



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Carlos de Souza Júnior

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NA ZONA COSTEIRA
DE BAÍA FORMOSA/RN**

Natal

2013

Carlos de Souza Júnior

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NA ZONA COSTEIRA
DE BAÍA FORMOSA/RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari

Natal

2013

Catálogo da Publicação na Fonte / CRB15-429

Souza Júnior, Carlos de.

Análise de estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa - RN /
Carlos de Souza Júnior. – Natal, RN, 2014.
139 f.

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior.
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Estabilidade de falésias – Dissertação 2. Erosão Costeira – Dissertação. 3. Dinâmica costeira – Dissertação. 4. Baía Formosa/RN. I. Santos Júnior, Olavo Francisco dos. II. Scudelari, Ada Cristina. III. Título.

RN/UF

CDU 551.435.31

Carlos de Souza Júnior

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NA ZONA COSTEIRA DE BAÍA FORMOSA/RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Orientador

Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari – Co-orientadora

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Examinador Externo (UFS)

Natal, 20 de Dezembro de 2013.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NA ZONA COSTEIRA DE BAÍA FORMOSA/RN

Carlos de Souza Júnior

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari

RESUMO

As mudanças naturais e antrópicas que vêm ocorrendo na zona costeira em todo o mundo representam um dos grandes conflitos para a sociedade neste século. Esse conflito se torna mais evidente devido à elevada densidade populacional das cidades litorâneas, à crescente especulação turístico-imobiliária dessas áreas e às alterações climáticas que tendem a desencadear e acelerar os processos erosivos atuantes no litoral. Nesse contexto, percebe-se cada vez mais um aumento significativo dos problemas relacionados à erosão costeira e recuo de falésias no estado do Rio Grande do Norte, no qual se localiza a área de estudo desta pesquisa. A área está inserida na zona costeira do município de Baía Formosa/RN, no litoral oriental-sul do estado, e possui uma extensão de cerca de 1200 m ao longo da praia do Porto. O objetivo principal deste trabalho é analisar a estabilidade das falésias dessa região. Foram realizadas investigações de campo, ensaios de laboratório e análises computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos e Métodos baseados no equilíbrio-limite. A área foi subdividida em quatro trechos, nos quais foram aplicados *checklists* e coletadas amostras para a realização de ensaios de caracterização e de cisalhamento direto. Desse modo, verificou-se que os segmentos de falésia nessa zona costeira possuem alturas variando de 4m a 14m e inclinações de aproximadamente 40° a 90°. Já os solos constituintes das falésias foram classificados, de acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), como areias argilosas ou siltosas, argilas de baixa plasticidade, pedregulhos argilosos e areias mal graduadas. Os solos mais argilosos e variegados

localizam-se na base da falésia. As análises de estabilidade mostraram que os fatores de segurança variaram, no trecho 01, de 1,92 a 4,93, no trecho 02, de 1,00 a 1,43, no trecho 03, de 1,36 a 1,75, e no trecho 04, de 1,00 a 3,64. Assim, os trechos 02 e 03, foram considerados como mais instáveis. Entretanto, pode-se considerar o trecho 03 como o mais crítico devido à ausência de estruturas de proteção costeira e à estreita faixa de praia.

Palavras-chave: Estabilidade de Falésias, Erosão Costeira, Dinâmica Costeira, Baía Formosa/RN.

ANALYSIS OF CLIFFS STABILITY AT THE COASTAL ZONE OF BAÍA FORMOSA/RN

Carlos de Souza Júnior

Adviser: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Co-adviser: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari

ABSTRACT

The natural and anthropogenic changes that are occurring at the coastal zone around the world represent the greatest problem to society in this century. This problem becomes more evident due to high density of coastal cities, to growing tourist-estate speculation of those areas and to climate change that tend to trigger and accelerate the erosive processes that operating in the littoral. In this context, it's possible perceive ever more a significant increase of problems associated to the coastal erosion and retreat of cliffs in the state of Rio Grande do Norte, where this study area of this search is located. The area is located in the coastal zone of the city of Baía Formosa/RN, in south-eastern coast of Rio Grande do Norte, and has a extension of about 1200 meters along the Porto beach. The main objective of this study is to analyze the stability of these cliffs in this region. Through field investigations, testings and computational analysis using the Finite Element Method and Equilibrium Limit Methods. The area was divided into four sections, and were applied checklists, and also realized characterization tests and direct shear tests with materials obtained along these sections. In this manner, it was found that the segments of cliff in this coastal zone have heights around 4 meters to 14 meters and inclinations of approximately 40° to 90°. However the constituents soils of the cliffs were classified, in general terms in accordance to Unified Soil Classification System (USCS), as clayey sands or silty sands, clays of low plasticity, clayey gravels and poorly graduated sands. The most variegated and clayey soils belong to base of the

cliff. The stability analysis showed that the safety factors ranged in section 01, from 1.92 to 4.93, in the section 02, from 1.00 to 1.43, in the section 03, from 1.36 to 1.75 , and section 04, from 1.00 to 3.64. Thus, the sections 02 and 03 were considered more unstable. However, the section 03 can be considered as the most critical section due to the absence of coastal protection structures and the narrow strip of beach.

Key-words: Stability Cliffs, Coastal Erosion, Coastal Dynamics, Baía Formosa / RN.

Dedico este trabalho à minha
mãe, irmãos, esposa e à minha fonte de luz,
minha filha.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família: à minha mãe pela batalha que foi me conceber, criar, ensinar, e me apoiar, enfrentando várias batalhas e ultrapassando vários obstáculos para que, no fim, eu conseguisse chegar aonde cheguei; a meus irmãos e a minhas sobrinhas pelo apoio e presença, principalmente por me darem a certeza de que a conquista é só questão de tempo e perseverança; à minha esposa, que me deu forças sempre que me faltava motivação e disciplina, ela mais do que ninguém sabe o quanto abdiquei para chegar até então, pois sabia que juntos superaríamos as dificuldades oriundas dessa abdicção; e, à minha princesa linda do meu coração que me faz sorrir quando estou triste, vencer quando estou sendo derrotado, e acima de tudo, viver para o principal da vida, o amor em sua simplicidade.

Agradeço enormemente aos meus amigos que contribuíram diretamente para a execução deste trabalho: a meu grande amigo Hudson que me ajudou em todas as etapas de trabalho de campo; ao meu amigo e concunhado Diogo pelo apoio e ajuda; ao meu amigo e colega de turma Carlindo que desde que conheci está sempre presente nas minhas batalhas, e ao meu amigo e colega de turma Artur que me ajudou incondicionalmente mesmo estando com muitos compromissos. A vocês, meus amigos, agradeço mais uma vez. Sem vocês não seria possível a conclusão dessa dissertação.

Agradeço ao meu orientador pelo crédito e confiança para concretização desse trabalho.

Agradeço a minha co-orientadora pelas dicas, apoio técnico e pela co-orientação.

Agradeço, pela grande ajuda que me foi dada, ao técnico do laboratório de solos, Paulo, a Hugo, a Kleiton e aos bolsistas Vitor e Eduardo.

Agradeço aos meus colegas de turma: Fabiana, Rubens, Luciano, e em especial, a Artur e Carlindo, pelos momentos que passamos juntos durante todo o Mestrado e por ver que esse convívio contribuiu muito para me tornar cada vez melhor.

Agradeço aos professores do PEC pela contribuição na minha formação e aprimoramento profissional.

Agradeço também a Rafaella, secretária do Programa, pela presteza, simpatia e atenção típicas de uma pessoa abençoada.

Agradeço aos meus amigos e colegas que ao longo desses anos me incentivaram e confiaram em minha pessoa.

Agradeço àqueles amigos que estão distantes ou que pela dança da vida acabaram perdendo contato. Mas, que se estivessem próximos, sei que estariam felizes.

Enfim, agradeço ao criador de todas as coisas, o Deus-Universo, por mais uma existência dentro da roda da vida em que foi me dado o poder e oportunidade de expressão e conhecimento.

A todos,

Muito obrigado

Sumário

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>xiii</u>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>xix</u>
<u>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</u>	<u>xx</u>
<u>CAPÍTULO 1</u>	<u>1</u>
<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1 RELEVÂNCIA	1
1.2 JUSTIFICATIVAS	1
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	2
1.3.1 OBJETIVO GERAL	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
<u>CAPÍTULO 2</u>	<u>3</u>
<u>REFERENCIAL TEÓRICO</u>	<u>3</u>
2.1 APRESENTAÇÃO	3
2.2 FALÉSIAS	3
2.3 PROCESSOS EROSIVOS E ESTABILIDADE DE ENCOSTAS	4
2.3.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	4
2.3.2 EROÇÃO COSTEIRA E RECUO DE FALÉSIAS	5
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES	9
2.5 MÓDULO GEO5 – FEM	10
2.5.1 MÉTODOS DE SOLUÇÃO ITERATIVOS	10
2.5.1.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	11
2.5.1.2 MÉTODO DO COMPRIMENTO DO ARCO	13
2.5.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	14
2.6 MÓDULO GEO5 – ESTABILIDADE DE TALUDES	15
2.6.1 MÉTODOS APLICADOS A SUPERFÍCIES DE ESCORREGAMENTO POLIGONAIS	16
2.6.2 MÉTODOS APLICADOS A SUPERFÍCIES DE ESCORREGAMENTO CIRCULARES	22
2.7 ESTUDOS CORRELACIONADOS	23

<u>CAPÍTULO 3</u>	<u>31</u>
<u>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</u>	<u>31</u>
3.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CONFIGURAÇÃO REGIONAL	31
3.2. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	32
3.3. PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS	35
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>37</u>
<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>37</u>
4.1. INVESTIGAÇÕES EM CAMPO	37
4.1.1 LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS	39
4.2. COLETA DE AMOSTRAS E REALIZAÇÃO DE ENSAIOS	43
4.3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE	46
<u>CAPÍTULO 5</u>	<u>48</u>
<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>48</u>
5.1. INVESTIGAÇÕES DE CAMPO	48
5.1.1. OBSERVAÇÕES DIRETAS E UTILIZAÇÃO DOS CHECKLISTS	48
5.2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS	53
5.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	53
5.2.2. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	57
5.2.3. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	62
5.3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE	64
5.3.1. REPRESENTAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DA FALÉSIA	64
5.3.2. ANÁLISES DE ESTABILIDADE UTILIZANDO O MÓDULO GEO5 - FEM	69
5.3.3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE UTILIZANDO O MÓDULO GEO5 - ESTABILIDADE DE TALUDES	85
5.3.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS	102
<u>CAPÍTULO 6</u>	<u>105</u>
<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	<u>105</u>
6.1. CONCLUSÕES	105
6.2. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	106
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>108</u>

Lista de figuras

Capítulo 2

Referencial Teórico

Figura 2.1 Segmento de falésia genenérico em 3D, representando os processos geomorfológicos e erosivos	6
Figura 2.2 Perfis tipo de falésias em Tibau do Sul/RN. (SANTOS JR et al, 2008)	7
Figura 2.3 Representação dos vetores de deslocamento através do Módulo GEO5 - FEM. (GEO5, 2013)	15
Figura 2.4 Representação das variáveis existentes considerando uma superfície de escorregamento poligonal.	16
Figura 2.5 Esquema estático – Método de Sarma.	17
Figura 2.6 Esforços em uma fatia – Método de Janbu.	18
Figura 2.7 Esquema estático – Método de Spencer.	19
Figura 2.8 Esforços em uma fatia – Método de Morgenstern & Price.	21
Figura 2.9 Representação das variáveis existentes considerando uma superfície de escorregamento circular.	22
Figura 2.10 Distribuição das tensões para falésias de inclinações variadas (50°, 85° e 90°). (a) Falésia após ruptura e retirada de sedimentos. (b) Mudanças na inclinação da falésia devido à erosão provocada pela ação das ondas. (c) Face da falésia próxima da vertical. (WOLTERS & MÜLLER, 2008)	25
Figura 2.11 Tensões em uma falésia com incisão basal. (WOLTERS & MÜLLER, 2008)	26
Figura 2.12 Amostras de solo do perfil geotécnico da falésia da Ponta do Pirambu, em Tibau do Sul/RN. (Modificado de SEVERO, 2011)	28

Capítulo 3

Caracterização da Área de Estudo

Figura 3.1 Localização e inserção regional da área de estudo. (Adaptado de Google Mapas)	31
Figura 3.2 Unidades geológicas no litoral oriental-sul do estado. (OLIVEIRA, 2011)	33
Figura 3.3 Mapa geológico do quaternário costeiro no litoral oriental-sul do estado e na área de estudo. (Adaptado de BARRETO et al., 2004)	34
Figura 3.4 Precipitações mensais em Baía Formosa/RN nos últimos 08 anos (Posto Prefeitura).	36
Figura 3.5 Precipitações mensais entre 2005 e 2012 no município de Baía Formosa/RN (Média entre os Postos da Prefeitura e Destilaria Vale Verde).	36

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Figura 4.1 Subdivisão da área de estudo.	38
Figura 4.2 Receptor GPS com base fixa no topo da falésia.	39
Figura 4.3 Levantamento de pontos na base da falésia com receptor GPS móvel.	40
Figura 4.4 Indicação e extensão dos trechos da falésia (Adaptado de Google Mapas).	40
Figura 4.5 Definição das seções a serem analisadas (Adaptado de Google Mapas).	41
Figura 4.6 Instalação do teodolito na faixa de praia.	42
Figura 4.7 Levantamento em uma seção com presença de muro de arrimo.	42
Figura 4.8 Abertura na falésia para inserção do anel de cisalhamento.	45
Figura 4.9 Moldagem do corpo de prova .	45
Figura 4.10 Moldagem de amostras indeformadas: a) in loco; b) em laboratório.	46

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Figura 5.1 Lançamento de efluentes no corpo da falésia.	48
Figura 5.2 Mecanismos de movimento de massa atuantes no trecho 02.	49
Figura 5.3 Constituição da falésia com dois tipos de materiais no trecho 02.	49
Figura 5.4 Incisão basal no início do trecho 03.	50
Figura 5.5 Trecho 03 - perfil heterogêneo com 03 tipos de materiais.	51
Figura 5.6 Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados.	51
Figura 5.7 Trecho 03 – Perfil com camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados com destaque para camada cimentada de seixos.	52
Figura 5.8 Constituição das falésias no trecho 04: a) constituição similar ao final do trecho 03; b) falésias formadas a partir da cimentação do solo arenoso das dunas presentes no litoral.	53
Figura 5.9 Local de coleta da amostra na base do trecho 01: a) amostra n°01 (percebe-se a maior proporção de material de coloração branca); b) amostra n°03 (percebe-se a maior proporção de material de coloração vermelha).	55
Figura 5.10 Local de coleta da amostra n°02 no topo do trecho 01: a) visão geral; b) detalhe do solo (percebe-se a coloração variegada entre vermelho, laranja, amarelo e branco).	55
Figura 5.11 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal para as amostras do topo.	58
Figura 5.12 Variação volumétrica x deslocamento horizontal para as amostras do topo.	59
Figura 5.13 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal para as amostras da base.	59
Figura 5.14 Variação volumétrica x deslocamento horizontal para as amostras da	60

base.

Figura 5.15 Envoltória de resistência para as amostras do topo.	61
Figura 5.16 Envoltória de resistência para as amostras da base.	61
Figura 5.17 Representação esquemática da Seção 1.1.	65
Figura 5.18 Representação esquemática da Seção 1.2.	65
Figura 5.19 Representação esquemática da Seção 1.3.	66
Figura 5.20 Representação esquemática da Seção 2.1.	66
Figura 5.21 Representação esquemática da Seção 2.2.	66
Figura 5.22 Representação esquemática da Seção 2.3.	67
Figura 5.23 Representação esquemática da Seção 3.1.	67
Figura 5.24 Representação esquemática da Seção 3.2.	67
Figura 5.25 Representação esquemática da Seção 3.3.	68
Figura 5.26 Representação esquemática da Seção 3.4.	68
Figura 5.27 Representação esquemática da Seção 4.1.	68
Figura 5.28 Representação esquemática da Seção 4.2.	69
Figura 5.29 Análise de estabilidade para a seção 1.1 utilizando o GEO5-FEM.	70
Figura 5.30 Análise de estabilidade para a seção 1.2 utilizando o GEO5-FEM.	71
Figura 5.31 Análise de estabilidade para a seção 1.3 utilizando o GEO5-FEM.	72
Figura 5.32 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 01.	73
Figura 5.33 Análise de estabilidade para a seção 2.1 utilizando o GEO5-FEM.	74
Figura 5.34 Análise de estabilidade para a seção 2.2 utilizando o GEO5-FEM.	75
Figura 5.35 Análise de estabilidade para a seção 2.3 utilizando o GEO5-FEM.	76

Figura 5.36 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 02.	77
Figura 5.37 Análise de estabilidade para a seção 3.1 utilizando o GEO5-FEM.	78
Figura 5.38 Análise de estabilidade para a seção 3.2 utilizando o GEO5-FEM.	79
Figura 5.39 Análise de estabilidade para a seção 3.3 utilizando o GEO5-FEM.	80
Figura 5.40 Análise de estabilidade para a seção 3.4 utilizando o GEO5-FEM.	81
Figura 5.41 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 03.	82
Figura 5.42 Análise de estabilidade para a seção 4.1 utilizando o GEO5-FEM.	83
Figura 5.43 Análise de estabilidade para a seção 4.2 utilizando o GEO5-FEM.	84
Figura 5.44 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 04.	85
Figura 5.45 Análise para a seção 1.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	87
Figura 5.46 Análise para a seção 1.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	88
Figura 5.47 Análise para a seção 1.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	89
Figura 5.48 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 01.	90
Figura 5.49 Análise para a seção 2.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	91
Figura 5.50 Análise para a seção 2.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	92
Figura 5.51 Análise para a seção 2.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	93
Figura 5.52 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 02.	94
Figura 5.53 Análise para a seção 3.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	95
Figura 5.54 Análise para a seção 3.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	96
Figura 5.55 Análise para a seção 3.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	97
Figura 5.56 Análise para a seção 3.4 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	98
Figura 5.57 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 03.	99

Figura 5.58 Análise para a seção 4.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	100
Figura 5.59 Análise para a seção 4.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.	101
Figura 5.60 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 04.	102
Figura 5.61 Análise comparativa entre os métodos.	103

Lista de tabelas

Capítulo 2

Referencial Teórico

Tabela 2.1 Parâmetros de resistência de pico de solos da Formação Barreiras (Severo, 2011).	29
---	----

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Tabela 4.1 Alturas correspondentes a cada seção.	43
Tabela 4.2 Amostras deformadas de acordo com a seção e parte da falésia.	44
Tabela 4.3 Fator de segurança mínimo em função do método e do grau de segurança necessário ao local (ABNT, 1991).	47
Tabela 4.4 Grau de estabilidade e intervalos de fatores de segurança.	47

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Tabela 5.1 Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.	54
Tabela 5.2 Parâmetros iniciais das amostras submetidas aos ensaios de cisalhamento.	58
Tabela 5.3 Parâmetros obtidos por outros autores para solos homogêneos (SC ou SM) da Formação Barreiras.	62
Tabela 5.4 Parâmetros obtidos por outros autores para solos heterogêneos (SC, SM ou CL) da Formação Barreiras.	63
Tabela 5.5 Parâmetros utilizados no programa GEO5.	64
Tabela 5.6 Resumo das análises por seção e método.	104

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DGPS	Sistema de Posicionamento Global em Modo Diferencial
c	Intercepto de coesão do solo
c'	Intercepto de coesão efetiva do solo
CL	Argila de Baixa Plasticidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNIT)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
e	Índice de Vazios do Solo
E	Módulo de deformação axial secante, módulo de deformabilidade ou módulo de Young
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEM	Finit Elements Method
FS	Fator de Segurança
Gs	Peso específico relativo dos grãos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEF	Método dos Elementos Finitos
ML	Silte de baixa compressibilidade
NBR	Norma Brasileira Registrada

NP	Não plástico
SC	Areia argilosa
SM	Areia Siltosa
SP	Areia mal graduada
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
u ou u_w	Poropressão
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
w	Teor de umidade
γ	Peso específico aparente
γ_w	Peso específico da água
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_s	Peso específico dos grãos
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
γ	Massa específica do solo
ν	Coeficiente de Poisson
σ_c	Tensão confinante efetiva ou confinante isotrópica
τ	Tensão cisalhante

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Relevância

As mudanças naturais e antrópicas que vêm ocorrendo na zona costeira em todo o mundo representam um dos grandes conflitos para a sociedade neste século. Esse conflito se torna mais evidente devido à elevada densidade populacional das cidades litorâneas, à crescente especulação turístico-imobiliária dessas áreas e às alterações climáticas que tendem a desencadear e acelerar os processos erosivos atuantes no litoral.

No Brasil, várias regiões da costa estão sofrendo modificações e processos erosivos intensos. No entanto, devido à diversidade das variáveis envolvidas e às variadas unidades geomorfológicas presentes no País, torna-se complexa a compreensão e análise do processo como um todo. Dessa forma, estudos regionais e locais são necessários para uma avaliação integral do fenômeno no Brasil.

Nesse contexto, o estado do Rio Grande do Norte possui uma região costeira formada por faixas de praia intercaladas por dunas e falésias, e percebe-se um aumento significativo dos problemas relacionados à erosão costeira e recuo de falésias. Tais mecanismos vêm sendo estudados na última década com o intuito de identificar os processos atuantes na zona costeira: no litoral oriental-norte, na praia de Pititinga, Rio do Fogo/RN por Lima (2010), no litoral oriental-sul, na praia de Pirangi, Parnamirim/RN por Nascimento (2009) e em Tibau do Sul/RN por Silva (2003), Braga (2005) e Severo (2005).

1.2 Justificativas

A área de estudo deste trabalho localiza-se na zona costeira do município de Baía Formosa/RN, no litoral oriental-sul do Rio Grande do Norte. Nesta região é verificada a presença de falésias vivas cujo recuo pode estar associado a processos erosivos costeiros e/ou a processos erosivos pluviais.

Essas falésias estão inseridas em ambientes costeiros que despertam o interesse e desenvolvimento de atividades turísticas devido à beleza e exuberância paisagística. Em função disso, há uma pressão antrópica intensa em relação ao uso e ocupação do solo

provocada pela indústria turístico-imobiliária. A implementação dessas atividades é bastante significativa para o desenvolvimento regional e local, contudo deve ser precedida de estudos técnicos, que proporcionem segurança, sustentabilidade ambiental e cumprimento das legislações ambientais e urbanísticas. Este trabalho se insere nesse contexto.

