



Análise da estabilidade e Mitigação de Riscos em Encosta no Município de Tibau do Sul-RN

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

David César Santos da Silva

Graduando Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil,
gleydson.n@escolar.ifrn.edu.br

Ênio Fernandes Amorim

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

André Luiz Lopes Toledo

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

Rubens Diego Fernandes Alves

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

Resumo: A zona costeira do Brasil, especialmente a Formação Barreiras (FB) no litoral do Rio Grande do Norte (RN), é altamente suscetível à erosão e movimentos gravitacionais de massa, tanto por processos naturais quanto antrópicos. Esta formação apresenta falésias e terrenos vulneráveis à erosão pluvial, sendo que a ocupação inadequada e a remoção de vegetação intensificam os problemas. Deste modo o município de Tibau do Sul/RN, em especial, a encosta localizada na sua entrada sofre com grave problema de drenagem e desmonte hidráulico, ocasionado após fortes precipitações. A saturação do solo acarretou um voçorocamento de grandes proporções na área, portanto é necessário a análise da estabilidade do seu talude para conhecer a real situação e tomar medidas que visem garantir a segurança das construções e prevenir desastres, especialmente após o registro de movimentos de massa na região no ano de 2022, conforme relatórios da Defesa Civil local. Este trabalho visa investigar as causas da movimentação gravitacional de massas e o voçorocamento resultante do desmonte hidráulico causado por chuvas fortes. Desta forma, o objetivo do estudo foi estudar e apontar possíveis causas relacionadas a movimentação gravitacional de massa que resultou no ravinamento e voçorocamento na encosta da entrada do município de Tibau do Sul e analisar a situação atual do local após desmonte hidráulico ocorrido após períodos de fortes chuvas. Também, apontar solução mais provável de melhoria da drenagem e recuperação do solo e garantir a estabilidade do maciço arenoso. O trabalho tem relevância devido ao impacto socioeconômico da região, importante para o turismo e a infraestrutura local, ajudando a garantir a segurança das rodovias e preservar áreas residenciais e comerciais. A metodologia incluiu revisão bibliográfica, vistorias no local com registros fotográficos e o uso de drones para levantamento topográfico simplificado para realização das análises de estabilidade do talude utilizando o software *GeoSlope da Geostudio*. Concluiu-se, que a elaboração e execução de projetos de drenagem, medidas de mitigação e controle nessas áreas reduzirão a possibilidade de ocorrência de deslizamentos ou quedas, preservando a beleza cênica da paisagem e minimizando os impactos dos processos erosivos. Além de garantir a segurança a todos que frequentam a cidade e aos imóveis próximos, assim como a própria rodovia.

Palavras-chave: Análise da Estabilidade de Taludes; Propriedades Geotécnicas; Processos Erosivos em Dunas; Falésias da Formação Barreiras (FB); Tibau do Sul.



ABSTRACT: Brazil's coastal zone, especially the Barreiras Formation (FB) on the coast of Rio Grande do Norte (RN), is highly susceptible to erosion and gravitational mass movements, both due to natural and anthropogenic processes. This formation features cliffs and terrain vulnerable to rainfall erosion, and inadequate occupation and vegetation removal exacerbate these problems. Thus, the municipality of Tibau do Sul, RN, in particular, the slope located at its entrance, suffers from serious drainage problems and hydraulic collapse, caused by heavy rainfall. Soil saturation has caused large-scale gully erosion in the area, therefore, analyzing the slope stability is necessary to understand the true situation and take measures to ensure the safety of buildings and prevent disasters, especially after mass movements were recorded in the region in the year 2022, according to reports from the local Civil Defense. This study aims to investigate the causes of gravitational mass movements and gully erosion resulting from hydraulic collapse caused by heavy rainfall. Thus, the objective of the study was to investigate and identify possible causes related to the gravitational mass movement that resulted in the ravine and gully erosion on the slope at the entrance to the municipality of Tibau do Sul. It also aimed to analyze the current situation of the site following hydraulic dismantling following periods of heavy rain. It also aimed to identify the most likely solution for improving drainage and soil restoration, ensuring the stability of the sand mass. The work is relevant due to the socioeconomic impact of the region, which is important for tourism and local infrastructure, helping to ensure highway safety and preserve residential and commercial areas. The methodology included a literature review, on-site inspections with photographic records, and the use of drones for simplified topographic surveys to perform slope stability analyses using Geostudio's GeoSlope software. The conclusion is that the development and implementation of drainage projects, mitigation, and control measures in these areas will reduce the likelihood of landslides or falls, preserving the scenic beauty of the landscape and minimizing the impacts of erosion. This will also ensure the safety of all visitors to the city and nearby properties, as well as the highway itself.

