com os solos não saturados, conforme citado anteriormente. As análises foram feitas de forma a encontrar o menor Fator de Segurança e a superfície crítica de ruptura. Foi considerado uma poropressão (R_u) de 0,25 para os solos não saturados. Os parâmetros dos solos saturados e não saturados utilizados foram os das Tabelas 1 e 2. Além disso, como no local há a presença de edificações em cima da falésia, foi considerado uma carga de 20 kN/m² o que equivale a 2,0 toneladas por metro quadrado, para simular essa situação.

Utilizou-se a ferramenta computacional “Slope/W”, que é uma das extensões de softwares da “GeoStudio” para determinar o menor Fator de Segurança e a superfície potencial de ruptura para cada perfil analisado. Os Fatores de Segurança (FS) foram determinados pelo método de Morgenstern-Price.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DA ESTABILIDADE DA FALÉSIA

De acordo com as recomendações da Norma Brasileira NBR 11.682 – Estabilidade de Encostas, que trata da estabilidade de taludes e dos Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos, os taludes em estudo serão considerados estáveis se os Fatores de Segurança mínimo atingirem 1,3. Esse valor é definido levando em conta o nível de segurança necessário para evitar danos a vidas humanas, bem como prejuízos materiais e ambientais. Os resultados obtidos nas análises de estabilidade são mostrados nas Figuras 11 a 16 e na Tabela 3.

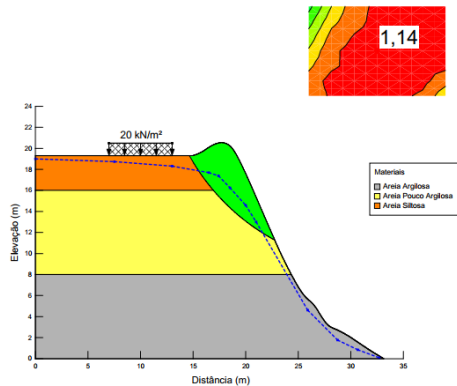


Figura 11. Seção 01: Análise estabilidade solos saturados – FS = 1,14. Fonte: Autor, 2024.

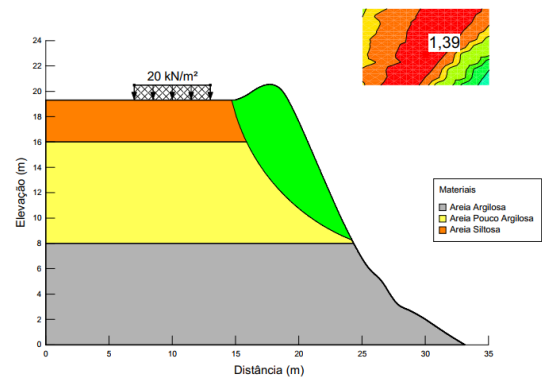


Figura 12. Seção 01: Análise estabilidade solos não saturados – FS = 1,39. Fonte: Autor, 2024.

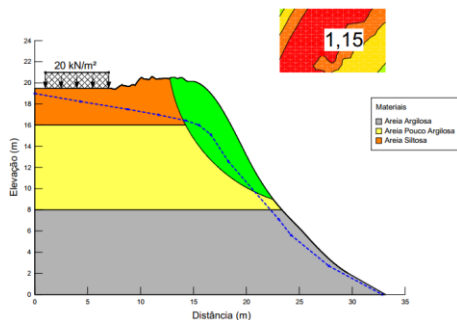


Figura 13. Seção 02: Análise estabilidade solos saturados – FS = 1,15. Fonte: Autor, 2024.

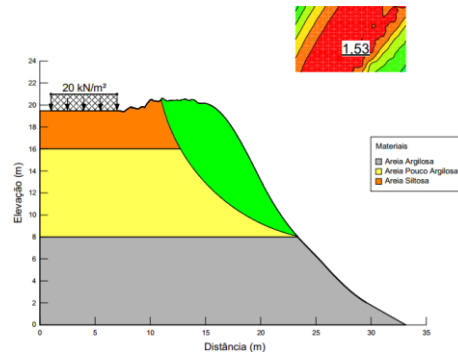


Figura 14. Seção 02: Análise estabilidade solos não saturados – FS = 1,53. Fonte: Autor, 2024.

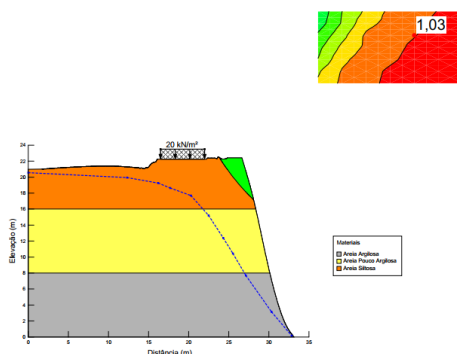


Figura 15. Seção 03: Análise estabilidade solos saturados – FS = 1,03. Fonte: Autor, 2024.