De fato, o passo mais importante para o sucesso de qualquer intervenção no sentido de proteger a linha de costa atual consiste na identificação dos processos instalados e de suas causas. Assim, neste estudo foram realizadas investigações de campo com intuito de analisar a morfologia e estabilidade dessas falésias, as quais poderão servir como base para o desenvolvimento de uma política de monitoramento costeiro e redução de riscos relacionados aos processos de recuo da linha de costa.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar a estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa/RN, através de investigações de campo, ensaios e análises computacionais.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar a morfologia das falésias e os processos erosivos dominantes;
- Identificar os mecanismos de movimento de massa atuantes;
- Realizar investigações de campo com o intuito de se definir aspectos relacionados às feições morfológicas das falésias, como altura, camadas constituintes, inclinação do talude e presença de vegetação;
- Caracterizar os materiais constituintes das falésias nessa zona costeira;
- Obter parâmetros geotécnicos de resistência para os solos das falésias;
- Subsidiar políticas de monitoramento costeiro e de controle do recuo da linha de costa;
- Analisar a estabilidade das falésias utilizando software GEO5[®] utilizando os módulos baseados no Método dos Elementos Finitos e Métodos de Equilíbrio-Limite;
- Determinar e avaliar graus de estabilidade baseados nos fatores de segurança obtidos nas análises de acordo com a proposta metodológica.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

2.1 Apresentação

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que serviu como base para o desenvolvimento da pesquisa. A revisão foi dividida em quatro partes: na primeira, são apresentadas informações sobre origem, formação e constituição de falésias; na segunda, abordam-se aspectos relacionados a processos erosivos e estabilidade de encostas; na terceira parte, são tecidos comentários a respeito dos métodos de análise de estabilidade de encosta; e na última parte, discutem-se metodologias e resultados de vários trabalhos relacionados ao tema.

2.2 Falésias

Falésias são taludes íngremes (desníveis abruptos) formados principalmente pela ação erosiva do mar. Na região estudada, a paisagem costeira também é formada por estas feições geomorfológicas. As falésias estão distribuídas ao longo da linha de costa a partir de uma grande variedade de formas, características, coloração e perfis. Atualmente essas feições sofrem diversos impactos ambientais ocasionados pela indústria do turismo que impulsiona a especulação imobiliária.

Segundo SUGUIO (1998), falésias podem ser definidas como acantilados de faces abruptas formados pela ação erosiva (abrasão) das ondas sobre as rochas. Quando a falésia se encontra em processo de erosão contínua pode-se falar em falésia marinha ativa (viva), enquanto que quando cessa a erosão tem-se a falésia marinha inativa (morta).

De um modo geral, as falésias no Nordeste são formadas por sedimentos pré-quadernários da Formação Barreiras. Sendo esta a unidade geológica de ocorrência mais expressiva da costa brasileira (ARAÚJO *et al.*, 2006). A Formação Barreiras é constituída por sedimentos neogênicos de origem predominantemente continental a litorânea, arenosos e argilosos e de cores variegadas, que se distribuem ao longo do litoral brasileiro desde o Amapá até o Rio de Janeiro (SUGUIO & NOGUEIRA, 1999).

2.3 Processos erosivos e estabilidade de encostas

2.3.1 Tipos de movimentos de massa

Os tipos de movimento de massa geralmente encontrados já são amplamente consolidados na literatura de engenharia geotécnica. Em linhas gerais os movimentos de massa podem ser: escoamentos, escorregamentos, tombamentos, quedas e erosão. GUIDICINI & NIEBLE (1983) conceituam esses movimentos de massa e apresentam singularidades para cada tipo.

Nos escoamentos, o material em movimento comporta-se como um fluido viscoso. Quando o movimento é muito lento, caracteriza-se o tipo de escoamento denominado de rastejo. A identificação do processo de rastejo pode ser feita em campo através da presença de árvores, postes e outros objetos inclinados, ou pela existência de trincas em construções. Já quando a velocidade do movimento é muito elevada (baixa viscosidade) o escoamento é denominado corrida.

Os escorregamentos ou deslizamentos são movimentos rápidos de duração relativamente curta. Caracterizam-se pela formação de uma superfície de ruptura bem definida, onde há uma grande concentração de tensões cisalhantes. Podem ser rotacionais ou translacionais, dependendo da forma da superfície de ruptura.

As quedas consistem na separação do material da encosta, seguido de queda livre e acúmulo no pé do talude, com ausência de superfície de movimentação. Comumente, os movimentos são muito rápidos e podem ou não ser precedidos por movimentos menores que levam à separação progressiva do seu local de origem. Durante o percurso da queda, o material pode atingir outros pontos da encosta deflagrando novas quedas. Ocorrem frequentemente em taludes íngremes e é um dos mecanismos de formação de depósito de tálus.

Nos tombamentos, o material instável gira em torno de um ponto na sua base. As quedas e os tombamentos de materiais normalmente estão associados a encostas íngremes, rochosas e com padrão de fraturamento que proporcione a compartimentação do maciço na forma de blocos.

A erosão pode ser definida como a destruição mecânica do solo com remoção de material por água corrente. A erosão pode ser de origem pluvial, causada por precipitação pluviométrica, escoamento superficial e subsuperficial, ou também pode ser de origem

costeira, provocada pela ação das ondas na base da encosta, denominada de solapamento ou incisão basal.

A erosão pluvial pode ser dividida em laminar (sulcos e entresulcos), ravina e voçoroca. A diferença entre eles é que no processo laminar a água transporta as partículas do solo sem formação de canais ou apenas por pequenos canais (sulcos). A evolução dos processos erosivos nesses sulcos provoca o surgimento de ravinas e aprofundamento das ravinas pode levar à formação de voçorocas.

A erosão por solapamento na base da encosta se dá através do ataque direto das ondas e correntes marinhas, o qual ocorre nas falésias vivas, onde ocorre a diminuição do volume de sedimentos que protegem a base da encosta. Isso eleva o poder erosivo das ondas e a formação de incisões na base da falésia, o que pode provocar a instabilidade da parte superior do maciço. Isso pode provocar escorregamentos, quedas e tombamentos do material instável da parte elevada da encosta.

Quando o processo de instabilização de uma encosta resulta da combinação de diferentes tipos de movimento e se caracterizam por movimentos múltiplos ou sucessivos é denominado complexo.

2.3.2 Erosão costeira e recuo de falésias

Grande parte dos estudos nessa área são classificados como complexos e a maioria são pouco conclusivos devido ao grande número de incógnitas envolvidas e da variabilidade espaço-temporal existente nos processos dinâmicos costeiros. SILVA (2003) comenta sobre vários aspectos relevantes das variáveis analisadas, como morfologia da área, compreensão dos processos instaurados, propriedades geotécnicas dos materiais que constituem as falésias e taxas de recuo. Ainda relaciona outras interferências, as quais podem ser provocadas por agentes externos de origem continental (condições meteorológicas, mudanças nas tensões no interior do maciço devido a sobrecargas, etc.) e por agentes de origem marinha (morfologia da plataforma de costa, ação de ondas e marés, etc).

Em se tratando de falésias vivas ou ativas, os processos envolvidos são bastante correlacionados devido à atuação simultânea da erosão pluvial e costeira. A questão é tão complexa que não se pode garantir que um fenômeno como a ação de ondas na base de uma falésia provoque a sua ruptura, como também não é possível afirmar que essa ação provoque o aumento ou decréscimo da resistência dos materiais constituintes da falésia.

Por outro lado, não é possível analisar recuo de falésias sem compreender os mecanismos envolvidos em campo. Ao se analisar taxas é importante se ter em mente que esse recuo pode ter ocorrido em um único evento de escorregamento ao longo de um determinado tempo ou em sucessivos processos de quedas e tombamentos no mesmo período. Sem dúvida, essa questão é imprevisível, afinal pode-se supor que sucessivas quedas podem continuar ocorrendo nos anos seguintes, o que corresponde à taxa de recuo determinada. Ao contrário, podem não ocorrer mais eventos de deslizamentos na falésia, sendo a taxa de recuo adotada não representativa para aquela encosta.

É necessário compreender os processos erosivos atuantes em falésias em cada região específica, já que cada região possui suas peculiaridades. A partir desses levantamentos regionais é possível partir para análises de taxas de recuo e de risco.

Em linhas gerais, os processos atuantes em falésias são diversos e foram ilustrados no esquema elaborado por CASTEDO *et al.* (2012) (Figura 2.1).

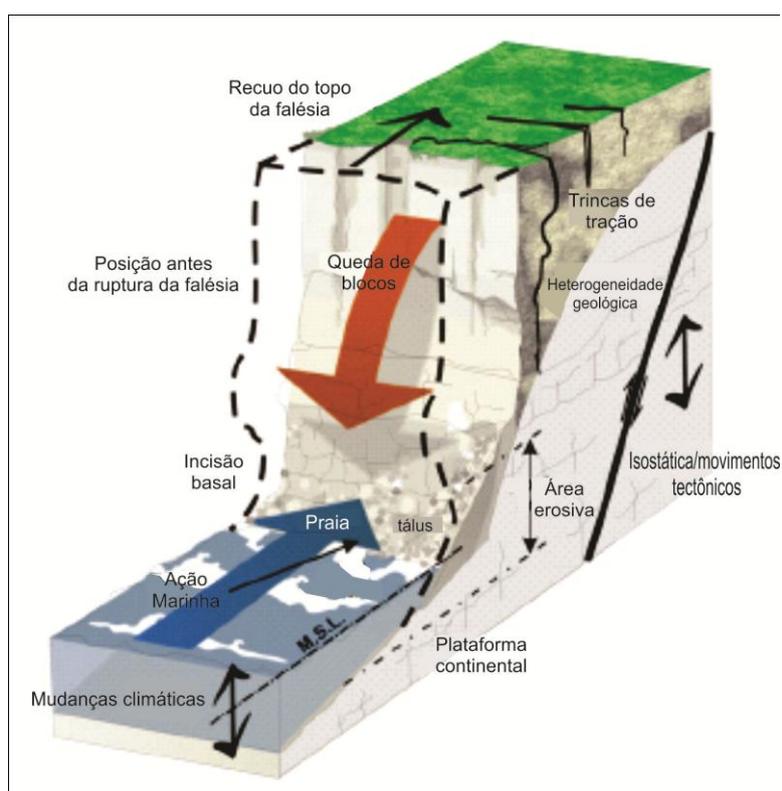


Figura 2.1 Segmento de falésia em 3D, representando os processos geomorfológicos e erosivos. Modificado de CASTEDO et al (2012)

Na Figura 2.1 é possível visualizar os diversos processos atuantes em falésias, desde quedas de blocos e formação de depósitos de tálus aos efeitos das mudanças climáticas como a elevação do nível do mar e geológicas como a movimentação tectônica.

As falésias em áreas do litoral sul do Rio Grande do Norte podem ser classificadas quanto à geometria em três configurações típicas, como mostra a Figura 2.2 (SANTOS JR *et al.*, 2008). A falésia com perfil do tipo 1 possui talude vertical ao longo de toda a sua altura. A falésia com perfil tipo 2 apresenta-se com uma parte inferior vertical e uma parte superior com inclinação com a horizontal em torno de 45° a 60°. A falésia de perfil 3 apresenta talude com inclinação no pé em torno de 40° a 50° com a horizontal.

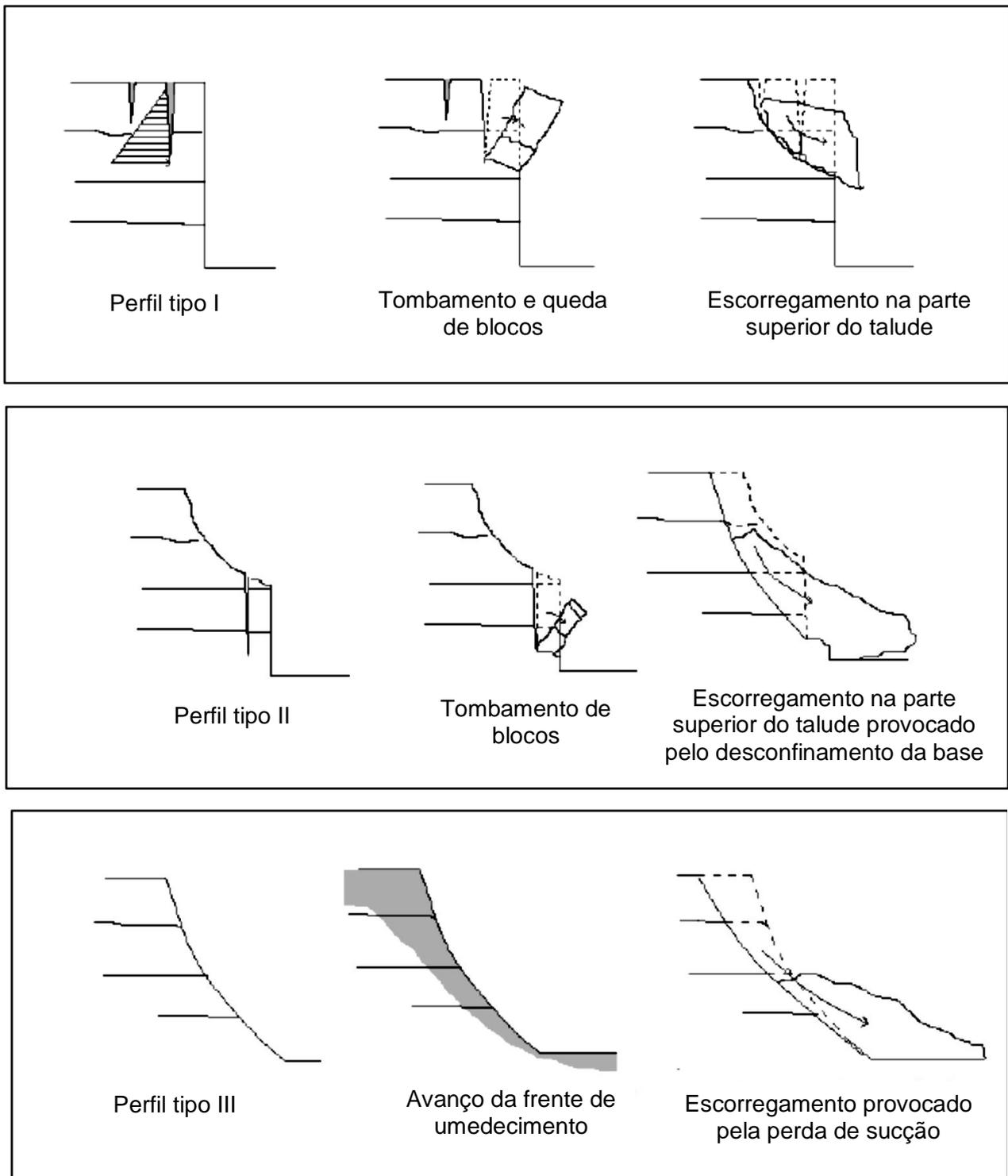


Figura 2.2 Perfis tipo de falésias na Zona Costeira de Tibau do Sul/RN. (SANTOS JR. *et al.*, 2008)

Com respeito à estabilidade as falésias com perfil 1 apresentam elevada susceptibilidade à ocorrência de quedas e tombamentos de materiais e a escorregamentos na parte superior da encosta. As falésias do tipo 2 são susceptíveis a ocorrência de quedas e tombamentos do material da parte inferior pelo fato de possuírem talude vertical neste setor. A parte superior pode também sofrer escorregamentos pela falta de confinamento na base do talude e por causa de erosões na face inclinada superior. Apesar de serem mais estáveis que as demais, as falésias com perfil 3 podem sofrer escorregamentos e erosão na face do talude.

Além desses perfis e movimentos de massa típicos identificados por SANTOS JR *et al.*(2008), ainda existe perfis submetidos a processos de erosão basal.

Em relação à linha costeira, já é de conhecimento amplo que ela obedece a uma dinâmica contínua que ocorre ao longo de milhares de anos. Diversos fenômenos interferem nessa dinâmica costeira: a elevação do nível do mar, déficit no transporte de sedimentos, as tempestades e as intervenções antrópicas na zona costeira.

Em sua pesquisa, BRAGA (2005) ressalta que a dinâmica costeira compreende basicamente dois processos: o acréscimo e o recuo da costa. O acréscimo se dá quando a faixa de praia começa a avançar em direção ao oceano, devido a maior chegada de sedimentos advindos das correntes marinhas em relação a sua retirada. Se a faixa de praia estiver sofrendo um recuo em direção ao continente significa que está havendo uma maior retirada de material da praia, este processo também é conhecido como erosão costeira – o recuo da linha de costa em direção ao continente, caso contrário dá-se o nome de progradação ou acréscimo de praia.

Em geral, os processos de erosão costeira causam maiores impactos em áreas com maior densidade populacional, onde se acentua a ocupação da faixa costeira que em anos mais remotos eram submetidas à ação do mar. Conseqüentemente, com o recuo da linha de costa, ocorre a destruição das edificações construídas nessa área. Diversas medidas estruturais, que são as que necessitam de obras de engenharia para o controle da erosão, e não-estruturais, que são aquelas que utilizam instrumentos de planejamento urbano para controlar e inibir a ocupação dessas áreas, são tomadas para minimizar os efeitos dos processos erosivos costeiros. Dentre as medidas estruturais, estão os espigões, os quebra-mares, engordamento ou alimentação artificial das praias, paredões (obras longitudinais aderentes), etc. Enquanto as não estruturais compreendem legislações de uso e ocupação do solo, zoneamento ambiental e costeiro, plantio de vegetação, educação turística e ambiental, etc.

2.4 Considerações sobre os métodos para análise da estabilidade de taludes

A primeira definição que deve existir em uma análise de estabilidade de encostas diz respeito ao princípio do método. Existem métodos baseados no equilíbrio-limite, em modelos físicos e em modelos matemáticos. A escolha do princípio está intimamente relacionada ao escopo da pesquisa, a depender das variáveis consideradas e dos objetivos do trabalho.

A análise baseada no método de equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são equilibradas pelos esforços resistentes. O método é o mais consolidado no meio técnico atual devido ao seu grau de simplificação e aplicabilidade. O equilíbrio-limite admite como hipótese a existência de uma linha de escorregamento conhecida (plana, circular, espiral logarítmica ou mista), a qual delimita acima dela a porção instável do talude, associada a um critério de resistência, normalmente o de Mohr-Coulomb.

Os métodos de equilíbrio-limite podem ser subdivididos em dois grupos principais:

- Métodos que consideram o corpo livre por inteiro – consideram a porção instável acima da superfície potencial de ruptura como um único corpo, adotando como hipótese a distribuição de tensões normais ao longo dessa superfície.
- Métodos que dividem a porção instável em fatias ou lamelas – Dividem a porção instável acima da superfície potencial de ruptura em várias porções menores (lamelas), considerando as interações existentes entre as lamelas de modo diferenciado, a depender do método. Os principais métodos utilizados pertencem a esse grupo, destacando-se, os métodos de Fellenius, Bishop, Janbu, Correia, Spencer e Morgenstern & Price.

A aplicação dos métodos de equilíbrio limite às análises de estabilidade de taludes pode suscitar algumas dúvidas quanto à razoabilidade dos seus resultados devido às simplificações teóricas adotadas. A partir dessas incertezas procurou-se desenvolver outros tipos de análises que possibilitassem incorporar as relações tensão-deformação dos solos, como é o caso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

De acordo com SILVA (2011), a utilização dos métodos de equilíbrio limite na análise da estabilidade de taludes revela-se satisfatória em comparação com o recurso ao método dos elementos finitos quando o maciço tem constituição homogênea. Entretanto, no caso de o maciço ser formado por vários estratos, os fatores de segurança obtidos

com os métodos de Correia e Morgenstern-Price são significativamente distintos dos obtidos por elementos finitos, e tendem a superestimar a resistência do talude.

Na sua pesquisa, SILVA (2011) propôs efetuar uma comparação de resultados obtidos através de métodos baseados na Teoria de Equilíbrio Limite e Método dos Elementos Finitos. Para isso, o autor desenvolveu um programa em Matlab de cálculo da estabilidade de taludes, designado por TALUDES_Mv1, onde implementou os métodos de Morgenstern-Price (1965) e de Correia (1988), considerados na bibliografia como métodos rigorosos, uma vez que garantem todas as condições de equilíbrio.

As análises de estabilidade de taludes baseados em modelos matemáticos tendem cada vez mais a se destacar em relação às análises baseadas no equilíbrio-limite. Isso porque, atualmente, aquelas estão sendo associadas a modelos e softwares computacionais. Na realidade, já existem vários softwares específicos para esse fim os quais se baseiam no Método dos Elementos Finitos. As principais dificuldades para a aplicação desse método estão na obtenção de parâmetros e na aferição dos modelos.

No MEF aplicado à análise de estabilidade de taludes são calculadas tensões e deformações unitárias em vários pontos constituintes do maciço através das teorias da Elasticidade e Plasticidade. O cálculo pode ser realizado considerando diversos aspectos como anisotropia, heterogeneidade, não-linearidade da curva tensão-deformação do material, influência do estado de tensão inicial, carregamentos, etc.

Os estudos em modelos físicos fornecem parâmetros relacionados ao padrão de comportamento específico. Nesses modelos, as informações quantitativas quanto à estabilidade de taludes devem ser tratadas com restrições visto que, em geral, há simplificações e não são consideradas todas as combinações possíveis. As análises com essa fundamentação são muito importantes, no entanto, não passam de modelos geométricos limitados a uma situação problema determinada, e, portanto, não pode ser extrapolada sem estudos aprofundados. Por outro lado, servem para aferição de análises baseadas em modelos matemáticos.

2.5 Módulo GEO5 – FEM

2.5.1 Métodos de solução iterativos

As informações aqui apresentadas estão presentes no guia do usuário do software Geotechnical Software Suite (GEO5, 2013). O módulo deste programa (GEO5 – FEM) serve para analisar problemas geotécnicos caracterizados pela resposta não-linear do solo ou do maciço rochoso.

Para uma análise bem sucedida da maioria desses casos há a necessidade de uma solução iterativa a partir de determinadas condições. Assim, ao aplicar o método dos elementos finitos se conduz a uma forma incremental para satisfazer as condições de equilíbrio do sistema, descrita como:

$$K_T \cdot \Delta u = \Delta f \quad (2.1)$$

Onde:

K_T - Matriz de rigidez instantânea

Δu - Vetor de incremento dos deslocamentos dos nós

Δf - Vetor de incremento das forças desestabilizadoras

Esta equação pode ser resolvida utilizando um método numérico apropriado. O objetivo do método é o de atingir, durante o processo de iteração, um estado de tensão e deformação, que satisfaça a condição $\Delta f = 0$. Para isso, o programa oferece dois métodos básicos:

1. Método Newton-Raphson (NRM)
2. Método do Comprimento do Arco (ALM)

2.5.1.1 Método de Newton-Raphson

Este método é um dos mais utilizados para resolução do sistema de equações de equilíbrio não lineares e a configuração padrão do software. É um método incremental e iterativo, e, no caso geral, é realizado o controle de cargas, ou seja, aplica-se em cada etapa um incremento de carga e calcula-se o incremento de deslocamento.

Para uma determinada iteração “i” de uma etapa “e”, faz-se:

$$[K]_{i-1} \{\Delta U\}_i = \{\psi\}_{i-1} \quad (2.2)$$

onde:

$[K]_{i-1}$ – é a matriz de rigidez da iteração “i-1”

$\{\psi\}_{i-1}$ y é o vetor de forças residuais dado por:

$$\{\psi\}_{i-1} = \{F\}_e - \{R\}_{i-1} \quad (2.3)$$

Ao final da iteração calcula-se:

$$\{U\}_i = \{U\}_{i-1} + \{\Delta U\}_i \quad (2.4)$$

Com os deslocamentos calculam-se as deformações, tensões, vetor de esforços internos $\{R\}_i$ e a nova matriz de rigidez, $[K]_i$.