KEYWORDS: Slope Stability Analysis; Geotechnical Properties; Erosive Processes in Dunes; Cliffs of the Barreiras Formation (BF); Tibau do Sul.

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma das regiões com maior dinamicidade do mundo, suscetível a diversos processos naturais e antrópicos que causam erosão e movimentos gravitacionais de massa. O litoral do Rio Grande do Norte apresenta tabuleiros costeiros e dunas assentes sobre estes tabuleiros da Formação Barreiras (FB) onde formam falésias nas suas. As falésias da FB são suscetíveis a processos erosivos naturais, principalmente pela ação das ondas e chuvas, notadamente, a erosão pluvial se apresenta como uma das principais causas de problemas erosivos nessas formações geológicas (Santos Jr et al., 2008).

Esses processos erosivos são intensificados pela atividade humana, especialmente em períodos de forte chuva, o que pode levar a desastres socioeconômicos e acidentes fatais. A sobrecarga gerada pela ocupação nas áreas próximas às falésias, ausência de drenagem adequada, juntamente com a remoção da vegetação, reduz a infiltração de água e acentua a erosão através do escorregamento e fluxo de areia e detritos conduzidos pela ausência de drenagem adequada (Severo et al., 2014).

Segundo Tominaga et al. (2009), os eventos relacionados a desastres naturais estão ligados a fenômenos da terra como as enchentes e movimentações de terra e costumam ocorrer em razão de chuvas intensas e prolongadas. Desse modo, esses eventos se apresentam frequentemente em decorrência de chuvas intensas e prolongadas, que se manifestam durante os períodos de precipitação acima da média e tais fatores impactam diretamente nos solos arenosos.

No litoral oriental do RN encontra-se o município de Tibau do Sul, localizado sobre uma imensa área de encostas da FB normalmente recoberta por dunas. Diante das transformações na região costeira do RN, especialmente em Tibau do Sul, o estudo da estabilidade dessas encostas, é crucial para garantir a segurança das construções e identificar áreas de risco, onde movimentos de massa já foram observados.

A Defesa Civil (2022) de Tibau do Sul elaborou relatório técnico apontando riscos e processos erosivos concretos causados na região estudada no ano de 2022. Este relatório aponta que a entrada do município de Tibau do Sul, a margem da rodovia RN-003 apresenta um voçorocamento em encosta de FB recoberta por dunas de areia. A RN-003 é a principal via de acesso a região da praia de Pipa/RN, desta maneira é imprescindível, garantir a mobilidade, segurança e as condições plausíveis aos moradores da região e aos turistas que frequentam a região em praticamente todos os meses do ano.

O objetivo deste estudo foi estudar e apontar possíveis causas relacionadas a movimentação gravitacional de massa que resultou no ravinamento e voçorocamento na encosta da entrada do município de Tibau do Sul e analisar a situação atual do local após desmonte hidráulico ocorrido após períodos de fortes chuvas. Também, apontar solução mais provável de melhoria da drenagem e recuperação do solo e garantir a estabilidade do maciço arenoso.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Conforme Diniz (2002), 40% do território potiguar são constituídos por coberturas sedimentares cretácicas, não dobradas, representadas pelas rochas da Bacia Potiguar e Formação Barreiras, além de sedimentos inconsolidados de idade tércio-quaternária. As rochas sedimentares e os sedimentos ocupam praticamente toda a porção litorânea oriental potiguar, sendo representados predominantemente, da base para o topo, pelas rochas carbonáticas e areníticas cretácicas e terciárias das Bacias Potiguar e Pernambuco-Paraíba, os depósitos areno-argilosos tércio-quaternários da Formação Barreiras, culminando com as acumulações quaternárias compostas pelos arenitos de praia e sedimentos arenosos, argilosos e argilo-arenosos de ambientes fluviais, lacustres, estuarinos, dunares e praias.