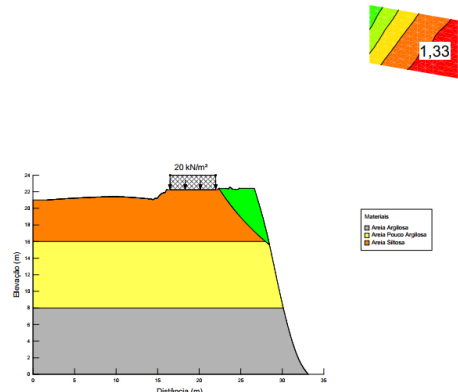


Figura 16. Seção 03: Análise estabilidade solos não saturados – FS = 1,33. Fonte: Autor, 2024.



Tabela 3. Resultados Fatores de Segurança (FS) das falésias da Praia do Madeiro.

Seção de Análise	FS	FS
	Solos Não Saturados	Solos Saturados
01	1,39	1,14
02	1,53	1,15
03	1,33	1,03

De acordo com a Tabela 3, os taludes na condição não saturado, apresentam-se todos estáveis ($FS > 1,3$). Já com a presença de água, na condição saturada, os fatores de segurança baixaram para valores abaixo de 1,3, portanto, não atendem aos requisitos da NBR 11.682-Estabilidade de Encostas.

Observa-se que não foram consideradas nas análises de estabilidade os solos coluviais que recobrem a falésia da Praia do Madeiro e eventualmente sofrem movimentos de massa do tipo deslizamento planar. Observa-se também, que os menores Fatores de Segurança foram encontrados na situação de completa saturação, o que mostra o quanto a presença da água pode prejudicar a estabilidade da falésia. Vale ressaltar que esta condição é de extrema dificuldade de ocorrência, pois para ocorrer são necessárias chuvas de excepcional intensidade e duração e condições favoráveis de infiltração. Em condições normais durante a maior parte do ano prevalece a condição de não saturação dos solos.

5 CONCLUSÕES

Nas falésias da Praia do Madeiro ocorre erosão pela ação do mar em partes do pé da falésia, quedas de blocos, deslizamentos superficiais de materiais e deslizamentos circulares em caso de saturação dos solos.

As análises de estabilidade, em relação aos deslizamentos, das três seções estudadas apresentaram Fatores de Segurança menores do que o mínimo recomendado pela NBR 11.682 – Estabilidade de Encostas ($FS > 1,3$) quando os solos se encontram na condição saturada. Na condição de umidade natural (não saturada) do solo, as análises apresentaram Fatores de Segurança maiores do que ($FS > 1,3$).

Conclui-se, portanto, que as falésias da Praia do Madeiro encontram-se instáveis quando ocorre a saturação dos solos. Nesse sentido, é importante a elaboração e execução de projetos de drenagem para evitar a infiltração de água na face e na parte superior do talude para minimizar a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa e os impactos dos processos erosivos, preservando a beleza cênica da paisagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 11.682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Autor. Santos, G. C. (2024). *Análise de Estabilidade de Falésias da Praia do Madeiro – Município de Tibau do Sul/RN*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. IFRN. Natal.
- Bressani, L. A. (2009). *Conferência Instrumentação em obras geotécnicas – taludes e escavações*. 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE, São Paulo. 16 p.
- Coutinho, R. Q.; Severo, R. N. F. (2009). *Conferência Investigação Geotécnica Para Projeto de Estabilidade de Encostas*. 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE, São Paulo. 55 p.
- Santos Jr, O. F.; Severo, R. N. F.; Scudelari, A. C.; Amaral, R. F do. *Processo de Instabilização em Falésias: Estudo de um Caso no Nordeste do Brasil*. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, SPG, ABMS, ABGE. N. 114, p. 71-90. 2008.
- Santos Jr., O. F.; Freitas Neto, O. de; Severo, R. N. F.; Scudelari, A. *Sea cliff stability in Tibau do Sul, Brazil*. Advanced Materials Research, 1065-1069, 540–544, 2014.
- Santos Jr, O. F.; Coutinho, R. Q.; Severo, R. N. F. *Propriedades geotécnicas dos sedimentos da Formação Barreiras no litoral do Rio Grande do Norte - Brasil*. Geotecnia, v. 134, p. 87–108, 2015.
- Schnaid, F., Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. Oficina de Textos, Brasil..
- Severo, R. N. F. *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.