Com o vetor de esforços internos calcula-se o novo vetor de forças residuais:

$$\{\psi\}_i = \{F\}_e - \{R\}_i \quad (2.5)$$

A solução do processo procura reduzir o vetor de forças residuais, e consequentemente $\{\Delta U\}$, para zero.

No GEO5 - FEM, o processo de iteração pode ser aplicado pela definição dos seguintes parâmetros:

Fator de relaxamento - representa o valor de redução da fase da carga atuante para o seu reinício até fornecer uma solução que deixe de convergir. Um novo valor do carregamento para a etapa é encontrado a partir da expressão:

$$\text{Carga do novo passo} = \text{Carga do passo anterior} / \text{Fator de relaxamento} \quad (2.6)$$

Número Máximo de Relaxamentos *para um passo de carregamento simples* - este parâmetro determina quantas vezes é possível utilizar a ação acima, durante toda a análise. Ao se exceder este valor o programa termina a análise e os resultados são validados para o último nível de carregamento que convergiu com êxito.

Número Mínimo de Iterações *para um passo de carregamento simples* - este parâmetro permite a possível aceleração da análise. Em particular, fornece o número de iterações para que a convergência no último passo do carregamento seja menor que a mínima de um grupo. A etapa de carregamento para um novo acréscimo de carga é realizada da seguinte maneira:

$$\text{Carga do novo passo} = \text{Carga do passo anterior} \times \text{Fator de relaxamento} \quad (2.7)$$

O Método de Newton-Raphson pode ser executado de três modos distintos: o primeiro é o Método de Newton-Raphson Padrão no qual a matriz de rigidez é atualizada a cada iteração. O segundo é o Método Newton-Raphson modificado, onde a matriz de rigidez é atualizada apenas no início de cada etapa, mas permanece constante nas iterações. E, o terceiro, é o Método de Newton-Raphson com rigidez inicial, em que a matriz de rigidez inicial, elástica, é utilizada em todas as etapas.

2.5.1.2 Método do Comprimento do Arco

Em problemas que apresentam uma solução não linear, o Método de Newton-Raphson, com controle de cargas, apresenta uma desvantagem, pois se torna ineficiente quando o caminho de equilíbrio apresenta ponto limite. Pode-se utilizar ao invés de cargas prescritas, o deslocamento prescrito, onde o parâmetro de controle é o deslocamento aplicado, no qual se define o nível de deslocamento, encontrando-se a carga de equilíbrio. No entanto, esta técnica também apresenta uma desvantagem, a convergência no processo iterativo é bem mais lenta e às vezes não é possível atingir a convergência (STRAMANDINOLI, 2007).

Assim, outros métodos para a solução de equações não lineares foram desenvolvidos, nos quais torna-se possível obter todo o caminho de equilíbrio, mesmo existindo pontos limites. Um dos métodos para a solução desse tipo de problema é o Método do Comprimento do Arco.

O método de comprimento de arco (ALM) é um método relativamente robusto, especialmente adequado para a solução de problemas que requerem a busca da carga de colapso da estrutura. Análise de estabilidade de estruturas de terra (encostas, aterros) é apenas um exemplo particular de tal tarefa. Ao contrário do Método de Newton Raphson, onde a solução é conduzida exclusivamente por prescrição incrementos de carga, o ALM apresenta um parâmetro adicional que representa certa restrição no valor de incremento de carga num determinado patamar de carga. O valor do patamar de carga depende, assim, do curso da iteração e está diretamente relacionado com o comprimento do arco selecionado.

O pressuposto básico do método é que a carga prevista varie proporcionalmente durante o cálculo. Isto significa que um determinado nível da carga aplicada possa ser expressa como:

$$\bar{F} = \lambda.F \quad (2.8)$$

onde:

\bar{F} – fração atual da carga total aplicada

λ – coeficiente de proporcionalidade

F – carga total prevista

Observe que neste método, o vetor de carga F representa apenas uma carga de referência, que é mantido constante até a resposta da análise. O valor atual da carga no fim do cálculo é equivalente ao λ múltiplo de F; $\lambda < 1$ representa o estado em que a capacidade de carga atual de uma estrutura é menor do que a carga de referência prevista; se $\lambda > 1$, o programa ajusta automaticamente o comprimento do arco a fim de que a solução convirja para um valor $\lambda = 1$, dentro de uma determinada tolerância igual a 0,01 (1% da carga máxima aplicada), o qual não pode ser alterado.

A literatura apresenta uma série de formulações do Método do Comprimento do Arco. O programa dá suporte ao método proposto por Crisfield e o método proposto por Ramm. O último é consideravelmente mais simples, pelo menos do ponto de vista da formulação, do que o método Crisfield. Por outro lado, é supostamente menos rigoroso, sendo o método Crisfield utilizado na configuração padrão do programa.

2.5.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Na análise de estabilidade (Fator de Segurança) o programa reduz os parâmetros de resistência iniciais - ângulo de atrito interno e a coesão - até a ruptura ocorrer. A análise então resulta em um Fator de Segurança correspondente aos métodos clássicos de equilíbrio limite.

A análise do Fator de Segurança requer o uso de elementos de seis nós, e como o escorregamento plástico é o principal mecanismo de ruptura também é requerido a utilização dos critérios de Mohr-Coulomb, Mohr-Coulomb modificado ou Drucker-Prager para todos os solos.

No modo de análise de estabilidade as variáveis avaliadas para representação gráfica são os deslocamentos (nas direções Z e X), as tensões totais e efetivas e a deformação do maciço. Aliás, a deformação de um corpo de solo corresponde ao estado de ruptura reduzido até atingir determinados parâmetros do solo, portanto, não correspondem ao estado real da deformação do maciço. Entretanto, em geral, ela fornece uma visão razoável, da resposta de toda a estrutura do solo da encosta no início da ruptura.

Uma maneira adequada de apresentar os resultados da análise de estabilidade são os vetores de deslocamentos plotados juntamente com a deformação plástica equivalente. A deformação plástica localizada fornece a possível localização da superfície crítica de escorregamento (Figura 2.3).

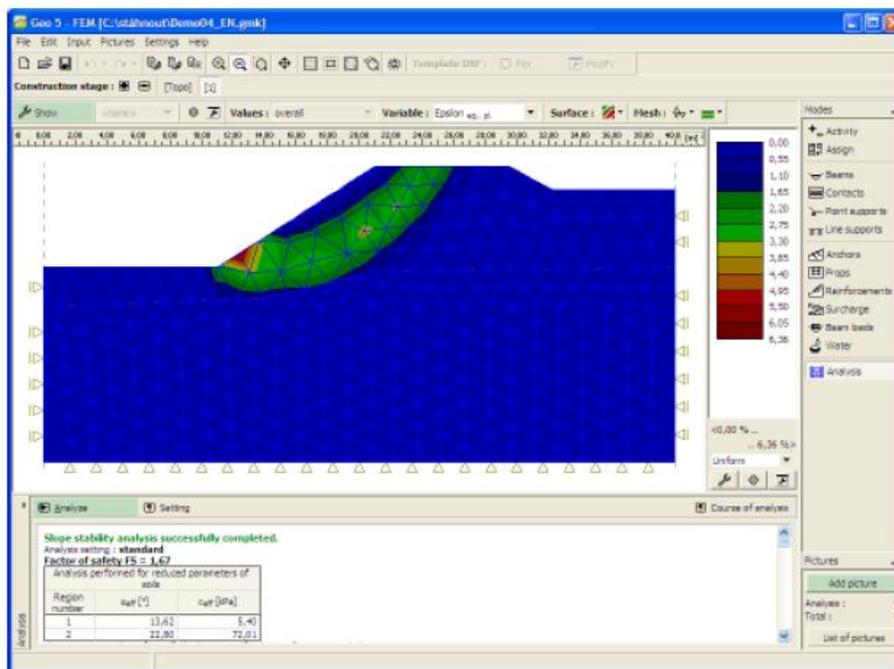


Figura 2.3 Representação dos resultados através do GEO5 - FEM. (GEO5, 2013)

2.6 Módulo GEO5 – Estabilidade de Taludes

Este módulo do programa é utilizado para a análise de estabilidade de taludes baseada em métodos de equilíbrio limite. O módulo disponibiliza 06 métodos de análise, sendo 03 generalizados aplicados tanto a superfícies de escorregamento circulares ou poligonais, 01 aplicado a superfícies poligonais e 02 a superfícies circulares.

Os métodos que consideram a superfície poligonal são os métodos de Sarma, Janbu, Spencer e Morgenstern & Price; e os que consideram superfícies de escorregamento circulares são os de Bishop, Fellenius/Peterson, Morgenstern & Price, Spencer e Janbu.

A seguir são tecidas algumas considerações sobre os métodos baseados no equilíbrio limite utilizados no módulo de Estabilidade de Taludes do software GEO5. As informações são amplamente consolidadas na literatura e foram fundamentadas a seguir, principalmente, a partir do descrito por GUIDICINI & NIEBLE (1983), FIORI & CARMIGNANI (2009), GERSCOVICH (2012), e inclusive do próprio manual do software, GEO5 (2013).

2.6.1 Métodos aplicados a superfícies de escorregamento poligonais

A solução do problema de estabilidade de taludes que considera a superfície de escorregamento poligonal baseia-se na determinação do estado limite das forças que atuam sobre o corpo do solo acima da superfície de escorregamento. Para introduzir essas forças acima dessa superfície é necessária a subdivisão do corpo de solo em blocos representados por planos denominados de lamelas (fatias). Normalmente, essas fatias são representadas na vertical, mas isto não é uma condição necessária, por exemplo, o Método de Sarma geralmente considera planos inclinados.

A Figura 2.4 mostra as forças que atuam sobre cada fatia de solo. Com a região acima da superfície de escorregamento dividida em fatias, para a análise das incógnitas, tem-se:

N_i - Forças normais atuantes em cada fatia;

T_i - Forças de cisalhamento atuantes em cada fatia;

E_i - Forças normais entre as fatias;

X_i - Forças de cisalhamento entre as fatias;

z_i - Pontos de aplicação da forças E_i ;

l_i - Ponto de aplicação das forças N_i ;

FS - Fator de Segurança.

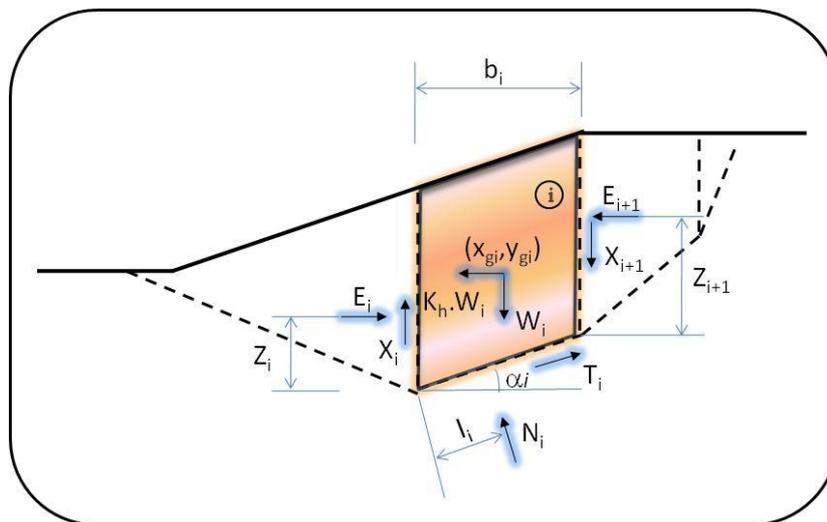


Figura 2.4 Representação das variáveis existentes considerando uma superfície de escorregamento poligonal.

Método de Sarma

O método de Sarma está inserido na categoria dos métodos gerais de fatias baseados nos estados limites. O método se baseia no atendimento das condições de equilíbrio de forças e de momento em cada fatia. As fatias são definidas através da divisão da região acima da superfície do solo potencial de escorregamento por planos que podem ter, em geral, uma inclinação diferente. As forças que atuam individualmente nas fatias são apresentadas na Figura 2.5.

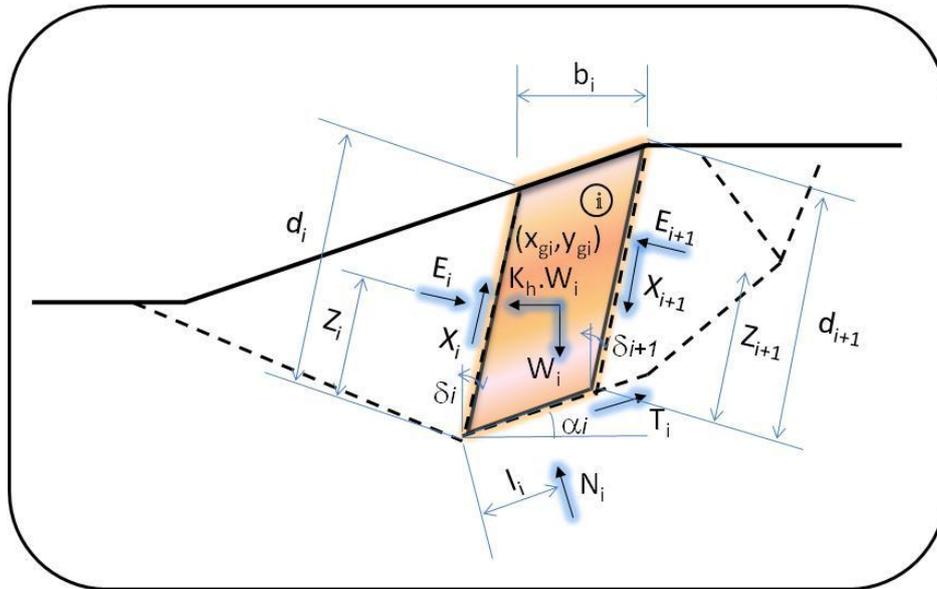


Figura 2.5 Esquema estático – Método de Sarma.

O método assume inicialmente um fator de aceleração horizontal (K_h), o qual é proporcional a aceleração da gravidade. Com isso considera-se uma força horizontal $K_h \cdot W_i$, capaz de instabilizar o talude, onde W_i é o peso da massa e K_h o fator de aceleração horizontal. A força $K_h \cdot W_i$ é interna da mesma forma que o peso (W_i) da massa.

O método consiste em determinar valores de K_h em função de FS e, por extrapolação, determina-se tanto o fator de aceleração crítico K_c , correspondendo ao $FS=1$, ou o coeficiente de segurança estático (FS) correspondente a $K_h = 0$.

O método é classificado como rigoroso e apresenta as vantagens de não ter problemas de convergência e de não exigir o uso de programas computacionais, sendo aplicado através do uso de planilhas eletrônicas. O fator de segurança é determinado iterativamente.

Utilizam-se as equações de equilíbrio horizontal e vertical, além do equilíbrio de momentos de cada fatia. A indeterminação associada ao problema de estabilidade é solucionada assumindo-se:

i) determinada distribuição das forças cisalhantes (X_i) entre fatias, a qual é definida como função dos parâmetros de resistência.

ii) os esforços na base da fatia atuam no seu ponto médio

Método de Janbu

Janbu desenvolveu um método rigoroso, o qual satisfaz todas as equações de equilíbrio, sendo utilizado quando as superfícies de escorregamento não são necessariamente circulares. As forças que atuam em cada fatia são mostradas na Figura 2.6.

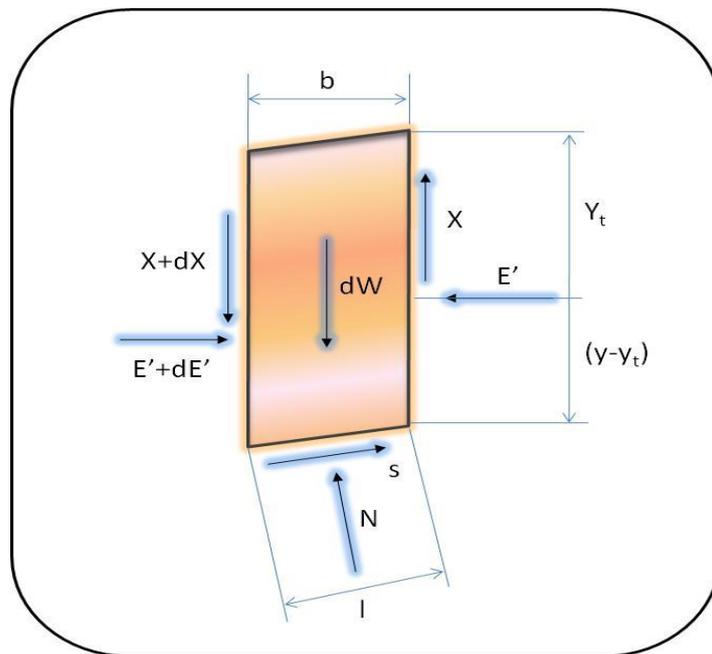


Figura 2.6 Esforços em uma fatia – Método de Janbu.

Usando o equilíbrio de forças horizontais como critério de estabilidade para toda a massa, Janbu definiu o fator de segurança como:

$$FS = \frac{\sum b \left[c' + \left(\frac{W+dX}{b} - u \right) \tan \phi' \right]}{dE + \sum [dx(W+dX) \tan \alpha]} \cdot \frac{1}{n_\alpha} \quad (2.9)$$

Onde:

$$n_\alpha = \frac{1 + (1/FS) \tan \phi' \cdot \tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \quad (2.10)$$

Assim, ao substituir o n_α na equação 2.5, percebe-se o fator de segurança será calculado de forma iterativa, pois aparecerá em ambos os lados da equação.

As forças entre fatias são calculadas a partir das equações:

$$dE = (W + dX) \tan \alpha - (c' + (W + dX - u) \tan \phi) \frac{b}{n_{\alpha} FS} \quad (2.11)$$

$$X = -E \tan \theta + (y - y_t) \frac{dE}{b} \quad (2.12)$$

Onde $(y - y_t)$ é a posição da linha de empuxo e θ , a inclinação dessa resultante.

Método de Spencer

O método de Spencer é considerado rigoroso, pois se propõe a satisfazer todas as equações de equilíbrio, além de não desprezar as forças interlamelares. A Figura 2.7 descreve a geometria e os esforços atuantes na fatia.

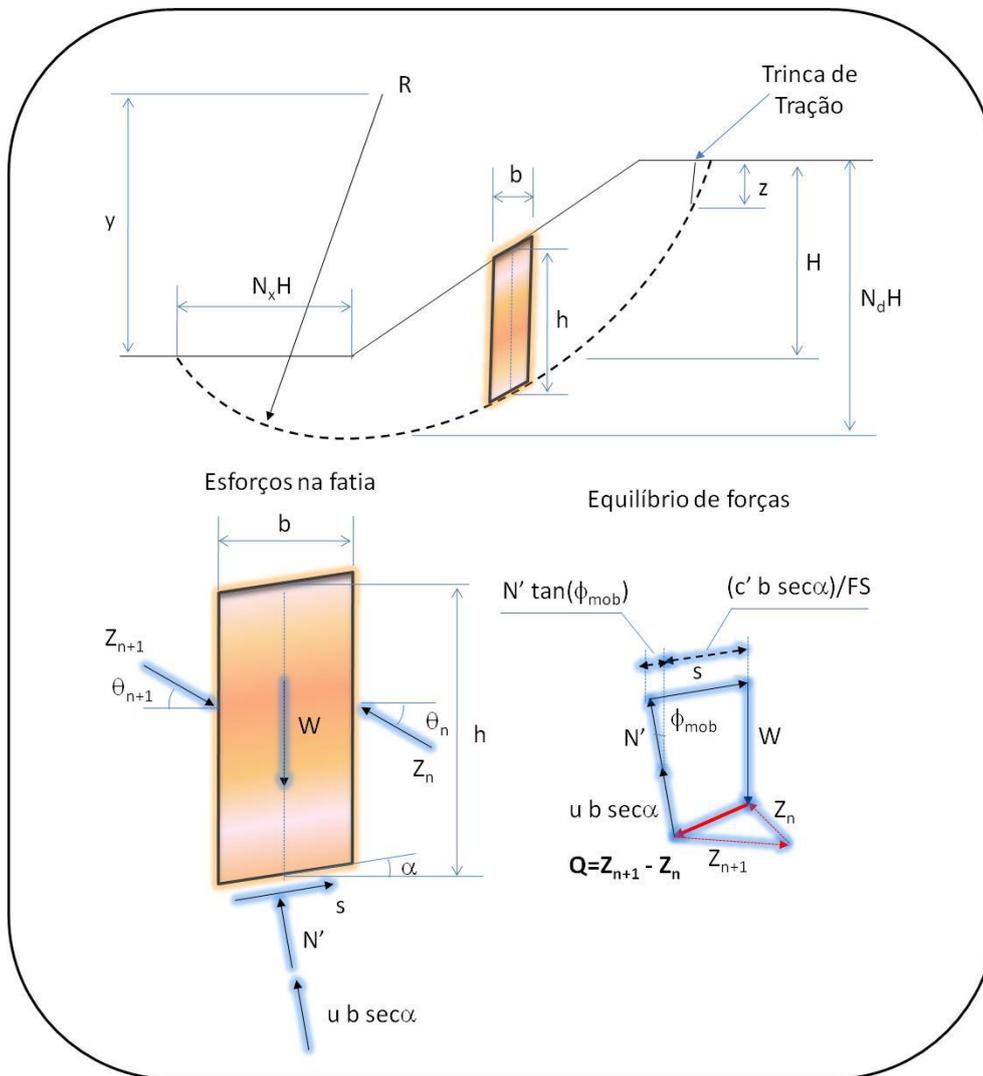


Figura 2.7 Esquema estático – Método de Spencer.

As seguintes hipóteses foram introduzidas no Método de Spencer para calcular a equiíbrio limite de forças e momentos em fatias individuais:

- Os planos de divisão entre as fatias são sempre verticais;
- O método admite a existência de trinca de tração;
- A resultante Q é definida em termos totais, isto é, incorpora a parcela efetiva e a pressão da água atuante em cada fatia;
- As forças interlamelares têm uma inclinação constante;
- Para garantir o equiíbrio, a resultante das forças interlamelares (Q) passa pelo ponto de interseção das demais forças atuantes (W, N' e S).

A partir do equiíbrio de forcas nas direções paralela e normal a base da fatia chega-se a equação da resultante Q.

$$Q = \frac{\frac{c'b}{FS} \sec \alpha + \frac{\tan \phi'}{FS} (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left\{ 1 + \frac{\tan \phi'}{FS} \tan(\alpha - \theta) \right\}} \quad (2.13)$$

A expressão resultante Q também incorpora o fator de segurança, dessa forma, também é necessário utilizar um processo iterativo para o cálculo do FS final.

Para superar o problema de desequiíbrio entre o número de equações e de incógnitas, Spencer sugeriu adotar um valor de inclinação θ constante para todas as fatias.