Nas coberturas sedimentares terciárias e quaternárias recobrindo as rochas pré-cambrianas e cretácicas pré-existent, ocorrem os sedimentos e rochas tércio-quaternárias da Formação Barreiras e as acumulações quaternárias lacustres. Os sedimentos quaternários mais jovens são representados por paleodunas, dunas recentes, aluviões recentes e depósitos de planícies de marés e lagoas.

A área estudada é a encosta localizada na entrada do município de Tibau do Sul/RN, aproximadamente 60 km ao sul de Natal/RN (Figura 1). A camada de solo local possui material arenoso em praticamente sua totalidade, a qual apresenta características de alta permeabilidade (areia de dunas antropizadas com presença de finos), consequentemente, apresenta alta suscetibilidade a deformações em decorrência da presença de água (Figura 2). As dunas são formadas por areias finas quartzosas de origem eólica. Na planície costeira ocorrem praias arenosas.

A camada de areia de duna com presença de finos antropizada pouco compacta está assentada sobre solos da Formação Barreiras e possui uma profundidade de aproximadamente 20,0 metros, os quais atualmente apresentam deformação ao longo do seu talude em face do último desmonte hidráulico causado pelas águas drenadas por equipamentos de drenagem insuficientes. Tal camada, apresenta parâmetros de coesão aparente, que irão variar de acordo com a sucção em estado de não saturação.

Na Figura 3 observa-se uma visão geral da área e um deslocamento de areia de dunas que ocasionaram a presença de uma ravina que tem colocado em risco a estabilidade local e global, incluindo a rodovia e casa próxima. A drenagem atual da rodovia transporta a água até o ravinamento existente (Figura 4). É possível identificar uma elevada quantidade de vegetação na localidade (Figura 5), cuja presença é um indício potencial de infiltração no solo. Por conseguinte, esse fluxo atrelado a alta permeabilidade e porosidade da areia elevam sua saturação tornando-o potencialmente frágil à uma nova ruptura.

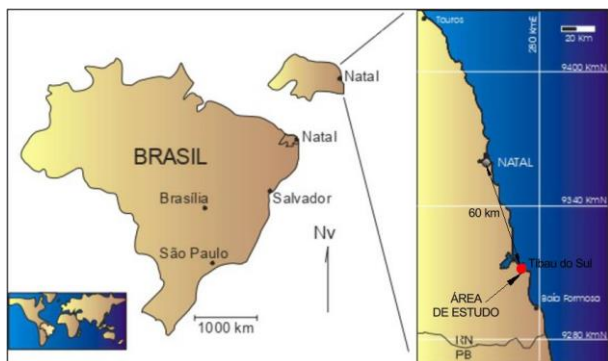


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Autores, 2024.



Figura 2. Areia de dunas antropizadas na área de estudo. Fonte: Autores, 2024.

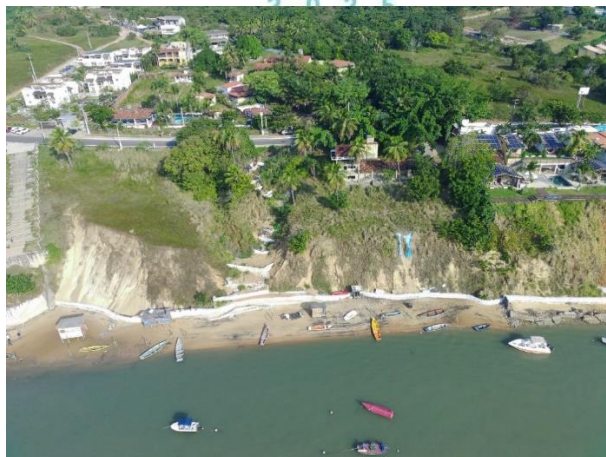


Figura 3. Vista Geral da área com formação de ravinamento e voçorocamento, com algumas contenções provisórias executadas com sacos de areia. Fonte: Autores, 2024.



Figura 4. Dispositivo de drenagem subdimensionado para a condição de vazão da rodovia. Fonte: Autores, 2024.