Método de Morgenstern & Price

O método de Morgenstern & Price também se aplica a uma superfície qualquer e considera fatias infinitesimais para a análise da estabilidade do talude. Os esforços atuantes nessas fatias estão representados na Figura 2.8.

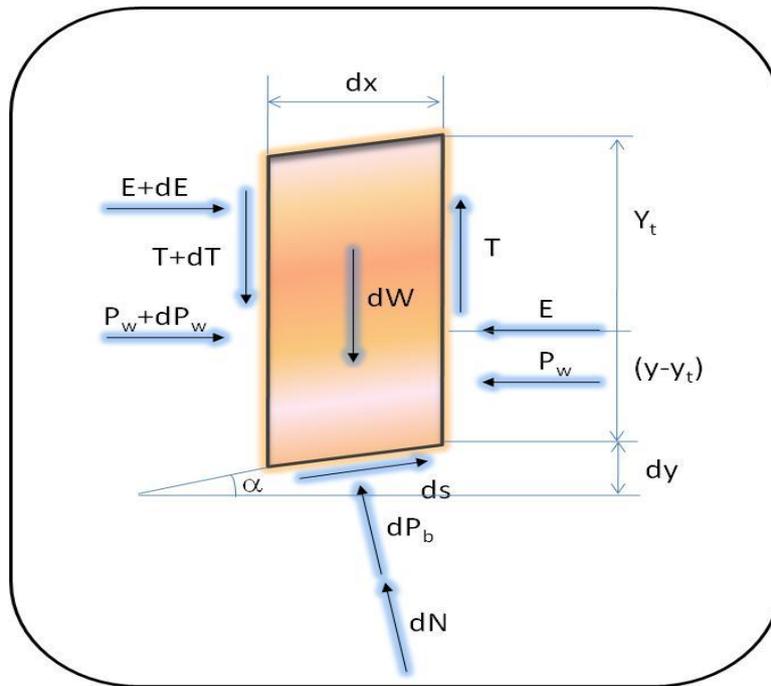


Figura 2.8 Esforços em uma fatia – Método de Morgenstern & Price.

Ao contrário dos demais métodos rigorosos que estabelecem uma relação constante entre as forças entre atuantes nas fatias, Morgenstern e Price assumem que a inclinação da resultante (θ) varia, segundo uma função, ao longo da superfície de ruptura, ou seja:

$$\tan \theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad (2.14)$$

Onde $f(x)$ é uma função arbitrária contínua e λ é um fator escalar determinado a partir da solução de cálculo do FS. A escolha de $f(x)$ pode ser avaliada considerando a distribuição tensão normal sobre os limites entre fatias. Em geral é utilizada a função arco de seno, pois segundo os autores do método é a função que menos influencia no valor final do fator de segurança. Quando se utiliza $f(x)=0$, a solução para FS torna-se idêntica à determinada pelo método de Bishop, e quando $f(x)=$ constante, o resultado torna-se idêntico ao método de Spencer.

O método de Morgenstern & Price é solucionado iterativamente, definindo-se previamente a função de distribuição de forças entre fatias, assumindo-se valores para FS e λ e calculando-se as forças e momentos para cada fatia.

2.6.2 Métodos aplicados a superfícies de escorregamento circulares

Todos os métodos de equilíbrio limite assumem que o corpo de solo acima da superfície de escorregamento é subdividido em lamelas (o plano de divisão entre as fatias estão sempre na vertical). As forças que atuam individualmente sobre as lamelas são mostradas na Figura 2.9.

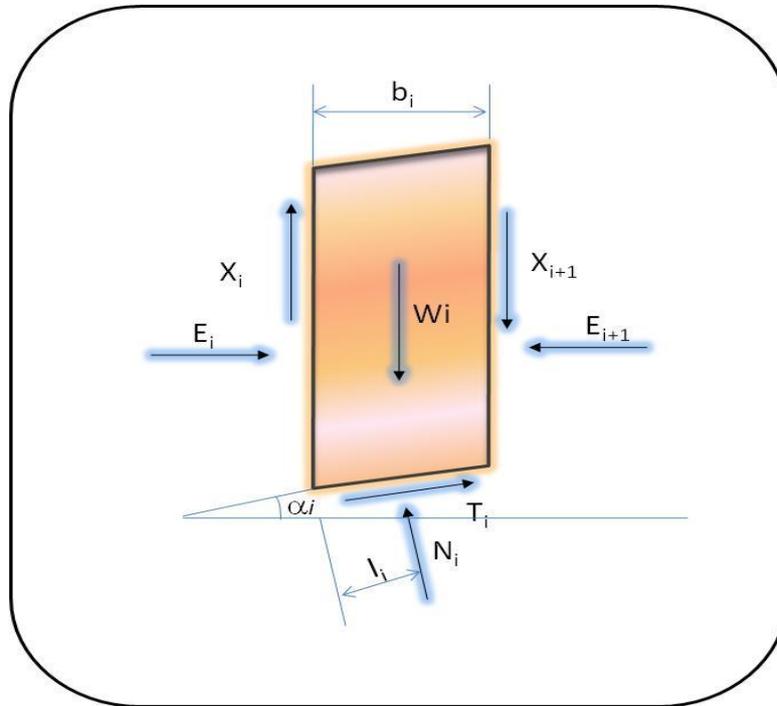


Figura 2.9 Representação das variáveis existentes considerando uma superfície de escorregamento circular.

Neste caso, os métodos de Morgenstern & Price, Spencer e Janbu, seguem os mesmos procedimentos descritos para superfícies poligonais, visto que são métodos generalizados. A seguir são feitos alguns comentários sobre os métodos de Bishop e Fellenius/Peterson, os quais são aplicados somente a superfícies de escorregamentos circulares.

Método de Fellenius/Peterson

O método de Fellenius/Peterson é o método de fatias mais simples, assume apenas a equação geral de equilíbrio momento escrita em relação ao centro da superfície de escorregamento. As forças de cisalhamento e normal entre os blocos X_i e E_i são negligenciados. O fator de segurança FS segue diretamente a partir da seguinte expressão:

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \text{sen} \alpha_i} \cdot \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \tan \varphi_i] \quad (2.15)$$

Onde:

u_i - poropressão na fatia

c_i, φ_i - parâmetros de resistência efetivos do solo

W_i - peso da fatia

N_i - força normal no segmento da superfície de escorregamento

α_i - inclinação do segmento da superfície de escorregamento

l_i - segmento na superfície de escorregamento

Método de Bishop

O método Bishop simplificado assume que as forças X_i entre as fatias são iguais a zero. O método se baseia em satisfazer a equação de equilíbrio dos momentos e a equação de equilíbrio das forças verticais. O fator de segurança FS é encontrado através de processos iterativos da seguinte expressão:

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \text{sen} \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \tan \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \text{sen} \alpha_i}{FS}} \quad (2.16)$$

Onde:

u_i - poropressão na fatia

c_i, φ_i - parâmetros de resistência efetivos do solo

W_i - peso da fatia

α_i - inclinação do segmento da superfície de escorregamento

b_i - largura da fatia

2.7 Estudos correlacionados

Várias pesquisas sobre recuo e estabilidade de falésias estão sendo realizadas em várias regiões do mundo, principalmente na Europa e América do Norte. Para desenvolver esses estudos, muitos autores adotam modelos baseados no Método dos Elementos Finitos como parte dos procedimentos metodológicos.

Um desses estudos foi desenvolvido por WOLTERS & MÜLLER (2008) na Califórnia, EUA. Os autores realizaram análises numéricas da distribuição de tensões em

uma falésia idealizada em vários estágios de erosão provocadas pela ação de ondas, considerando para tal, parâmetros como ângulo de inclinação do talude, altura da falésia, influência da incisão basal, carregamento na face e sobrecarga na falésia.

A Figura 2.10 mostra uma simulação de diferentes inclinações em uma falésia e os resultados da distribuição de tensões. A face da falésia é apresentada em uma fase inicial com uma leve inclinação e curvatura, depois como um talude vertical e, finalmente, em um estágio de formação de cavidade na base da encosta (Figura 2.11).

As análises numéricas mostraram que as mudanças provocadas pela ação de ondas na geometria da falésia, considerando um talude vertical, resultam no desenvolvimento de tensões elevadas no pé da falésia, que podem ultrapassar a resistência ao cisalhamento do material. É importante destacar nesse estudo a abertura de fendas no topo da falésia, as quais evoluem à medida que aumenta a cavidade na base, e se acentua devido à pressão exercida pela água proveniente das chuvas. Percebe-se no modelo o aumento de tensões na área de influência das fendas no topo da falésia.

Além desse trabalho, destaca-se o de COLLINS & SITAR (2008), no qual os autores identificaram os processos espaciais e temporais responsáveis pela erosão e escorregamentos na área de falésias arenosas no Sul de São Francisco, Califórnia. Para tanto foi utilizado dados de cinco anos de monitoramento e observações em campo, perfilamento a laser (LIDAR), e desenvolvimento de modelos empíricos de ruptura.

Outras pesquisas estão sendo amplamente desenvolvidas com o intuito de obter parâmetros e modelos para recuo de falésias (VANDAMME, 2011; CASTEDO et al., 2012) ou para desenvolver métodos de análise de estabilidade que melhor se adaptem às observações e processos que ocorrem na zona costeira (COLLINS & SITAR, 2011).

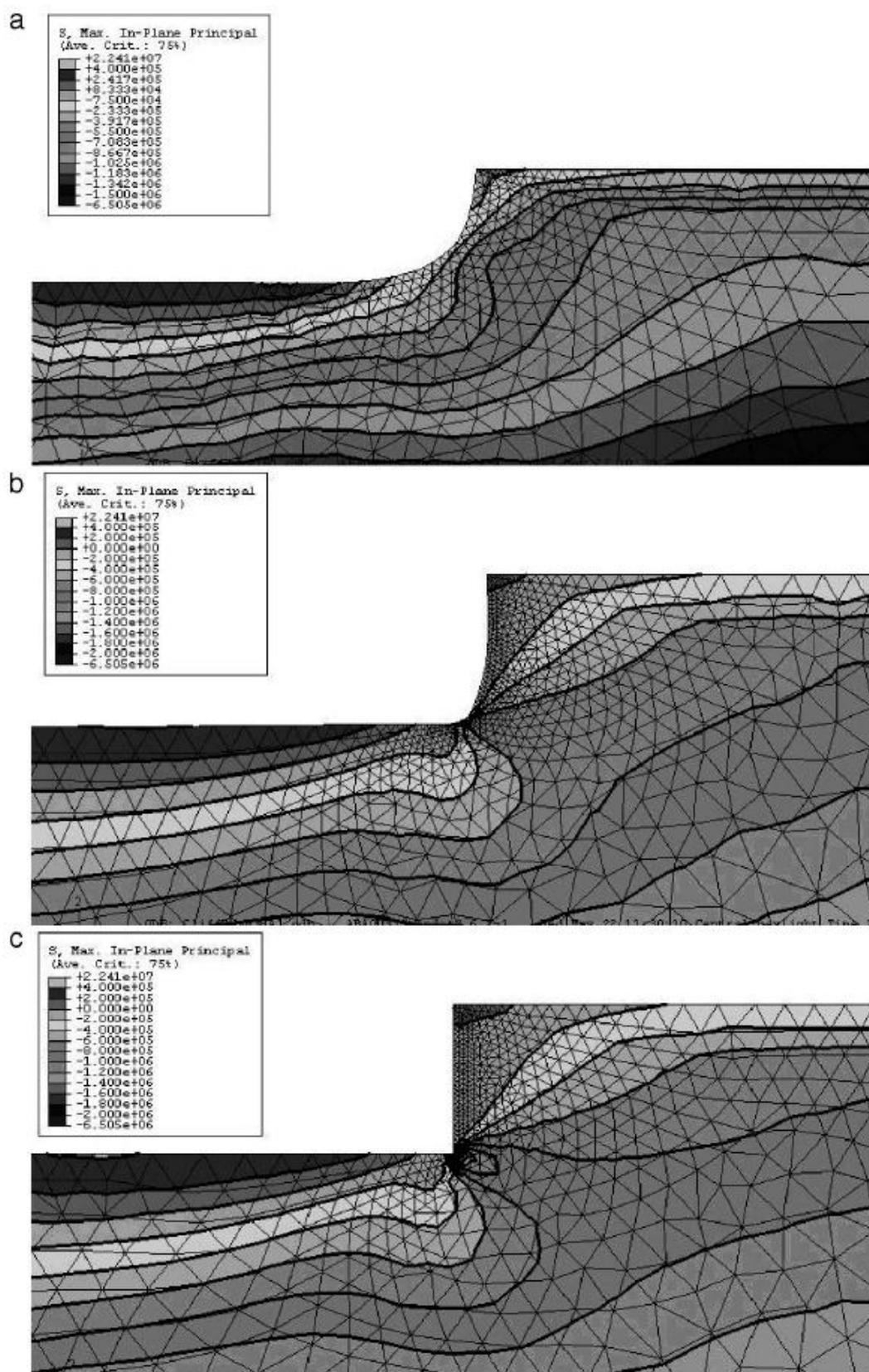


Figura 2.10 Distribuição das tensões para falésias de inclinações variadas (50°, 85° e 90°). (a) Falésia após ruptura e retirada de sedimentos. (b) Mudanças na inclinação da falésia devido à erosão provocada pela ação das ondas. (c) Face da falésia próxima da vertical. (WOLTERS & MÜLLER, 2008)

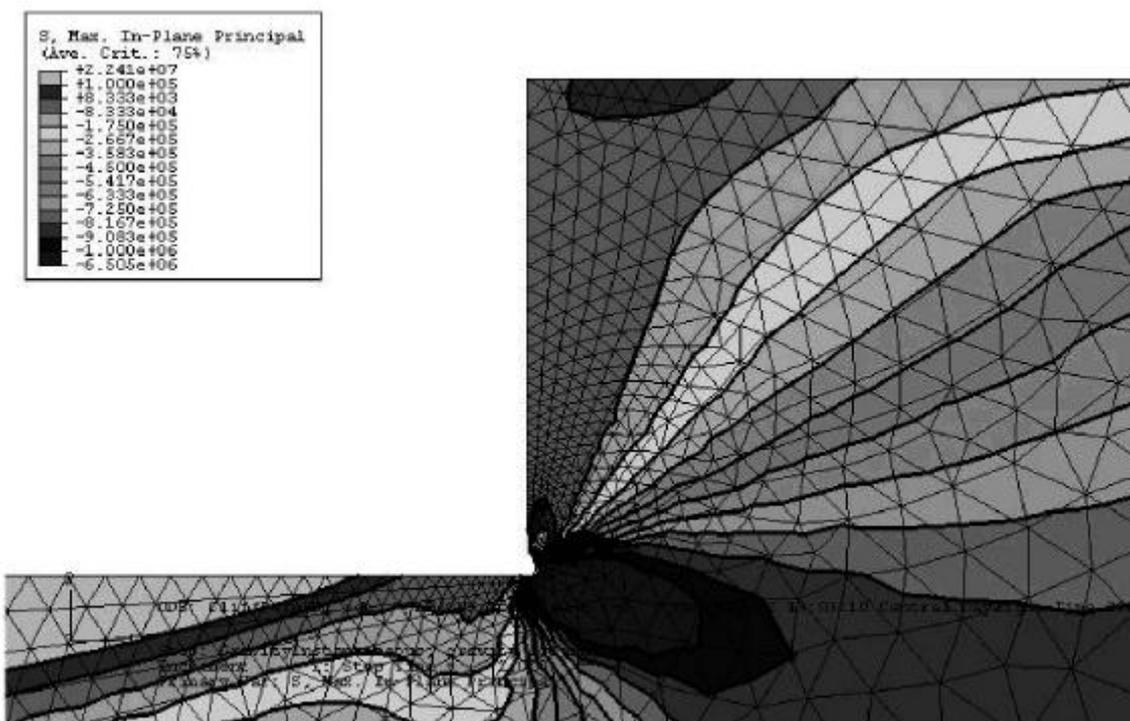


Figura 2.11 Tensões em uma falésia com incisão basal. (WOLTERS & MÜLLER, 2008)

No Brasil, vários estudos são direcionados, principalmente, para o entendimento das variáveis envolvidas no processo de recuo da linha de costa, com ou sem presença de falésias, através de superposições de fotografias recentes e antigas (CASTRO, et al., 2011); ou, na identificação de processos erosivos costeiros, das áreas vulneráveis e proposições de medidas de controle nesse aspecto (MAZZER et al., 2008). Já, outros são voltados para a compreensão dos mecanismos de origem das formações geológicas presentes nas falésias ao longo do litoral ou das mudanças climáticas naturais relacionadas aos processos erosivos costeiros (SOUSA et al., 2008; SAMPAIO et al. 2003).

Enfim, percebe-se que a disseminação de pesquisas nessa linha é de extrema importância para a compreensão dos mecanismos atuantes em cada encosta e região, contudo não podem ser extrapolados para outras localidades, a não ser que tenham características semelhantes ou sirvam como referência no direcionamento da metodologia de estudos específicos.

Em termos regionais, diversos estudos já foram realizados na zona costeira do estado do Rio Grande do Norte, em geral com o objetivo de entender os diversos processos relacionados à erosão costeira e estabilidade de falésias. No litoral oriental-sul foram realizados alguns trabalhos envolvendo o tema, todavia, concentram-se na zona costeira de Tibau do Sul/RN.

Sem dúvida essa região sofre processos erosivos costeiros intensos e possuem falésias com alturas superiores a 20m, o que justifica a concentração de pesquisas nessa área. Alguns trabalhos relevantes desenvolvidos na região de Tibau do Sul/RN são descritos na sequência.

SILVA (2003) estudou a dinâmica superficial e as propriedades geotécnicas, a partir de ensaios de caracterização, resistência à compressão, adensamento e resistência ao cisalhamento direto das falésias. Em relação à caracterização geotécnica das falésias, concluiu que basicamente existem duas camadas de materiais constituintes.

Nesse estudo, SILVA (2003) realizou ensaios de laboratório com amostras deformadas e indeformadas, tanto no topo quanto na base de algumas falésias comumente encontradas na região. O resultado da caracterização geotécnica mostrou que o material oriundo do topo apresentava baixa plasticidade, com predominância de textura mediana e material arenoso, com densidade real média de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Foi observado também que quando o material era imerso em água o mesmo mostrava-se bastante resistente à desagregação. Já o material proveniente da base apresentava-se muito plástico, com predominância de material silto-argiloso, com densidade real média de $2,65 \text{ g/cm}^3$. No entanto quando imerso em água, desintegrava-se em um curto intervalo de tempo.

SEVERO (2005) analisou a estabilidade de falésias nessa região através da utilização de métodos de equilíbrio-limite para perfis típicos observados, utilizando dados obtidos de ensaios de laboratório em amostras indeformadas. Para isso, realizou ensaios de cisalhamento direto com materiais proveniente do topo e da base das falésias com características visuais semelhantes às encontradas na faixa costeira de Tibau do Sul/RN. O material do topo apresentou os seguintes parâmetros de resistência: ângulo de atrito de $27,7^\circ$ e coesão de 233 kPa; já o material da base obteve $28,4^\circ$ para o ângulo de atrito e 384,1 kPa para a coesão. Em condição inundada, os resultados obtidos foram os seguintes para o ângulo de atrito e coesão respectivamente: $26,8^\circ$ e 45,4 kPa (material da base), e $27,5^\circ$ e 50,6 kPa (material do topo). SEVERO (2005) também obteve através de ensaios de permeabilidade os seguintes valores para o coeficiente de permeabilidade, $K_{\text{base}} = 6,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ e $K_{\text{topo}} = 8,2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

Além desses, BRAGA (2005) constatou os processos erosivos ao longo da faixa costeira de Tibau do Sul/RN através da utilização de check-lists desenvolvidos e adaptados pelo autor à realidade local.

PIÉRRRI (2008) buscou analisar a erosão costeira na região de Tibau do Sul através dos procedimentos de mapeamento geoambiental e análise morfodinâmica. Com isso o autor conseguiu obter um mapeamento de riscos em 03 (três) praias em Tibau do Sul/RN (praia do Madeiro, do Curral e de Pipa) baseado em geoindicadores e observações do autor.

E por fim, SEVERO (2011) realizou a caracterização geotécnica de uma falésia da Formação Barreiras na Ponta do Pirambu, em Tibau do Sul/RN, e estudou a influência da cimentação do solo em seu comportamento. Neste trabalho, SEVERO (2011) realizou sondagens à percussão e rotativas e definiu um perfil aproximado da falésia de acordo com os resultados (Figura 2.12).

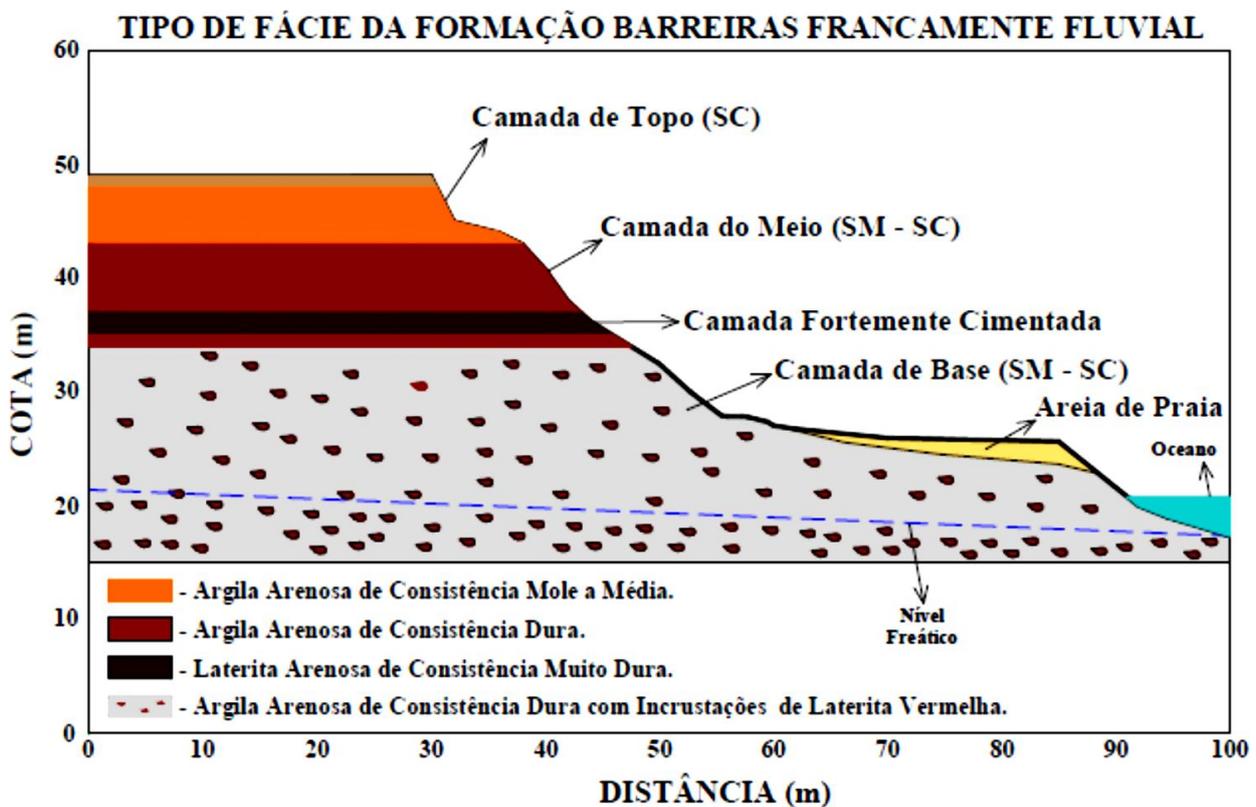


Figura 2.12 Perfil geológico-geotécnico da falésia da Ponta do Pirambu, em Tibau do Sul/RN. (SEVERO, 2011)

Apesar da existência de várias pesquisas na zona costeira de Tibau do Sul/RN, percebe-se que, em Baía Formosa/RN, não existem estudos dessa natureza, entretanto, a priori são constatadas semelhanças em alguns segmentos de falésia com os descritos por SEVERO (2011), SEVERO (2005) e SILVA (2003).

4.1.1. Parâmetros geotécnicos de solos da Formação Barreiras

SEVERO (2011) estudou detalhadamente os solos da Formação Barreiras, através da realização de ensaios e análises de outros trabalhos. Dessa forma o autor verificou que os solos da Formação Barreiras são classificados de acordo com o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) em SC, CL ou ML, sendo que a maioria das amostras estudadas nos trabalhos analisados foi classificada como SC (areia argilosa).

A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros de resistência de pico dos solos da Formação Barreiras dos Estados de Pernambuco e Rio Grande do Norte compilados por SEVERO (2011), junto com a classificação dos solos, índice de plasticidade, tipo de ensaio e condição das amostras, associados às várias fácies da Formação Barreiras.

Tabela 2.1 Parâmetros de resistência de pico de solos da Formação Barreiras (Severo, 2011).

Referência/ Local	Tipo de ensaio	Descrição/ Classificação	IP (%)	Condição da amostra	c (kPa)	ϕ (°)
Gusmão Filho <i>et al.</i> (1986)/ Olinda – PE	Triaxial (CU)	Areia Argilosa SC	31-40	Inundado	20-50	20-24
Coutinho <i>et al.</i> (1999;2006)/ Horto Dois Irmãos - Recife - PE	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	10-16	Natural	13	31
				Inundado	0	30
Lafayette (2000)/ Alto do Reservatório – Recife - PE	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	11-18	Inundado	7-13	24-26
Lima (2002)/ Alto do Reservatório – Recife - PE	Cisalhamento Direto	Argila arenosa SC	16	Natural	28	31
				Inundado	10	32
Lafayette <i>et al.</i> (2003;2005)/ Cabo de S. Agostinho - PE	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	9-13	Natural	33-56	33-36
				Inundado	1,5-1,8	33-35
Silva (2005)/ Camaragibe - PE	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	12-13	Natural	43-46	31-45
				Inundado	0-3,7	31-35
Bandeira <i>et al.</i> (2004)/ Camaragibe - PE	Cisalhamento Direto	Silte arenoso ML	14-16	Inundado	12	29
Silva (2007)/ Camaragibe - PE	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	12-14	Natural	45-47	31-44
				Inundado	0-3,7	31-34
Meira (2008)	Cisalhamento Direto	Areia Argilosa SC	7,9-9,2	Natural	1,0-4,2	28-34
				Inundado	0,4-3,5	23-26
Severo <i>et al.</i> (2006)/ Tibau do Sul - RN	Cisalhamento Direto	Argila de baixa plasticidade CL	7-19	Natural	116-192	27-32
				Inundado	23-54	26-30

De acordo com a tabela, observa-se que o Índice de Plasticidade (IP) varia de 7% a 40%, dependendo da natureza dos materiais, e que os parâmetros de resistência variam de 13 a 192 kPa (c) e 31° a 45° (Φ), na condição natural, e de 0 kPa a 54 kPa (c) e 20° a 36° (Φ) na condição inundada.

Ainda é possível perceber que para areias argilosas (SC), excluindo os dados obtidos por Meira (2008), os valores de coesão na condição natural estão compreendidos no intervalo de 13 a 56 kPa, e dos ângulos de atrito situam-se também na faixa de 31° a 45°. Enquanto que, na condição inundada excluindo-se os dados de Gusmão Filho et al. (1986), a coesão varia de 0 a 13 KPa, e o ângulo de atrito varia de 23° a 35°.

Em relação à permeabilidade e índice de vazios, os solos da Formação Barreiras apresentam índice de vazios que variam de 0,40 a 0,98; permeabilidade *in situ* que varia de $(2,5 \times 10^{-5}$ a $6,6 \times 10^{-8})$ m/s e permeabilidade em laboratório de $(1,0 \times 10^{-5}$ a $1,5 \times 10^{-8}$ m/s) (SEVERO, 2011).

Caracterização da Área de Estudo

3.1. Localização geográfica e configuração regional

A área de estudo desta pesquisa localiza-se na zona costeira do município de Baía Formosa/RN, no litoral oriental-sul do Rio Grande do Norte. O trecho estudado abrange uma faixa de praia de cerca de 1200 m de extensão ao longo da praia do Porto, sendo caracterizado pela presença de tabuleiros costeiros na parte superior, falésias encobertas por depósitos dunares, e a planície costeira na parte inferior (Figura 3.1).

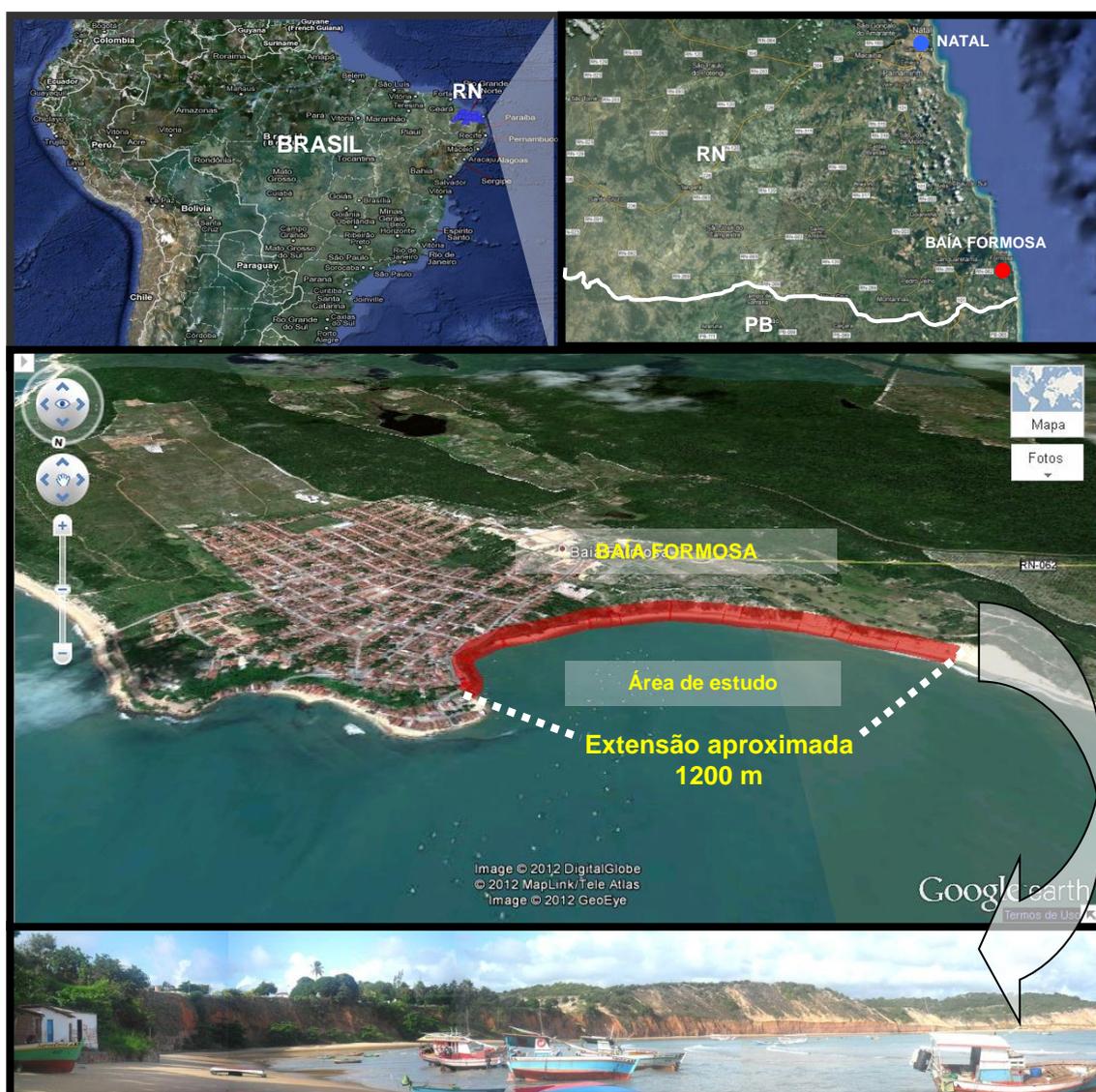


Figura 3.1 Localização e inserção regional da área de estudo.

(Adaptado de Google Mapas)

3.2. Geologia e geomorfologia

Geomorfologicamente, o litoral do Rio Grande do Norte é caracterizado pela constante presença dos depósitos sedimentares da Formação Barreiras, que formam uma superfície aproximadamente plana (tabuleiro) suavemente inclinada para o oceano. Os afloramentos da Formação Barreiras separam a região costeira da sublitorânea e terminam, próximo ao mar, em falésias muitas vezes ativas (BARRETO et al., 2004).

Embora na zona costeira de Baía Formosa/RN não predomine a ocorrência de falésias marinhas ativas, verifica-se que a geomorfologia descrita anteriormente é exatamente a identificada na área de estudo ao longo da Praia do Porto. Segundo BARRETO et al. (2004) existem depósitos pleistocênicos de intermarés a inframarés que afloram na forma de falésias em dois setores do litoral do estado, cada qual apresentando tipos litológicos e idades distintas. Ambos apresentam contatos basais erosivos com a Formação Barreiras e acham-se recobertos por dunas inativas ou ativas.

OLIVEIRA (2011) realizou o mapeamento das unidades geológicas do litoral oriental-sul do estado e observou a predominância de rochas da Formação (Grupo) Barreiras, representantes dos sedimentos Neógenos e Quaternários. Além dessas, registrou também, Depósitos Aluvionares, Depósitos Colúvio-Eluviais, Depósitos de Mangues, Depósitos Eólicos Litorâneos de Paleodunas, Depósitos Flúvio-Lacustrinos, Depósitos Flúvio-Marinhas, Depósitos Litorâneos de Praia de Dunas Móveis, representantes dos sedimentos Quaternários (Pleistoceno, Holoceno) (Figura 3.2).

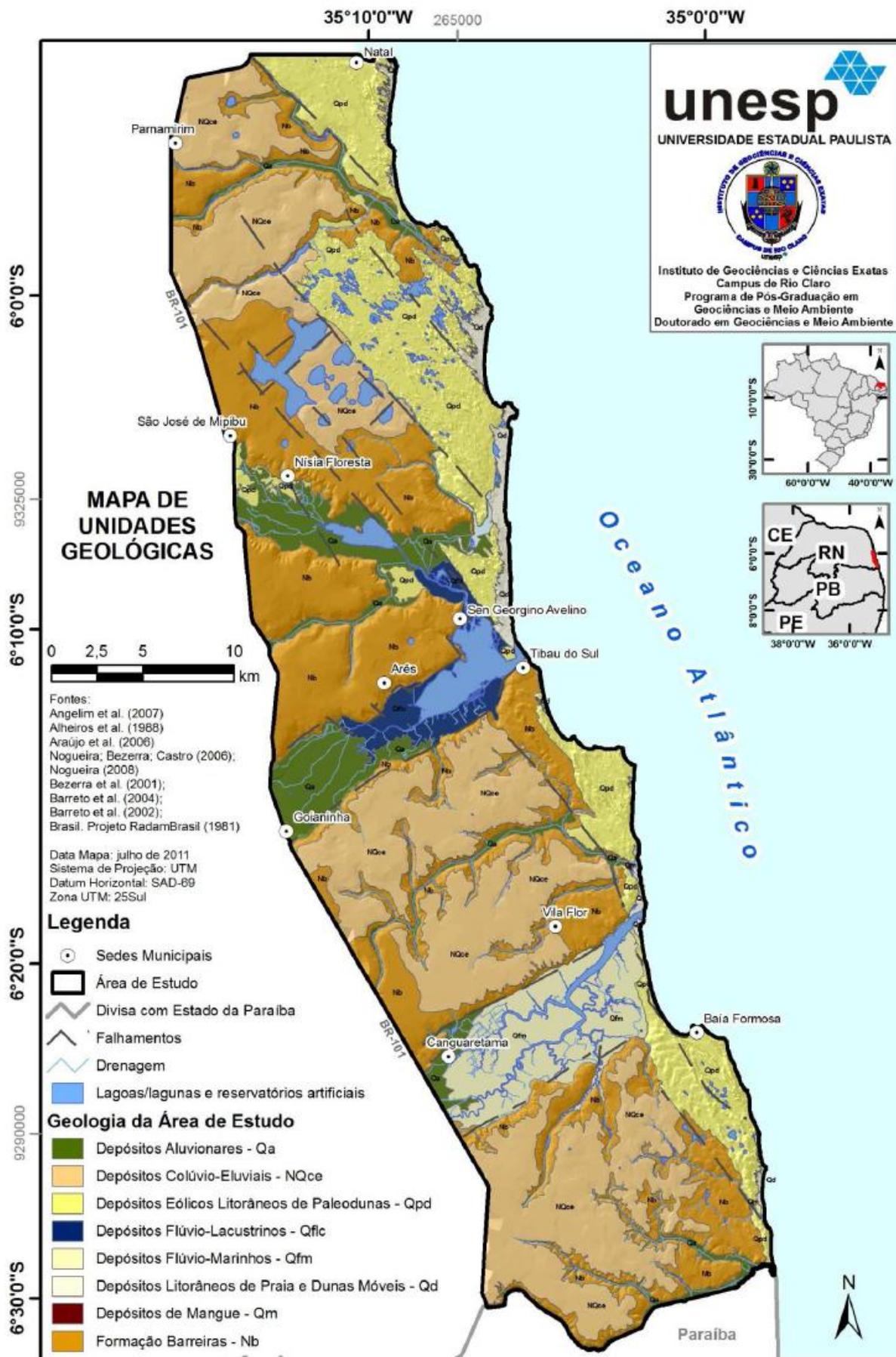


Figura 3.2 Unidades geológicas no litoral oriental-sul do estado. (OLIVEIRA, 2011)

Sob outro enfoque, BARRETO et al. (2004) realizou o mapeamento geológico do quaternário costeiro do Rio Grande do Norte. Embora tenham objetivos e nomenclaturas geológicas em níveis diferentes, os dois mapeamentos são compatíveis e, de certo modo, apresentam a geologia similar. De acordo com o levantamento realizado por BARRETO et al. (2004) em Baía Formosa/RN destacam-se os Depósitos Aluviais, os Terraços Marinheiros, os Lençóis de Areia e as Dunas Ativas e Inativas, além da Formação Barreiras, identificada como Pré-Quaternário (Figura 3.3).

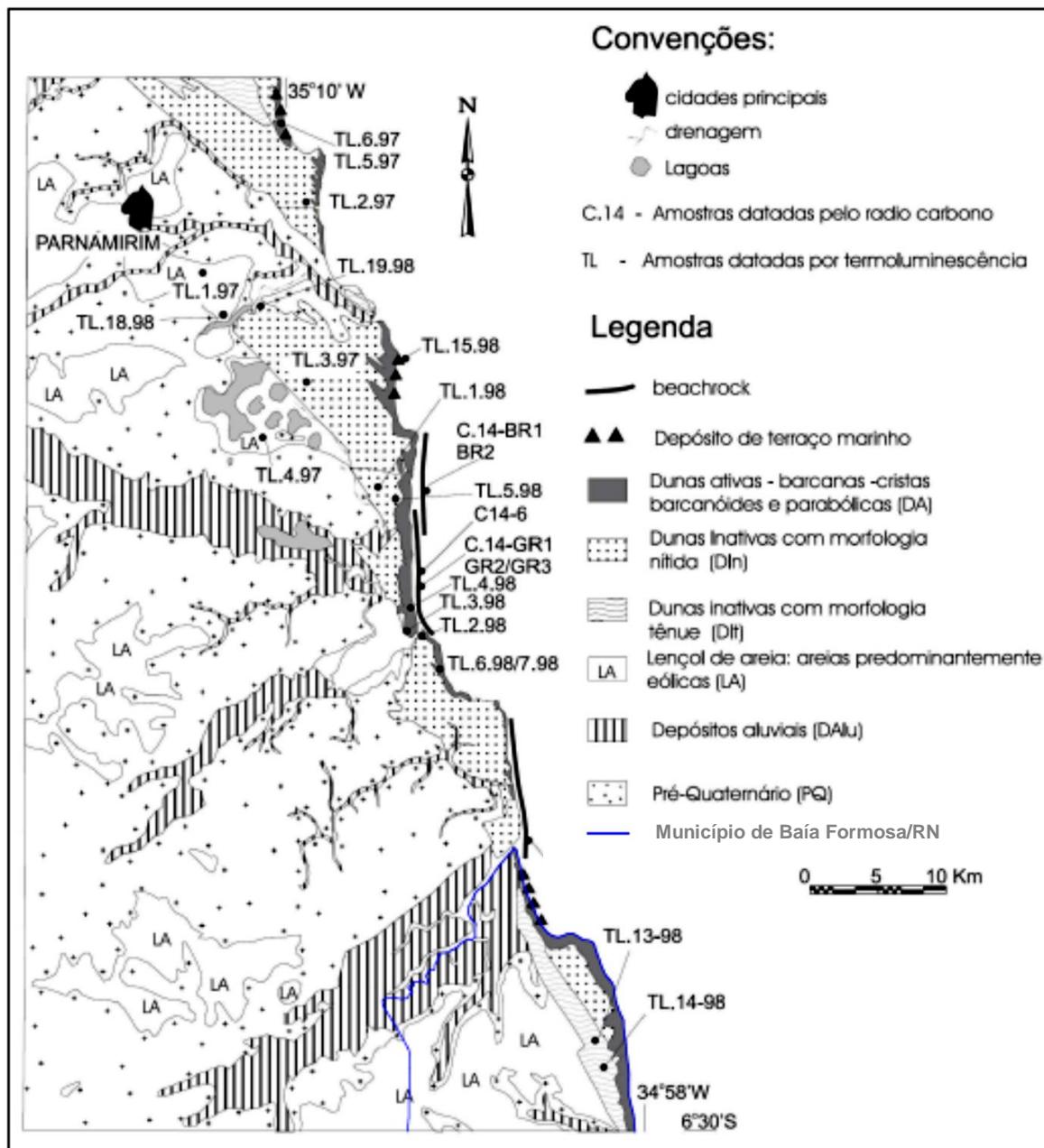


Figura 3.3 Mapa geológico do quaternário costeiro no litoral oriental-sul do estado e na área de estudo.

(Adaptado de BARRETO et al., 2004)

É importante destacar que, na região, existem áreas de abrangência da Formação Barreiras que não são identificáveis nos mapeamentos apresentados anteriormente pelo fato de estarem encobertas por campos de dunas.

Especificamente, na área de estudo as unidades geológicas encontradas são depósitos litorâneos de praia e dunas móveis, depósitos eólicos litorâneos de paleodunas (dunas ativas e inativas) e Formação Barreiras.

3.3. PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Segundo DINIZ (2002) na região litorânea oriental norte-rio-grandense, a estação chuvosa se concentra principalmente no período que vai de fevereiro a julho, quando os totais mensais, em média, variam entre 120 e 230 mm, tendo os meses de agosto a janeiro como os mais secos, com médias da precipitação total mensal sempre abaixo de 80 mm.

No caso de Baía Formosa/RN, de acordo com dados obtidos pela EMPARN nos últimos 08 anos, por dois postos de monitoramento pluviométricos (Prefeitura e Destilaria Vale Verde) observam-se algumas distinções com relação ao regime pluviométrico descrito em termos regionais por DINIZ (2002).

De acordo com os dados da EMPARN, a estação chuvosa está compreendida entre os meses de março a agosto, sendo que, eventualmente, em anos mais chuvosos, esse período se inicia no mês de fevereiro, ou até, no final do mês de Janeiro. Já o período mais seco se concentra nos meses de outubro, novembro e dezembro, e em determinados anos, estende-se até janeiro ou fevereiro.

A média mensal das precipitações nos últimos oito anos está representada na Figura 3.4 associada ao mesmo valor de referência para o período seco (80 mm) mencionado por DINIZ (2002). De acordo com o gráfico é possível perceber que em média nos períodos chuvosos a precipitação mensal acumulada varia no intervalo de 115 mm a 330 mm e nos períodos secos de 10 mm a 30 mm aproximadamente, considerando outubro a dezembro, e de 10 mm a 80 mm, incluindo nesse período os meses de janeiro, fevereiro e setembro.

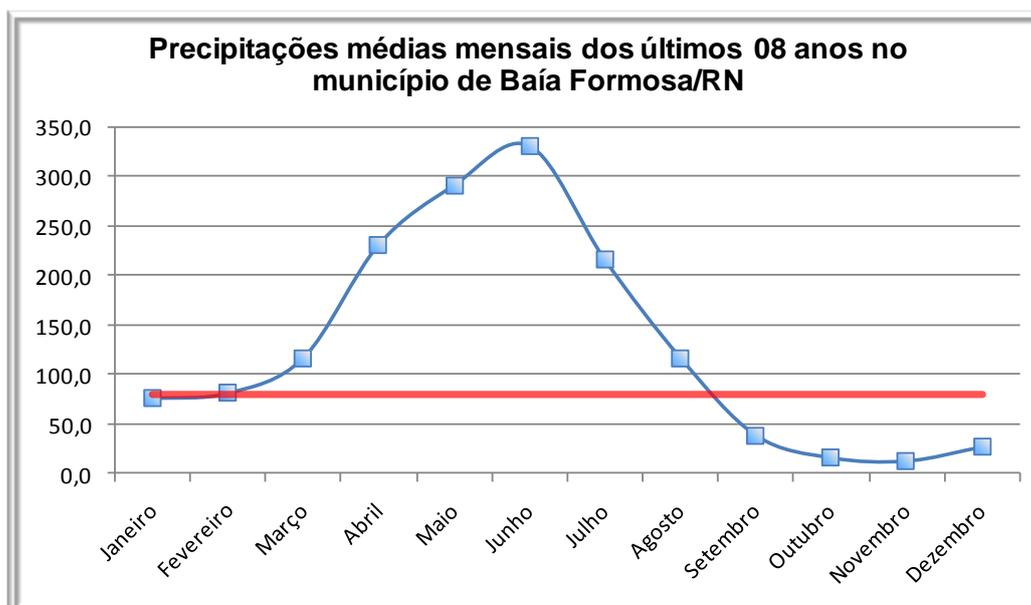


Figura 3.4 Precipitações mensais entre 2005 e 2012 no município de Baía Formosa/RN (Média entre os Postos da Prefeitura e Destilaria Vale Verde).