Figura 5. Presença de quantidade elevada de vegetação na área de estudo: Autores, 2024.

3 METODOLOGIA E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS

A metodologia do trabalho incluiu revisão bibliográfica, vistorias no local com registros fotográficos e o uso de drones para levantamento topográfico simplificado para realização das análises de estabilidade do talude utilizando o software GeoSlope da Geostudio. 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, iii) definição dos parâmetros de resistência dos solos; iv) Estudos de estabilidade dos taludes considerando a saturação e não saturação dos solos.

3.1 Caracterização Geotécnica da Areia de Dunas Antropizadas com Presença de Finos

De acordo com Fontoura (2015), a análise granulométrica do solo foi realizada por peneiramento, estando de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 7181. Os resultados da análise granulométrica de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos classificam o solo como uma areia mal graduada (SP) sendo bastante uniforme tendo aproximadamente 72% de areia média em sua composição e 4,21% de finos. Observa-se também que a areia de Natal apresenta bastante semelhança com a areia de Osório estudada por Cruz, 2008, apesar desta última ser, em sua maioria, areia fina. Na Figura 6 são apresentadas as curvas granulométricas para ambas as areias. Na Tabela 1, são apresentados os índices físicos das areias de Natal.

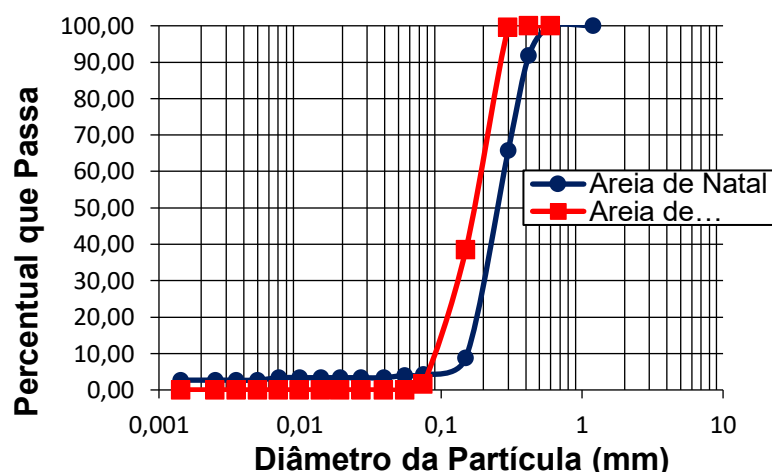


Figura 6. Curva granulométrica areias de dunas Natal-RN e Osório-RS: Fontoura. (2015).

Tabela 1. Índices físicos da areia de dunas Natal.

Massa específica dos sólidos	2,62 g/cm ³
Coefficiente de uniformidade, C_u	1,861
Coefficiente de Curvatura, C_c	0,971
Diâmetro médio, D_{10}	0,153
Diâmetro médio, D_{50}	0,25
Índice de vazios mínimo, e_{\min}	0,59
Índice de vazios máximo, e_{\max}	0,80

3.3 Parâmetros de Resistência dos Solos

Quanto aos parâmetros de resistência utilizados nas análises de estabilidade da encosta (ângulo de atrito e coesão), salienta-se que os mesmos foram estimados com base nos estudos previamente realizados por (Santos Jr et al., 2015) e obtidos por Fontoura (2015) em ensaios triaxiais drenados. As envoltórias de pico para as amostras de areia com índice de vazios de 0,6; 0,7 e 0,8, apresentaram inclinação muito semelhantes ($\phi = 32,6^\circ$; $\phi = 31,3^\circ$ e $\phi = 31,0^\circ$). A coesão para as amostras mais compactas (E1) ($c = 12,3$ kPa) apresentou-se maior que para as amostras mais fofas (E2 e E3), possivelmente devido aos finos exercerem maior influência sobre o comportamento do solo, quando este encontra-se mais compactado. As amostras fofas apresentaram coesão ínfima ($c = 0,4$ kPa e $c = 0,8$ kPa), conforme pode-se observar nas envoltórias apresentadas na Figura 7.

Os valores dos parâmetros geotécnicos dos solos (areia de dunas antropizada com presença de finos) usados para as análises de estabilidade estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Observe-se que o ângulo de atrito da areia em condições saturada é compatível com a situação de desmonte hidráulico.

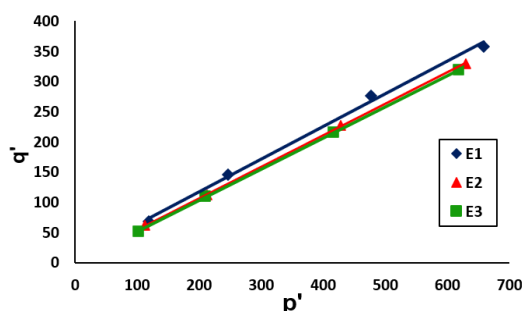


Figura 7. Envoltórias de pico das amostras de solo puro Fontoura (2015).

Tabela 2. Camada de areia antes e após o desmonte hidráulico. Solos Saturados.

Classe de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)
Solos não saturados	17	12	32
Solos saturados	19	2	15

Tabela 3. Camada posterior a recomposição proposta

Classe de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)
Solo não saturado	17	12	32

3.4 Metodologia das Análises de Estabilidade

Foi gerado o levantamento topográfico simplificado a partir do voo de drone (Mavic 3 Classic) e posteriormente traçadas as seções para realização das análises de estabilidade da encosta local.

Foram consideradas três seções distintas para análise de estabilidade, a seção inicial, antes do início do desmonte hidráulico devido ao despejo das águas pluviais, a seção atual sem execução de obras de recuperação e de drenagem e a situação futura após a execução das obras de recuperação e drenagem. As duas primeiras situações foram analisadas considerando a situação de solos saturados e não saturados devido à falta ou mau funcionamento dos equipamentos de drenagem e na situação após a recuperação considerou-se apenas a situação de solos não saturados, pois, com a execução das obras de drenagem, os solos tendem a não saturar, pois são arenosos e com permeabilidade alta. A situação anterior e atual reflete a falta da drenagem e o consequente desmonte hidráulico ocasionado pela concentração das águas das chuvas na área.

Nas análises dos perfis foram considerados os parâmetros dos solos apresentados nas Tabelas 2 e 3. Também foi considerado um R_u (Fator de Percolação da Água no Solo) igual a 0,2 para simular fluxos d'água transientes nas camadas de solos não saturados que se encontram abaixo da linha freática.

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 o perfil analisado. Os Fatores de Segurança (FS) foram determinados pelo método de Morgenstern-Price.

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, as encostas estudadas foram consideradas estáveis se os FS mínimo atingirem 1,5. Esse valor é definido levando em conta o nível de segurança necessário para evitar danos a vidas humanas, bem como prejuízos materiais e ambientais.

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

As análises foram feitas de forma a encontrar o FS e a respectiva Superfície Potencial de Ruptura (SPR). Os resultados obtidos nas análises de estabilidade são mostrados nas Figuras 7 a 11 e na Tabela 4.

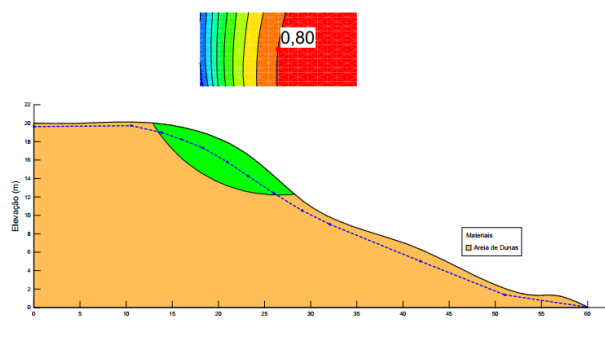


Figura 7. Seção 01: Análise estabilidade falésia com solos saturados Entrada de Tibau do Sul – Situação inicial – FS = 0,80. Fonte: Autores, 2024.

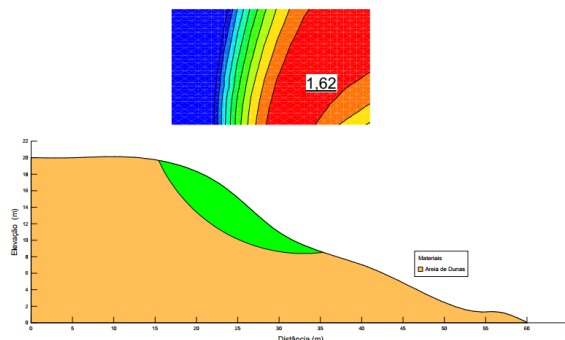


Figura 8. Seção 01: Análise estabilidade falésia com solos não saturados Entrada de Tibau do Sul – Situação inicial – FS = 1,62. Fonte: Autores, 2024.