Ainda é possível verificar de acordo com a Figura 3.4 que entre os anos de 2005 e 2012 sempre ocorreram, em média, precipitações pluviométricas acima de 90 mm e que os anos mais chuvosos foram 2005, 2007, 2008, 2009 e 2011, cujas precipitações médias variaram em torno de 140 mm a 170 mm. Enquanto que nos anos mais secos (2006, 2010 e 2012) as precipitações médias anuais foram sempre próximas de 90 mm.

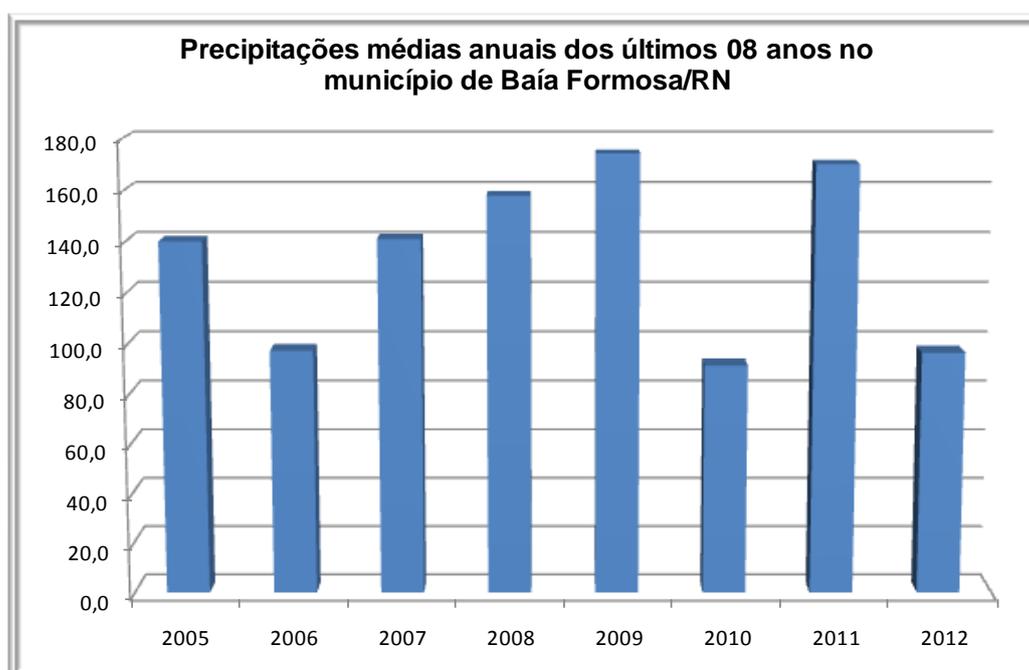


Figura 3.5 Precipitações médias anuais entre 2005 e 2012 no município de Baía Formosa/RN (Média entre os Postos da Prefeitura e Destilaria Vale Verde).

CAPÍTULO 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, bem como os procedimentos adotados para avaliar a influência do recuo de falésias nos processos erosivos costeiros na área de estudo.

Esta fase foi desenvolvida em três etapas. A primeira refere-se à investigação de campo com o intuito de observar as feições morfológicas das falésias, os mecanismos envolvidos nos processos erosivos e as intervenções realizadas na área; a segunda consiste na coleta de amostras de solo deformadas e indeformadas com o objetivo de obter parâmetros para a execução das análises; e a terceira, trata-se da análise de estabilidade com utilização do software GEO5® - versão 16, desenvolvido pela fine - Civil Engineering Software.

4.1. INVESTIGAÇÕES EM CAMPO

Para atender aos objetivos deste trabalho, a área foi subdividida em 04 trechos, levando em consideração os seguintes aspectos: ocupação, cobertura vegetal, altura, inclinação da escarpa, materiais constituintes, processos erosivos e feições paisagísticas (Figura 4.1).

Nesta etapa a metodologia foi fundamentada em observações e levantamentos de campo, registros fotográficos e preenchimento de check-list conforme modelo utilizado por NASCIMENTO (2009) e BRAGA (2005) (Anexo 01).



Figura 4.1 Subdivisão da área de estudo.

4.1.1 Levantamentos Topográficos

Nesta etapa da pesquisa foram realizados dois tipos de levantamento. O primeiro consistiu na obtenção da extensão de cada trecho da falésia por meio do Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) e o segundo, na obtenção da altura das seções da falésia através de levantamento taqueométrico.

4.1.1.1 Levantamento por DGPS

Além do modo de posicionamento absoluto, onde é usado apenas um GPS para determinar a posição de um ponto sobre a superfície da terra, existe também o modo Diferencial conhecido por DGPS que faz uso de dois receptores GPS nas medições.

O levantamento funciona usando um GPS como base (estático) fixado em um ponto de coordenadas conhecidas e outro colocado fixo (estático) ou em movimento (cinemático) sobre pontos cujas coordenadas deseja-se determinar. No caso deste levantamento foi instalado um GPS com uma base fixa na parte superior da falésia (Figura 4.2) e outro colocado em movimento ao longo da base da falésia (Figura 4.3).



Figura 4.2 Receptor GPS com base fixa no topo da falésia.

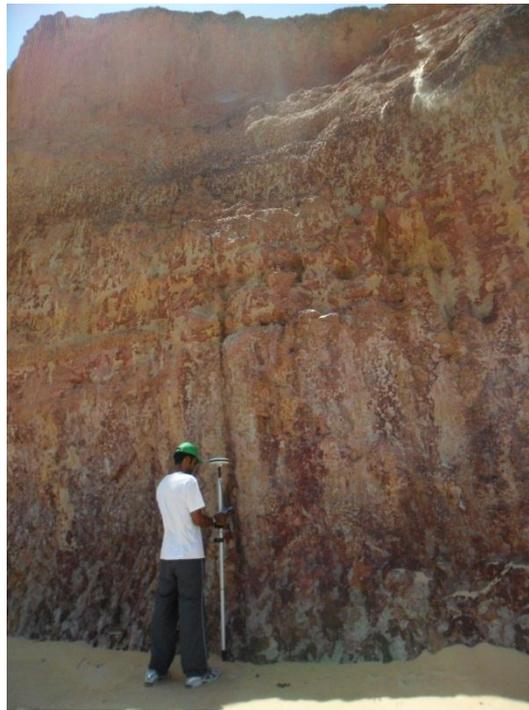


Figura 4.3 Levantamento de pontos na base da falésia com receptor GPS móvel.

A partir desse levantamento foi possível obter a extensão total e de cada trecho da falésia, conforme apresentado na Figura 4.4.



Figura 4.4 Indicação e extensão dos trechos da falésia (Adaptado de Google Maps).

4.1.1.2 Levantamento Taqueométrico

O levantamento taqueométrico compreende uma série de operações que constituem um processo rápido e econômico para a obtenção indireta da distância horizontal e diferença de nível. Para este tipo de levantamento foi necessário a utilização de teodolito eletrônico provido de fios estadimétricos e mira. O teodolito, além de medir ângulos, acumula também neste procedimento, a função de medir opticamente as distâncias horizontais e verticais. São feitas as leituras processadas na mira com auxílio dos fios estadimétricos (Fio Superior, Médio e Inferior).

As seções nas quais foram realizados os levantamentos foram definidas a partir de variações na morfologia dos trechos de falésia. Para cada seção adotou-se como padrão a nomenclatura indicada pela letra 'S', em seguida pelo número do trecho e depois pelo número da seção. Desse modo, foram definidas doze seções, sendo três seções nos trechos 01 e 02, quatro no trecho 03 e duas no trecho 04 (Figura 4.5).



Figura 4.5 Definição das seções a serem analisadas (Adaptado de Google Maps).

O teodolito foi instalado na faixa de praia, perpendicular a seção a ser analisada (Figura 4.6). Além disso, foi medida diretamente a distância até a face da falésia para aquelas seções cuja base não coincidia com a posição da mira devido à presença do muro de arrimo (Figura 4.7).



Figura 4.6 Instalação do teodolito na faixa de praia.



Figura 4.7 Levantamento em uma seção com presença de muro de arrimo.

Desse modo foram obtidas as alturas para as seções em cada trecho e, proporcionalmente, a espessura média de cada camada conforme o caso. As alturas das seções correspondentes a cada trecho da falésia são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Alturas correspondentes a cada seção.

Trecho	Seção	Altura (m)
01	S-1.1	5,10
	S-1.2	3,65
	S-1.3	7,71
02	S-2.1	12,05
	S-2.2	14,10
	S-2.3	14,65
03	S-3.1	9,15
	S-3.2	8,50
	S-3.3	10,28
	S-3.4	8,11
04	S-4.1	3,70
	S-4.2	5,00

4.2. COLETA DE AMOSTRAS E REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

4.2.1. Plano de Amostragem

O Plano de amostragem para as amostras deformadas foi idealizado para abranger toda a extensão da encosta, totalizando 25 amostras. Os locais de coleta de cada amostra variaram em função dos aspectos tátil-visuais dos solos, de modo que não houve necessidade de se obter amostras da base, meio e topo para todas as seções. Assim, optou-se por otimizar a quantidade de amostras e abranger ao máximo os materiais constituintes da falésia, ao considerar o solo de uma determinada camada em uma seção como sendo equivalente ao de uma seção anterior ou posterior conforme Tabela 4.2.

Em relação às amostras indeformadas, foram obtidas três amostras em dois locais distintos, no topo e base da falésia, dos materiais constituintes mais representativos da falésia. Esta etapa foi realizada para se obter um referencial dos parâmetros de resistência dos solos constituintes da Formação Barreiras da região com os de outras regiões, já que para as análises foram adotados valores médios.

Tabela 4.2 Amostras deformadas de acordo com a seção e parte da falésia.

Trecho	Seção	Amostras		
		Base	Meio	Topo
01	S-1.1	A01	-	A02
	S-1.2	-	A03	-
	S-1.3	-	-	A04
02	S-2.1	A05	-	A06
	S-2.2	A07	-	A08
	S-2.3	A09	-	A10
03	S-3.1	A11	-	A12
	S-3.2	A13	A14	A15
	S-3.3	A16	A17, A18	A19
	S-3.4	-	-	A20
04	S-4.1	A22	-	A23
	S-4.2	-	A24	-

Obs: As amostras A21 e A25 foram retiradas de camadas de seixos intercaladas entre as seções 3.2 e 3.4.

No presente estudo as amostras foram obtidas sem a necessidade de retirada de blocos indeformados, foram moldadas diretamente em campo através do seguinte procedimento:

1. Executava-se uma abertura na falésia suficiente para inserir o anel de cisalhamento (Figura 4.8);
2. Em seguida, com o auxílio de ferramentas perfuro-cortantes moldava-se o cilindro contornando o molde (Figura 4.9);
3. Finalmente, quando já se obtinha a altura desejável procedia-se a retirada da amostra da falésia utilizando lâminas de serra.



Figura 4.8 Abertura na falésia para inserção do anel de cisalhamento.

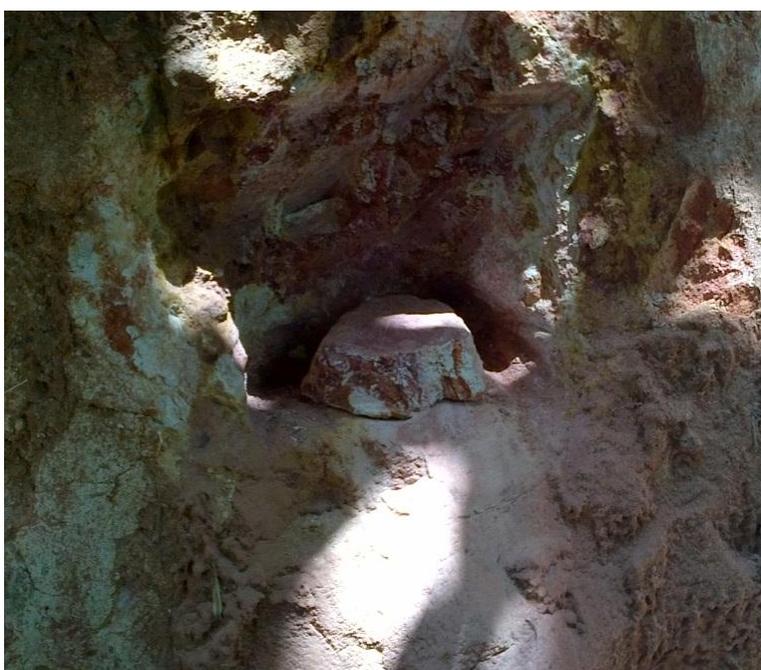


Figura 4.9 Moldagem do corpo de prova .

O trabalho de refinamento das amostras para ficarem nas dimensões adequadas para o ensaio era feito no próprio local ou no laboratório sendo posteriormente submetidas aos ensaios de cisalhamento direto (Figura 4.10).

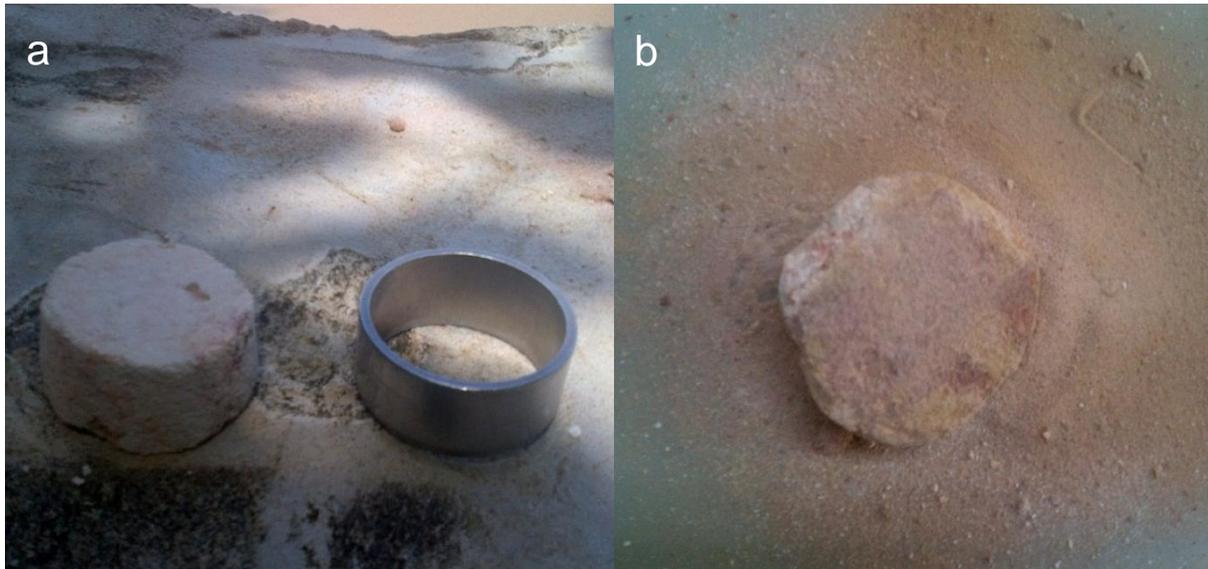


Figura 4.10 Moldagem de amostras indeformadas: a) *in loco*; b) em laboratório.

4.2.2. Ensaio de laboratório

4.2.2.1. Ensaio de caracterização

Foram realizados, para cada amostra, ensaios de granulometria conjunta (Peneiramento e Sedimentação) e densidade dos grãos, conforme NBR – 7181 e DNER-ME 93/94, e limites de consistência (Limite de Liquidez e de Plasticidade), de acordo com a NBR 6459 e a NBR 7180.

4.2.2.2. Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto consiste em submeter uma amostra de solo, com dimensões aproximadas de 3 cm de altura e 6 cm de diâmetro, a uma tensão normal (σ_n) predeterminada e à aplicação de uma carga horizontal de modo que metade do corpo de prova deslize sobre a outra desenvolvendo uma tensão cisalhante (τ) no plano horizontal.

Os ensaios foram realizados na condição inundada, visando eliminar efeitos de coesão aparente devido à sucção do solo, já que essa variável não foi estudada no presente trabalho, sendo esses executados para duas amostras, uma do material do topo e outra para o solo da base da falésia, sendo realizados para três tensões de normais (50, 100 e 200 KPa).

4.3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises foram realizadas através do software GEO5[®] FEM utilizando os módulos de Método dos Elementos Finitos (MEF) e de Estabilidade de Taludes. Os parâmetros necessários às análises de estabilidade foram estimados a partir dos

resultados dos ensaios realizados nessa pesquisa e daqueles obtidos por SOUZA (2001), LIMA (2002), SILVA (2003), SEVERO (2005), MARQUES *et al.* (2006) e SEVERO (20011) em encostas com características similares.

As seções para as análises de estabilidade foram as mesmas definidas no levantamento taqueométrico. Baseado nessas faixas tornou-se possível verificar a variação dos fatores de segurança para cada trecho estudado no que concerne à estabilidade de falésias conjuntamente com o grau de estabilidade abordado na sequência.

A NBR 11682 – Estabilidade de Taludes - determina os fatores de segurança mínimos de acordo com o grau de segurança necessário ao local (Tabela 4.3). Mesmo esses valores sendo estabelecidos para os métodos baseados no equilíbrio-limite, adotou-se, para fins desse estudo, um FS mínimo de 1,50 referente a um grau de segurança alto devido à presença acentuada de banhistas em altas estações (Tabela 4.4).

Tabela 4.3 Fator de segurança mínimo em função do método e do grau de segurança necessário ao local (ABNT, 1991).

Grau de segurança necessário ao local	Métodos baseados no equilíbrio-limite	Tensão-deformação
	Padrão: fator de segurança mínimo ^(A)	Padrão: deslocamento máximo
Alto	1,50	Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados.
Médio	1,30	
Baixo	1,15	

^(A) Podem ser adotados fatores diferentes, desde que justificados.

Tabela 4.4 Grau de estabilidade e intervalos de fatores de segurança.

Fator de segurança	Grau de estabilidade	Identificação
$FS \geq 3,0$	Estável	
$1,5 \leq FS < 3,0$	Moderado	
$FS < 1,5$	Instável	

Resultados e Discussão

5.1. Investigações de campo

5.1.1. Observações diretas e utilização dos checklists

Trecho 01

O trecho 01 possui uma extensão de 65 m e falésias com diferentes inclinações, entre 40° e 85°, e altura variando de 3,65 m a 8,00 m. Caracteriza-se pela ocupação e urbanização acentuada comparada a outros trechos, inclusive com lançamento de efluentes domésticos diretamente na falésia (Figura 5.1). No que diz respeito à constituição das falésias, percebe-se a predominância de um material areno-argiloso de coloração variegada, e a presença de vegetação em grande parte da encosta. Os tipos de movimentos de massa identificados são quedas de detritos e pequenos escorregamentos. No Anexo 02 é apresentado o checklist utilizado no trecho.

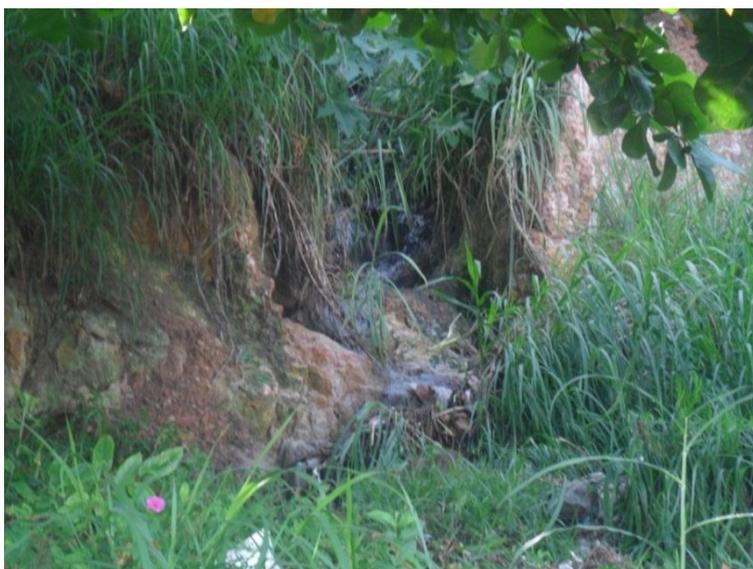


Figura 5.1 Lançamento de efluentes no corpo da falésia.

Trecho 02

O trecho 02 possui uma extensão de 370 m e falésias com altura entre 8,00 m e 15,00 m. Possui grande quantidade de árvores de maior porte na base e face da falésia e, em geral, perfis com inclinação de 90°. A presença dessas árvores interferem negativamente na estabilidade da falésia pois, além de suas raízes provocarem o surgimento de caminhos preferenciais para percolação da água, elas geram uma forças adicionais na encosta devido à ação dos ventos.

Em quase toda a extensão analisada, os principais mecanismos instalados são quedas de blocos, tombamentos e deslizamentos (Figura 5.2). Em relação aos materiais constituintes, percebe-se a predominância de dois tipos: o primeiro, no topo, consiste em uma areia argilosa de coloração avermelhada apresentando uma ligeira variação de tonalidade e heterogeneidade em alguns locais; já o segundo, na base, constitui-se de um material argiloso de cor variegada (Figura 5.3). No entanto, existem locais em que não foi possível constatar a presença de dois tipos de materiais ou somente foi constatada a presença do material do topo.

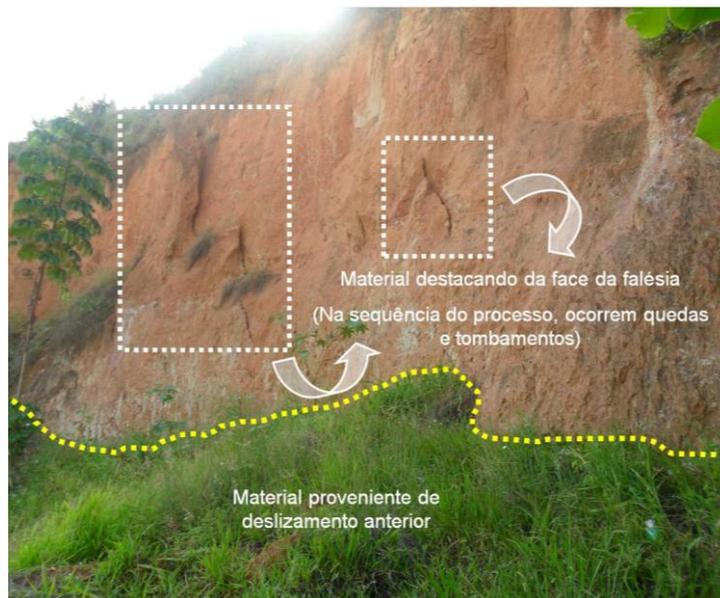


Figura 5.2 Mecanismos de movimento de massa atuantes no trecho 02.