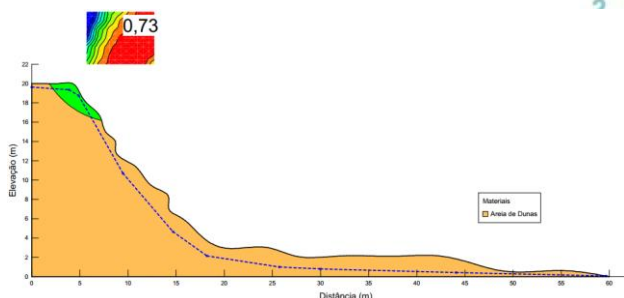


Figura 9. Seção 02: Análise estabilidade falésia com solos saturados Entrada de Tibau do Sul – Situação atual – FS = 0,73. Fonte: Autores, 2024

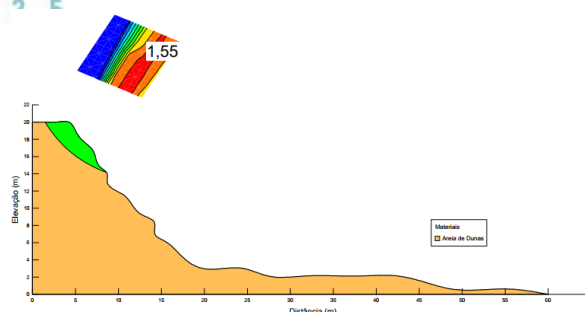


Figura 10. Seção 02: Análise estabilidade falésia com solos não saturados Entrada de Tibau do Sul – Situação atual – FS = 1,55. Fonte: Autores, 2024.

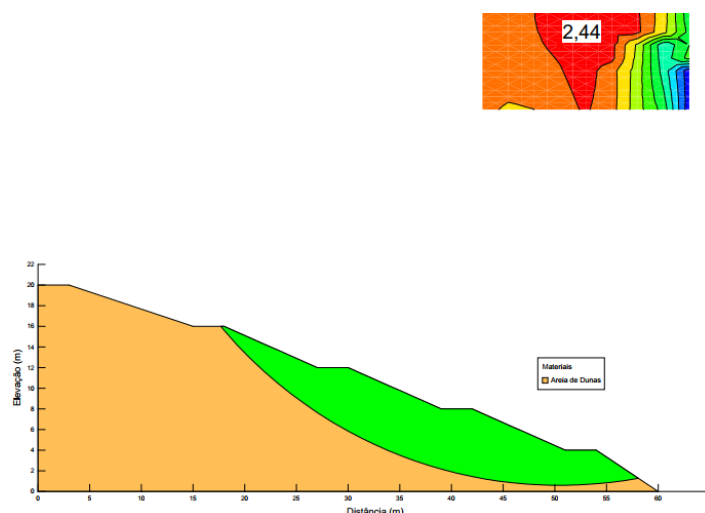


Figura 11. Seção 03: Análise estabilidade falésia com solos não saturados Entrada de Tibau do Sul – Após obras de recuperação e drenagem – FS = 2,44. Fonte: Autores, 2024

Tabela 4. Resultados Fatores de Segurança (FS) da encosta da entradas de tibau do Sul/RN.

Seção	FS Solos Saturados	FS Solos Não Saturados
01	0,80	1,62
02	0,73	1,55
03	x	2,44

Conforme mostrado nas análises dos taludes das seções 1, 2 e 3 e na Tabela 4, observa-se que os solos na condição não saturado apresentam estáveis ($FS > 1,5$). Já com os solos saturados os fatores de segurança não atendem aos requisitos da NBR 11.682, apresentando Fatores de segurança bem abaixo do mínimo recomendável e abaixo de 1,0, o que representa uma situação de extrema instabilidade em caso de saturação dos solos.