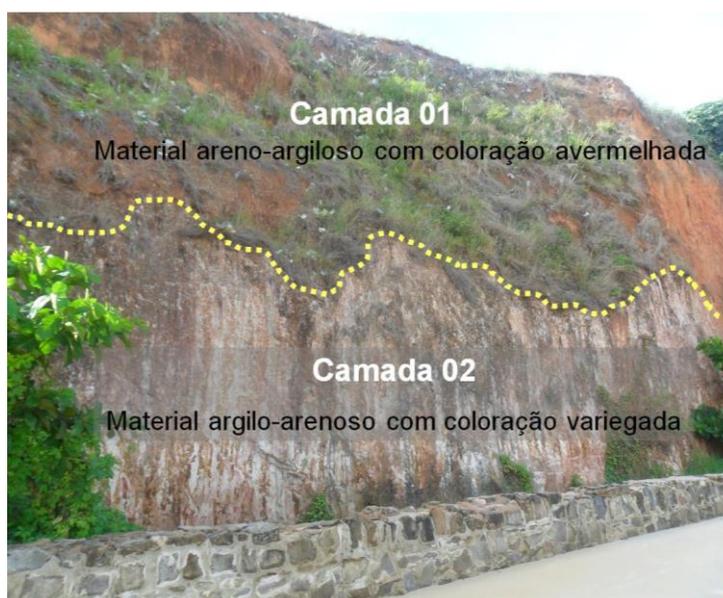


Figura 5.3 Constituição da falésia com dois tipos de materiais no trecho 02.

Apesar de grande parte do trecho possuir muro de proteção, o qual varia até uma altura de 2,00 m, existe um setor em que o muro não é mais aparente, tendo sido soterrado por sedimentos de praia. No Anexo 03 apresenta-se o checklist aplicado no trecho.

Trecho 03

Esse trecho é caracterizado pela ação direta das ondas no pé da falésia, com várias partes erodidas por erosão basal. Possui uma extensão de aproximadamente 480m, formado por falésias com intervalo de altura compreendido entre 8 e 12m e inclinação de 90° na maior parte do trecho (Figura 5.4).

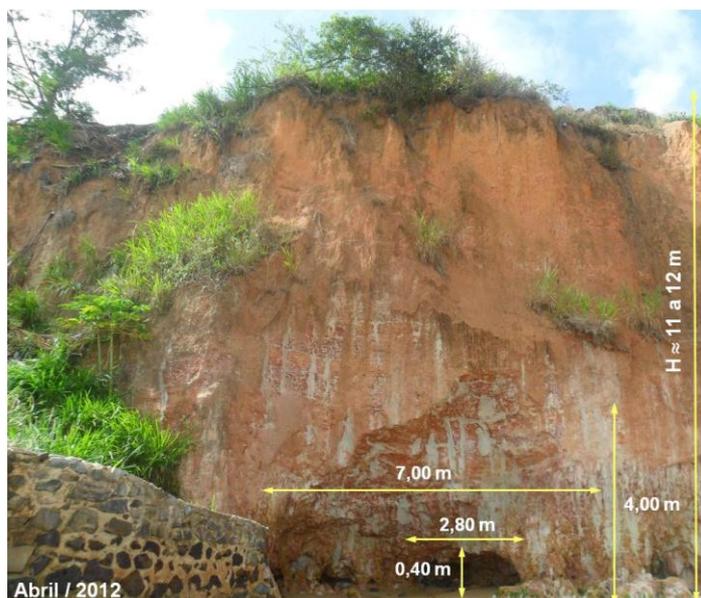


Figura 5.4 Incisão basal no início do trecho 03.

Além desse processo foram identificados vários segmentos de falésia com indícios de tombamentos e quedas de blocos e detritos. O trecho 03 já não possui muro de proteção.

No que diz respeito a sua constituição, o trecho 03 é bastante heterogêneo, destacam-se 04 tipos de perfis. O primeiro perfil apresenta as mesmas feições presentes no trecho anterior. Já o segundo, é constituído por 03 camadas diferentes, existe um material arenoso-argiloso na camada 01; em seguida, na segunda camada, um material mais argiloso em estágio de cimentação mais avançado com cor roxa; e no pé da falésia, existe um material argiloso semelhante ao do trecho 02 (Figura 5.5).

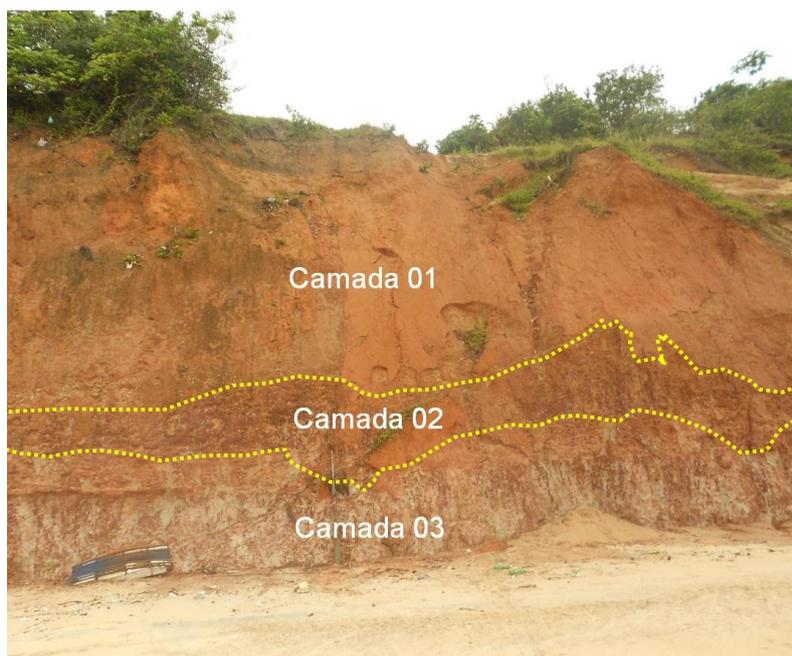


Figura 5.5 Trecho 03 - perfil heterogêneo com 03 tipos de materiais.

O terceiro perfil apresenta 06 camadas com características aparentes distintas. Analisando-se mais detalhadamente, percebe-se que se trata de dois tipos de materiais em estágios de cimentação aparentemente diferentes (Figura 5.6).

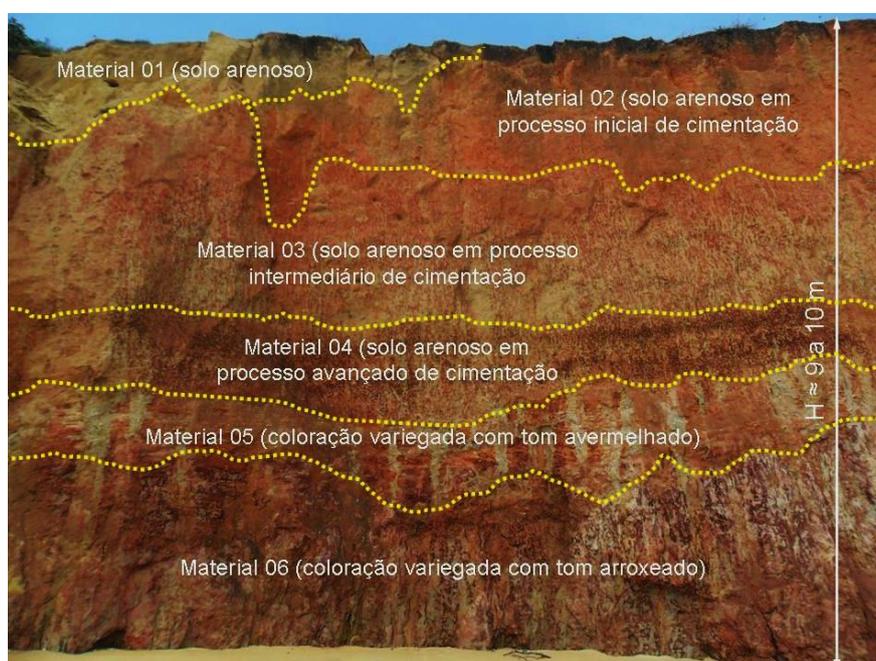


Figura 5.6 Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados.

Por fim, o quarto tipo de perfil possui as mesmas camadas do perfil anterior com diferentes disposições, mas, além disso, destaca-se a existência de uma camada cimentada intermediária constituída de seixos (Figura 5.7). O checklist do trecho está preenchido no Anexo 04.

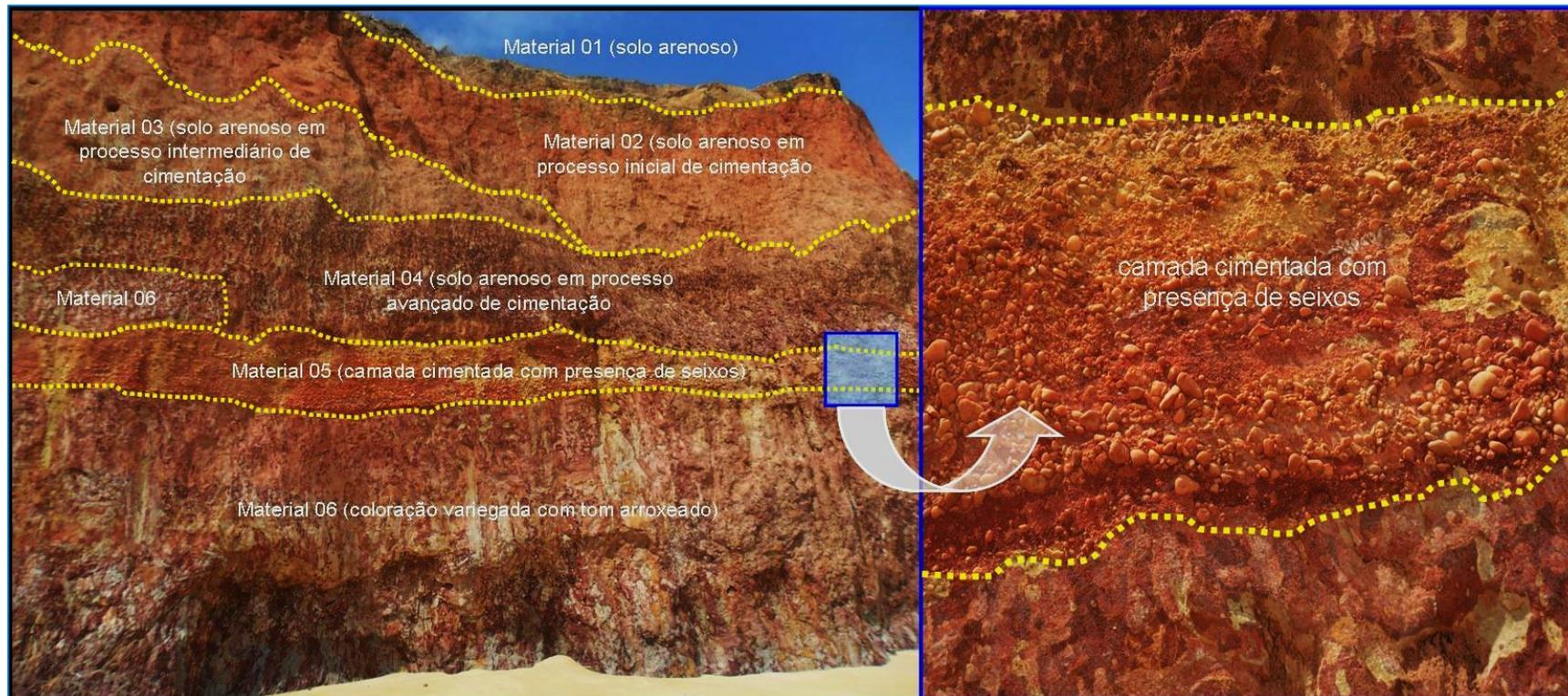


Figura 5.7 Trecho 03 – Perfil com camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados com destaque para camada cimentada de seixos

Trecho 04

Em geral, as falésias possuem alturas variáveis, de 4,00 m a 8,00m, estão em contato direto com o mar em alguns trechos e não apresenta nenhum tipo de vegetação na base e na face.

O trecho 04 se estende até o final da área estudada, com aproximadamente 260 m, e possui dois perfis típicos no que concerne à sua constituição: um apresenta características similares ao final do trecho 03 e o outro é constituído de um material arenoso com inclinação em torno de 90° (Figura 5.8).

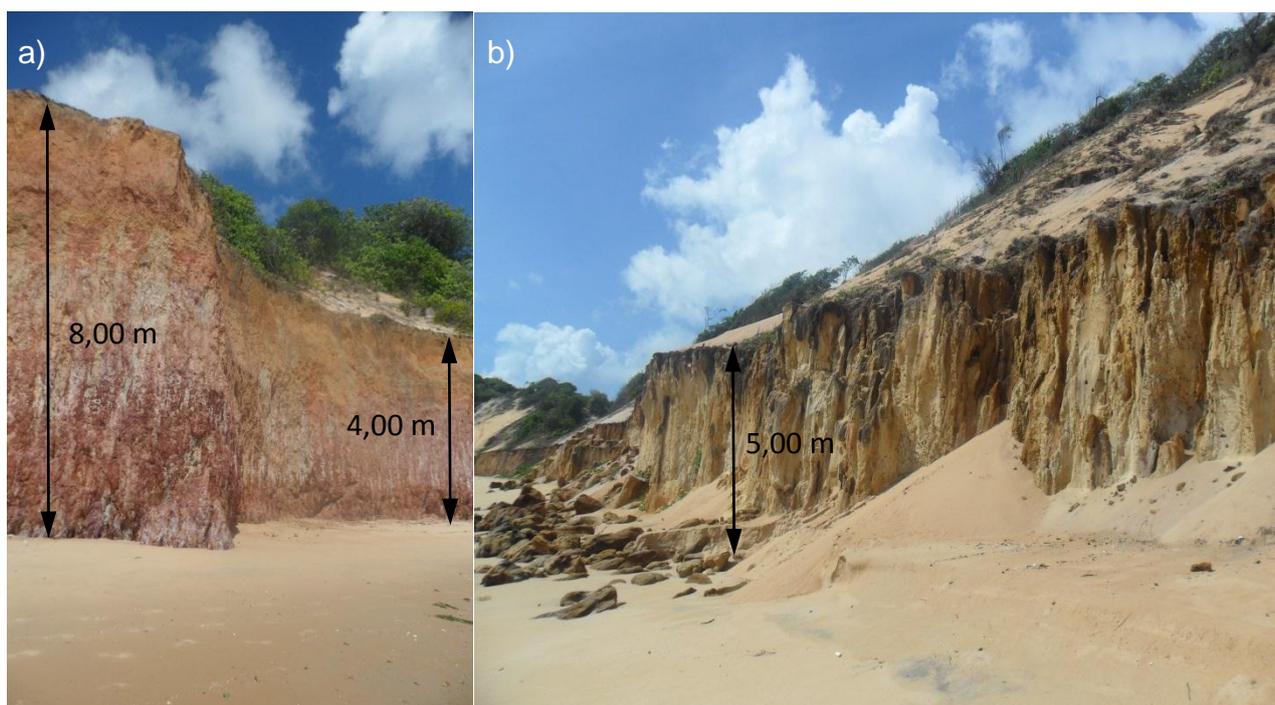


Figura 5.8 Constituição das falésias no trecho 04: a) constituição similar ao final do trecho 03; b) falésias formadas por solo arenoso.

No que diz respeito aos mecanismos de ruptura e erosão de falésias, destacam-se praticamente todos os observados nos trechos anteriores: quedas, escorregamentos e, principalmente, solapamento de base. O checklist do trecho 04 está apresentado no Anexo 05.

5.2. Ensaios de laboratório e estimativa de parâmetros

5.2.1. Ensaios de caracterização

Com o intuito de obter a caracterização geotécnica dos materiais constituintes da falésia, foram coletadas 25 amostras ao longo dos trechos definidos para a área de estudo. Para cada amostra foram realizados ensaios de granulometria conjunta, limites de

consistência e densidade dos grãos. Na sequência, são apresentados os resultados (Tabela 5.1) e comentários conforme dados obtidos nos ensaios.

Tabela 5.1 Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

N° da amostra	Trecho	Ensaio								Classificação
		Granulometria (%)				Densidade dos grãos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
		Pedregulho	Areia	Silte	Argila					
Aterro (A1)	01	9,5	72,9	6,6	11,0	2,65	NL	NP	-	SM
01		0,7	37,1	17,6	44,7	2,72	34,5	23,4	11,1	ML
02		17,3	50,8	7,5	24,5	2,62	29,6	20,4	9,2	SC
03		0,0	36,0	13,3	50,7	2,62	34,4	21,1	13,3	CL
04		1,0	68,5	6,4	24,1	2,67	30,9	22,4	8,5	SC
05	02	2,9	61,1	15,9	20,1	2,62	25,3	18,6	6,7	SM-SC
Aterro (A6)		0,5	73,1	11,9	14,5	2,65	NL	NP	-	SM
06		0,4	49,5	13,7	36,4	2,67	25,9	20,2	5,7	SM-SC
07		1,1	41,4	14,4	43,1	2,71	34,2	19,3	14,9	CL
08		0,3	73,6	4,2	21,9	2,62	17,2	13,1	4,1	SC
09		0,4	62,7	20,2	16,8	2,63	29,3	18,9	10,4	SM-SC
10		0,2	87,7	1,6	10,5	2,64	17,6	13,6	4,0	SC
11		1,9	45,8	11,0	41,3	2,74	38,4	22,7	15,7	CL
12		0,3	61,7	19,0	19,0	2,61	28,5	19,1	9,4	SM-SC
13		1,0	49,6	17,4	32,0	2,64	28,7	19,9	8,8	SC
14	03	5,2	55,5	20,4	18,9	2,69	25,6	19,9	5,7	SM-SC
15		0,4	84,8	1,7	13,1	2,60	NL	NP	-	SM-SC
16		1,3	55,5	17,6	25,6	2,68	28,0	18,3	9,7	SC
17		35,9	40,7	12,5	10,9	2,64	32,9	21,0	11,9	GW
18		11,7	49,1	22,2	17,0	2,73	26,9	16,3	10,6	SM-SC
19		3,0	56,5	16,7	23,8	2,65	24,3	16,7	7,6	SM-SC
20		0,3	60,7	16,3	22,8	2,64	28,0	19,1	8,9	SM-SC
21		57,0	29,0	5,0	9,0	2,63	40,6	19,3	21,3	GW
25	04	42,2	43,4	5,8	8,6	2,68	30,6	17,2	13,4	GW
22		0,7	46,6	10,7	42,0	2,65	38,9	18,4	20,5	CS
23		0,4	72,6	1,6	25,4	2,60	19,3	10,9	8,4	SC
24		0,0	97,6	1,6	0,8	2,71	NL	NP	-	SP

Trecho 01

No trecho 01 foram coletadas quatro amostras deformadas, das quais duas foram retiradas da base e topo no início do trecho (amostras A01 e A02) e as outras duas da base e topo na porção central e final do trecho respectivamente (amostras A03 e A04).

As amostras A01 e A03 apresentam uma coloração variegada, no entanto, com características visuais distintas, de tal forma que na amostra A03 predomina a coloração avermelhada enquanto que na amostra A01 predomina a esbranquiçada. Além dessas colorações observam-se também as cores laranja e amarela (Figura 5.9).

Mesmo com essas características distintas as amostras apresentaram similaridades tanto em relação à análise granulométrica (0% a 1% de pedregulho, 36% a 37% de areia e 62% a 64% de finos) quanto aos Limites de Liquidez ($LL_{A1}=34,5\%$ e $LL_{A3}=34,4\%$) e Limite de Plasticidade ($LP_{A1}=23,4\%$ e $LP_{A3}=21,1\%$). Essas amostras foram classificadas como argilas de baixa plasticidade e areia argilosas.



Figura 5.9 Local de coleta da amostra na base do trecho 01: a) amostra n°01; b) amostra n°03.

As amostras 02 e 04 apresentaram características visuais distintas, sendo que a amostra 02 se assemelha mais às amostras da base (A1 e A3), conforme Figura 5.10. A amostra 02 apresenta uma coloração variegada com tom vermelho (predominante), laranja, amarelo e branco (em menor proporção), sendo constituída por 51% de areia, 32% de finos e 17% de pedregulho, este possivelmente originado pela presença de materiais de granulometria mais fina cimentados com óxido de ferro. Já a amostra 04 apresenta uma cor mais homogênea com tom vermelho-alaranjado e uma quantidade maior de material arenoso (69%) e pouco pedregulho (1%).



Figura 5.10 Local de coleta da amostra n°02 no topo do trecho 01: a) visão geral; b) detalhe do solo (percebe-se a coloração variegada entre vermelho, laranja, amarelo e branco).

Trecho 02

No trecho 02, foram coletadas 06 amostras, sendo três no topo e três na base. Para a obtenção das amostras no topo foram utilizados equipamentos manuais de escavação e um trado manual para transpassar a camada de aterro existente sobre a falésia.

Os resultados dos ensaios de caracterização mostraram que todas as amostras, exceto a A07 a qual possui 43% de argila e 41% de areia, apresentaram material arenoso em maior quantidade, entre 50% e 88%. Depois se observou um percentual maior de argila, variando de 11% a 36%. Assim, a amostra A07 foi classificada como argila de baixa plasticidade e as demais como areias argilosas ou areias siltosas.

Em relação aos limites de consistência, observou-se que as amostras A05, A06, A08 e A10 forneceram índices de plasticidade semelhantes. Os valores do IP variaram de 4% a 7%, sendo que nas amostras A05 e A06 o limite de liquidez obtido foi da ordem de 25%, e nas amostras A08 e A10 em torno de 17%. Enquanto que as amostras A07 e A09 apresentaram índices de plasticidade de 15% e 10% respectivamente. Isso quer dizer que as amostras da base da falésia são mais plásticas que as do topo, exceto para a porção inicial do trecho, na qual o material da base e topo são semelhantes.

Trecho 03

No trecho 03, foram coletadas 12 amostras. Para a amostragem nesse trecho foi necessário a utilização de uma escada para coleta de material da face superior da falésia. Os resultados dos ensaios apontaram que as amostras A11 e A12 apresentam realmente as mesmas características dos materiais do trecho 02, sendo estes classificados como argilas de baixa plasticidade variegadas e areias siltosas ou argilosas, na base e topo da falésia respectivamente.

No restante do trecho há intercalações de camadas e materiais de granulometria mais grossa (amostras A17, A21 e A25), contudo, mesmo havendo a predominância de pedregulhos (variando de 35,9% a 57,0%) essas camadas contam com uma presença significativa de finos (entre 14,0% e 23,4%), inclusive com índices de plasticidades que variam de 11,9% a 21,3%.

As demais amostras foram classificadas como areias argilosas ou siltosas, possuindo coloração homogênea avermelhada no topo e variegada na base. Além dessas

observações, verifica-se que as amostras variegadas das partes mais inferiores da falésia apresentam um maior percentual de material argiloso (de 25,6% a 32,0%) enquanto que as amostras variegadas do meio da falésia apresentam uma quantidade menor (de 17,0% a 18,9%).

Em relação aos materiais mais homogêneos que constituem o topo da falésia, percebem-se características próximas àquelas observadas para o material presente no trecho 02 e final do trecho 01.