Desta forma, as análises permitiram verificar que, na seção 1 não saturado o solo apresenta condições estáveis, porém com o déficit de medidas corretivas e estruturais na drenagem da rodovia, a região sofreu com a saturação excessiva do solo resultando na situação saturada da seção 1, com $FS = 0,80$. Para a seção 2, é possível verificar que, mesmo após a ruptura, o solo apresenta situação estável, porém, como não foram tomadas medidas cabíveis e resolutivas, em próxima situação de chuva, o solo sofrerá com a situação saturada da seção 2, resultando em novos desmontes no local e no entorno, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** com solos saturados. Por fim, realizadas as medidas e recuperação do solo, a seção 3, apresenta $FS > 2$, ou seja, condição de estabilidade e segurança no entorno.

Diante do exposto, torna-se necessário efetuar medidas práticas que visem a resolução da problemática e como sugestão, baseada no estudo realizado e nas bibliografias anteriores do local, pode-se executar obras de drenagem ao longo da RN 003.

5 CONCLUSÕES

As análises de estabilidade das três seções estudadas apresentaram Fatores de Segurança menores do ($FS = 1,0$), 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 ($FS > 1,5$).

Devido aos Fatores de Segurança menores do que o mínimo recomendado pela NBR 11.682 – Estabilidade de Encostas, com os solos na condição saturada é necessário adoção de medidas resolutivas, tendo em vista que a encosta se encontra em um local de grande risco e localizada na entrada da cidade, na rota de acesso dos moradores e turistas que frequentam a região em grande escala.

Devem ser executadas obras de drenagem na encosta da entrada de Tibau do Sul ao longo da RN-003, como sarjetas, canaletas de drenagem e dissipadores de energia, que evitem a descarga direta das águas pluviais sobre o topo da encosta na entrada de Tibau do Sul, evitando novos desmontes, além de recuperação do solo, de preferência em formato de talude escalonado com bermas e canaletas de drenagem para garantir em toda extensão do local afetado a estabilidade da encosta.

Concluiu-se, que a elaboração e execução de projetos de drenagem, medidas de mitigação e controle nessas áreas, reduzirão a possibilidade de ocorrência de processos erosivos e de movimentos gravitacionais de massa, preservando a beleza cênica da paisagem. Além de, garantir a segurança a todos que frequentam a cidade e dos imóveis próximos, assim como a própria rodovia RN-003.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autores. DA SILVA, D. C. S. (2024.) *Análise da estabilidade de talude: Encosta da Entrada de Tibau do Sul/RN*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. IFRN. Natal.
- Cruz, R. C. (2008). *Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada..* Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre
- Defesa Civil Tibau do Sul. *Parecer Técnico N°008/2022/COMPDEC*. Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de Tibau do Sul.
- Diniz, R. F. (2002). *A erosão costeira ao longo do litoral oriental do Rio Grande do Norte: causas, consequências e influência nos processos de uso e ocupação da região costeira*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Fontoura, T. B. (2015) *Comportamento Tensão - Deformação e Resistência ao Cisalhamento de Uma Areia de Duna Cimentada Artificialmente*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Santos Jr, O. F.; Severo, R. N. F.; Scudelari, A. C.; Amaral, R. F do. (2008). *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.
- Santos Jr, O. F.; Coutinho, R. Q.; Severo, R. N. F. (2015). *Propriedades geotécnicas dos sedimentos da Formação Barreiras no litoral do Rio Grande do Norte - Brasil*. Geotecnia, v. 134, p. 87–108.
- Severo, R. N. F.; Santos JR, O. F.; Coutinho, R. Q. (2012). *Propriedades geotécnicas de uma falésia da Formação Barreiras compostas de solos cimentados naturalmente*. Cobramseg, Porto de galinhas-PE.
- Severo, R. N. F.; Santos JR, O. F.; Dourado, K. C. A. (2014). *Caracterização geotécnica e análise da estabilidade de taludes em solo sedimentar da Formação Barreiras em Tibau do Sul-RN*. Cobramseg, Goiânia-GO.
- Tominaga, L. K.; Santoro, J.; Amaral, R. (2009). *Desastres naturais: Conhecer para prevenir*. 1. Ed. São Paulo: Instituto Geológico.