Trecho 04

A coleta no trecho 04 compreendeu um total de 03 amostras. A amostra A22 foi coletada de uma camada que aparece no final do trecho 03 entre os materiais da base e topo citados anteriormente e se estende até a base da falésia no início do trecho 04. Trata-se de uma argila arenosa variegada com coloração amarela e laranja, com índice de plasticidade em torno de 20%.

Já a amostra A23, retirada do topo da falésia, é classificada como areia argilosa e apresenta similaridade com o solo constituinte do topo dos trechos anteriores, apesar da mudança de tonalidade de laranja/vermelho para cinza e amarelo.

Por fim, a amostra A24 foi retirada do final do trecho 04, onde há a presença de falésias em um processo inicial de formação. Nesse local, o solo é arenoso, sendo classificado como areia mal graduada (SP), no entanto, o material apresenta coesão suficiente para manter as falésias com inclinação em torno de 90°.

5.2.2. Ensaio de cisalhamento direto

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram moldados três corpos de prova para o solo do topo da falésia (T1, T2 e T3) e três para a base (B1, B2 e B3). Os índices físicos de cada amostra estão detalhados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Parâmetros iniciais das amostras submetidas aos ensaios de cisalhamento.

Amostra	Tensão normal (kPa)	w _i (%)	w _r (%)	γ (kN/m ³)	G	e	γ _d	S (%)
T-1	50	3,93	20,19	15,72	2,64	0,75	15,13	13,94
T-2	100	3,93	15,15	17,04	2,64	0,61	16,39	16,99
T-3	200	3,93	16,51	16,10	2,64	0,70	15,50	14,74
B-1	50	9,79	22,99	18,84	2,70	0,57	17,16	46,05
B-2	100	9,79	17,56	19,08	2,70	0,55	17,38	47,52
B-3	200	9,79	16,86	20,04	2,70	0,45	18,58	58,30

Os resultados dos ensaios são representados para as amostras do topo e da base através das curvas tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal e variação volumétrica ($\Delta V/V_0$) *versus* deslocamento horizontal (Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14).

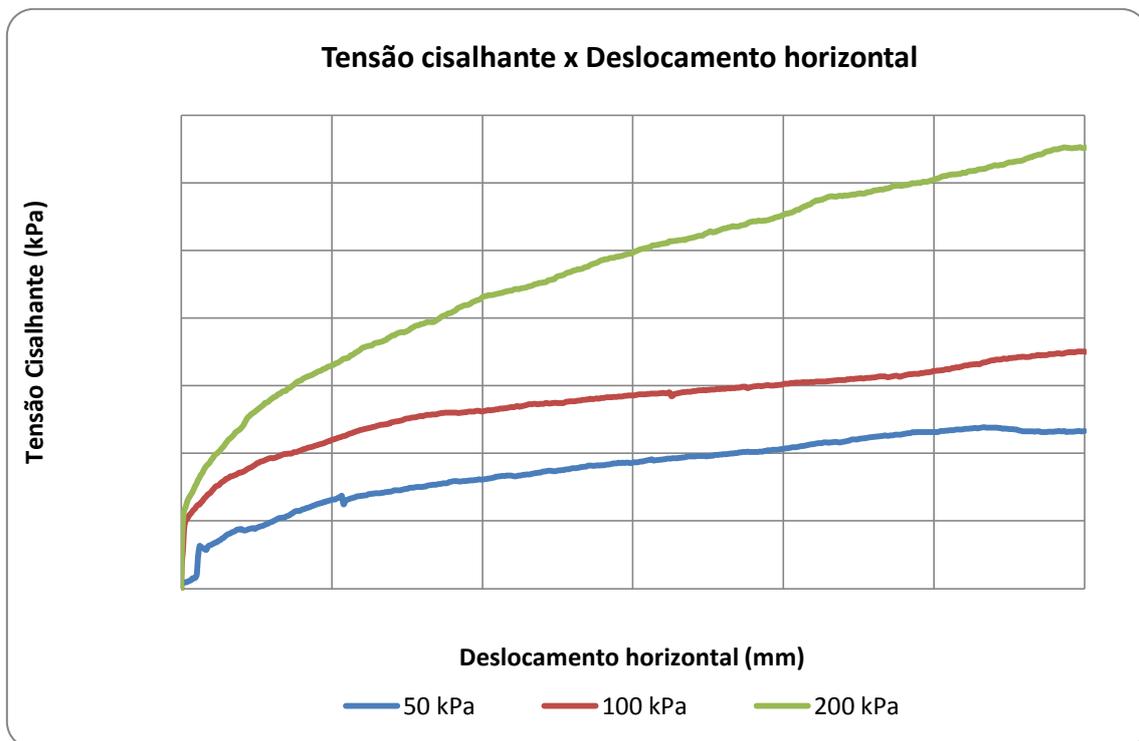


Figura 5.11 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal para as amostras do topo.

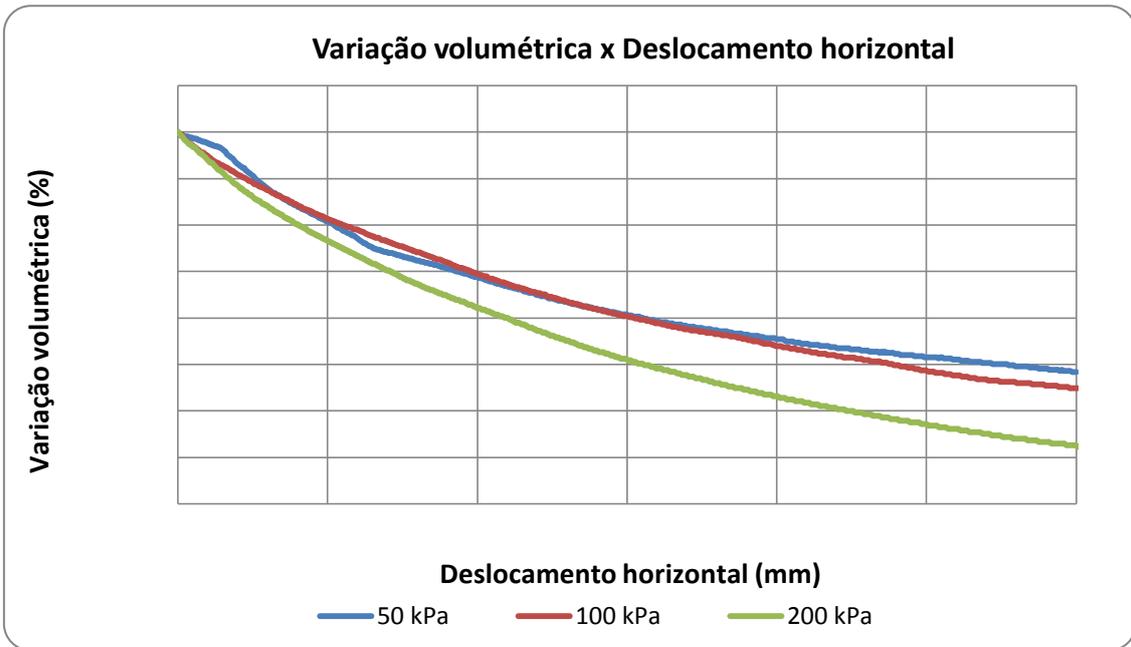


Figura 5.12 Variação volumétrica x deslocamento horizontal para as amostras do topo.

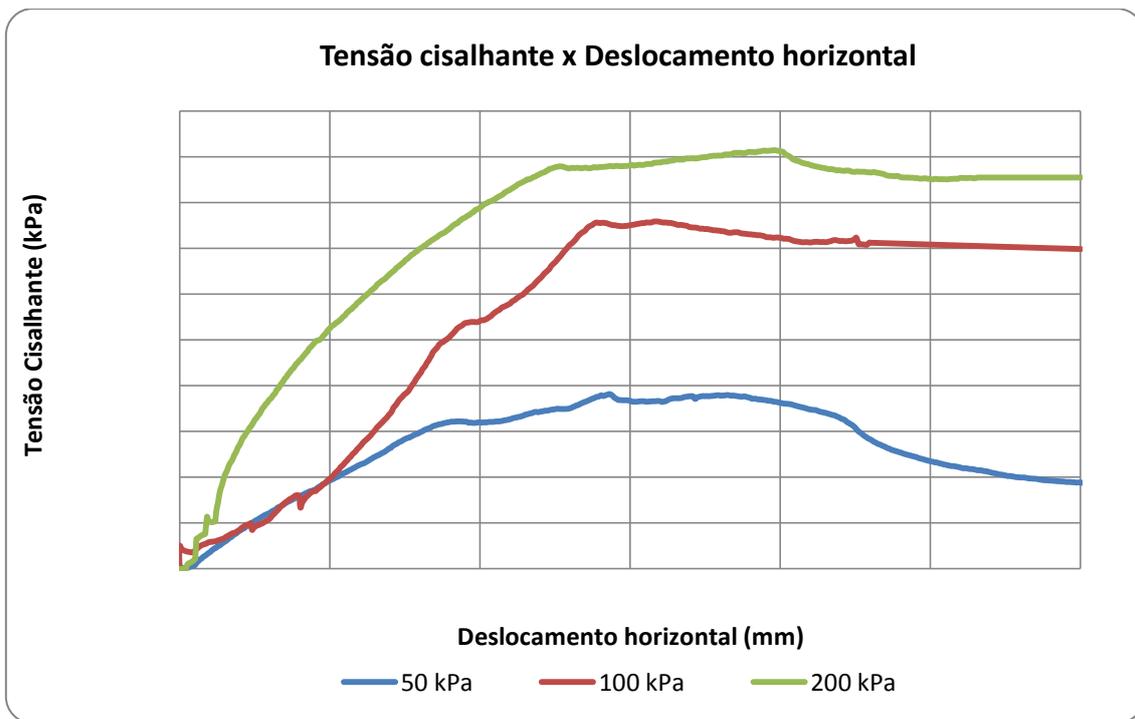


Figura 5.13 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal para as amostras da base.

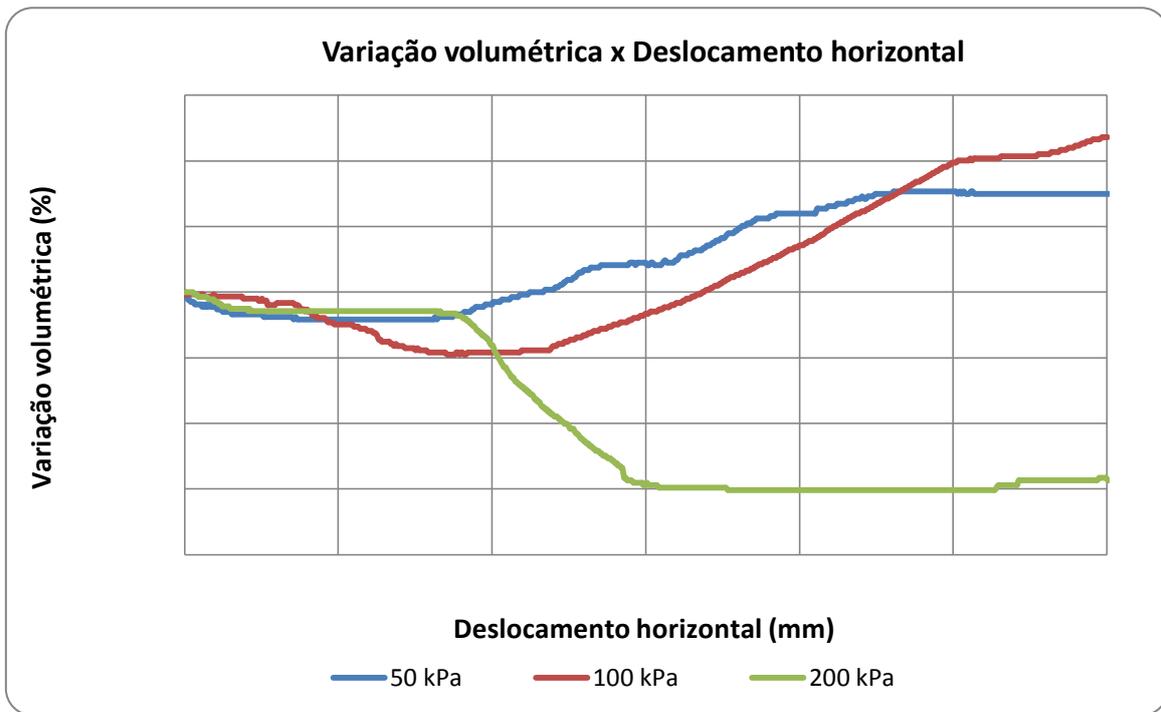
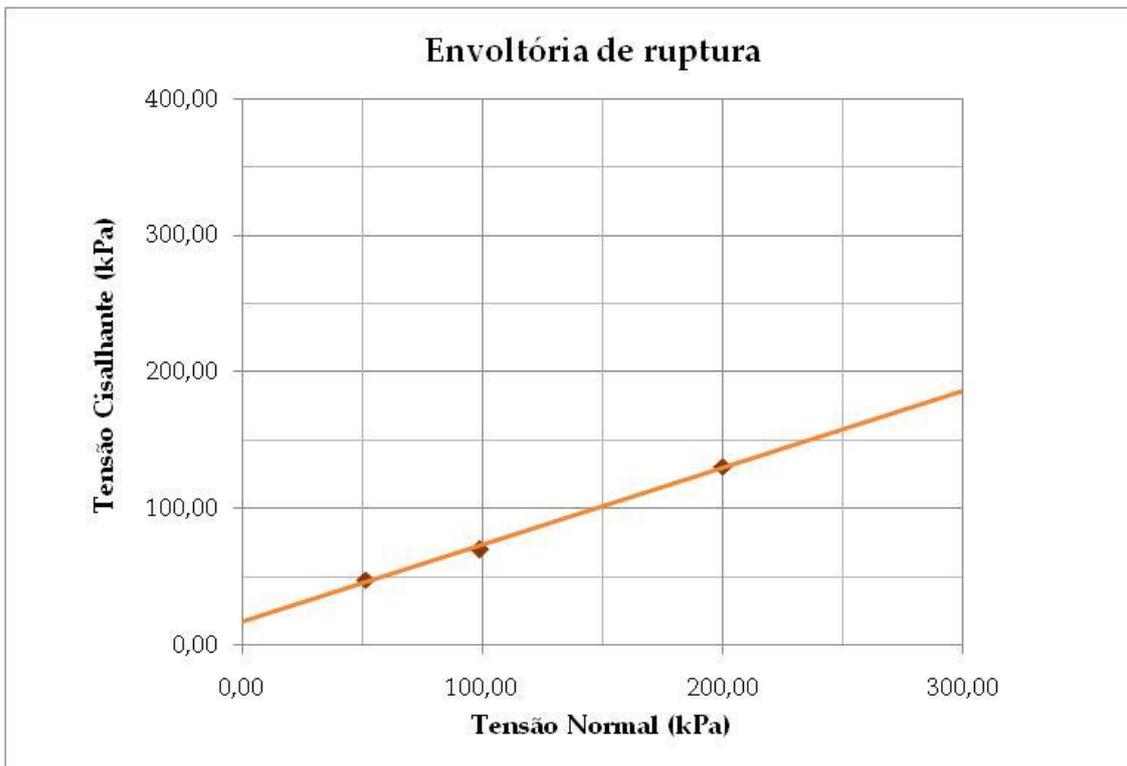


Figura 5.14 Variação volumétrica x deslocamento horizontal para as amostras da base.

De acordo com os gráficos percebe-se que, nas amostras do topo, há um aumento da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal sem a evidência de um pico bem definido e que não há expansão da amostra no decorrer do ensaio. Enquanto que para as amostras da base existe um pico bem definido para a tensão normal de 50 kPa e menos evidente para as tensões de 100 e 200 kPa, além disso, percebe-se que existe um comportamento expansivo do solo para as tensões de 50 e 100 kPa, no entanto não foi apresentado esse comportamento para a tensão de 200 kPa. Isso significa que a tensão normal de 200kPa é maior que a tensão de pré-adensamento do solo.

As envoltórias de resistência para as amostras do topo são apresentadas na Figura 5.15 e para as amostras da base, na Figura 5.16.

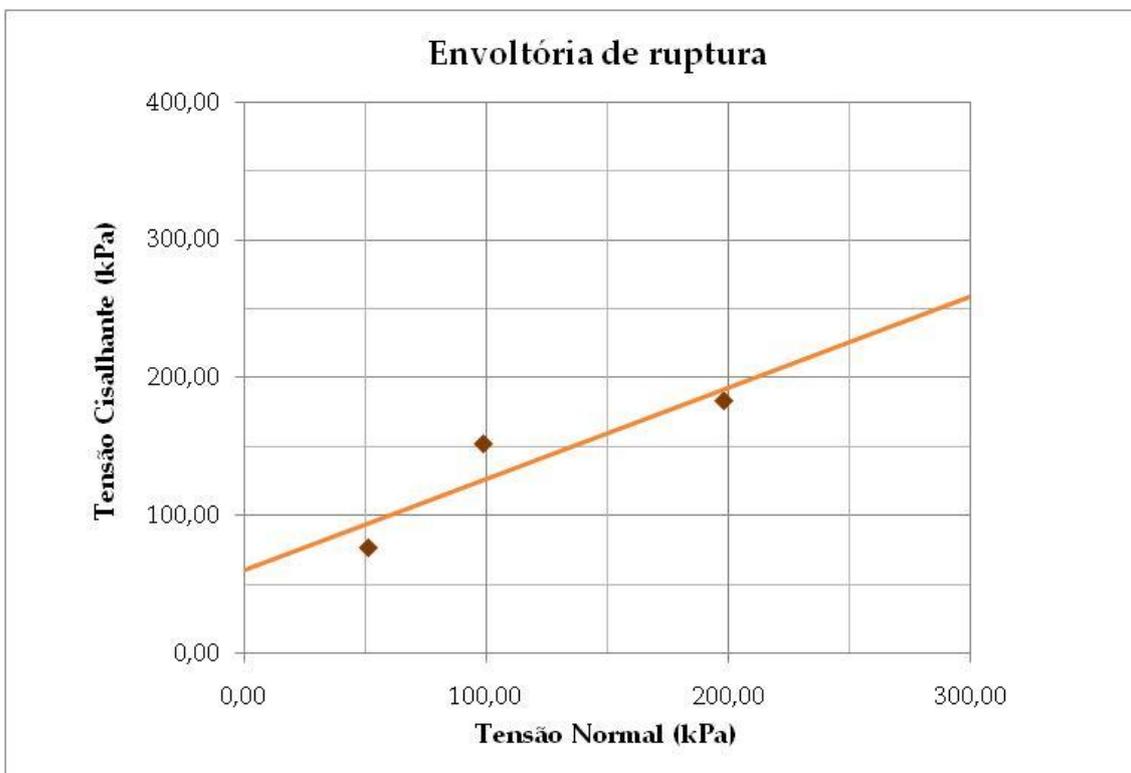


$\phi' = 29,5^\circ$

$c' = 16,9 \text{ kPa}$

$r^2 = 0,9969$

Figura 5.15 Envoltória de resistência para as amostras do topo.



$\phi' = 33,6^\circ$

$c' = 59,9 \text{ kPa}$

$r^2 = 0,8228$

Figura 5.16 Envoltória de resistência para as amostras da base.

Na Figura 5.15, observa-se que o ângulo de atrito para o solo do topo foi igual a 29,5° e que a coesão foi de 16,9 kPa. Já na Figura 5.16, para as amostras da base o ângulo de atrito encontrado foi de 33,6° e a coesão foi igual a 59,9 kPa.

5.2.3. Estimativa dos parâmetros de resistência

Para efeito de estimativa dos parâmetros necessários à análise de estabilidade das falésias foram analisados e coletados dados em pesquisas desenvolvidas na região Nordeste, especificamente relacionadas às propriedades geotécnicas da Formação Barreiras. De modo que os parâmetros fossem relacionados basicamente para os três tipos de solos principais identificados nas falésias de Baía Formosa/RN: areia argilosa ou siltosa com coloração homogênea de alaranjada a avermelhada, argila arenosa ou de baixa plasticidade de coloração variegada, e areia mal graduada (areia média). Optou-se por estabelecer valores médios por entender que possui maior representatividade para toda falésia. A compilação dos dados baseou-se nas pesquisas desenvolvidas por GOMES (2001), LIMA (2002), SILVA (2003), SEVERO (2005), MARQUES et al. (2006) e SEVERO (2011). A seguir, nas Tabelas 5.3 e 5.4 são apresentadas as faixas de variação para cada parâmetro obtido pelos autores supracitados.

Tabela 5.3 Parâmetros obtidos por outros autores para solos homogêneos (SC ou SM) da Formação Barreiras.

Parâmetro	SILVA (2003)	SEVERO (2005)	SEVERO (2011)	MARQUES et al. (2006)	GOMES (2001)	LIMA (2002)
Local	Tibau do Sul/RN	Tibau do Sul/RN	Tibau do Sul/RN	Maceió/AL	Recife/PE	Recife/PE
Caracterização						
Coloração	Homogênea avermelhada	Homogênea avermelhada	Homogênea marrom-avermelhada	Homogênea creme claro	Homogênea amarelada	Homogênea parda
Pedregulho	0,2 a 0,8	0,0	0,3	0	0 a 1,0	0
Areia	71,5	37,5	62,2	63 a 68	49 a 74	39
Silte + Argila	27,7 a 28,3	62,5	37,5	32 a 37	26 a 50	61
LL	NL a 35,9	28,8	27,0	48 a 49	23,5 a 29,8	42
LP	NP a 20,2	21,5	15,7	28 a 30	19,0 a 19,1	25
IP	NIP a 15,7	7,3	11,3	19,0 a 20,0	4,4 a 13,8	17
Gs	2,67	2,66	2,64	2,61 a 2,63	2,63 a 2,66	2,68
γ	15,1 a 16,0	14,9 a 15,5	17,2	14,4 a 16,0	18,9	12,8 a 14,9
Resistência						
c'	45 a 53	48 a 53,3	5,8	0	23,1 a 28,8	10 a 28
ϕ'	27 a 29	26,9 a 28,2	29,4	30 a 31,9	21 a 30	31 a 32

Tabela 5.4 Parâmetros obtidos por outros autores para solos heterogêneos (SC, SM ou CL) da Formação Barreiras.

Parâmetro	SILVA (2003)	SEVERO (2005)	SEVERO (2011)	SEVERO (2011)	MARQUES et al. (2006)	GOMES (2001)
Local	Tibau do Sul/RN	Tibau do Sul/RN	Tibau do Sul/RN	Tibau do Sul/RN	Maceió/AL	Recife/PE
Caracterização						
Coloração	Variiegada branca e vermelha	Variiegada branca e vermelha	Variiegada branca e vermelha	Variiegada vermelha, roxo e branca	Variiegada	Variiegada
Pedregulho	0,1 a 0,8	0	1,6	27,5	0 a 9	9,0
Areia	57,2 a 71,5	63,0	65,4	45,5	58 a 79	64,0
Silte + Argila	27,7 a 42,7	37	33,0	27,0	15 a 33	27,0
LL	35,9 a 37,3	31,5	22,2	23,3	34 a 39	53,2
LP	20,2 a 23,3	15,1	16,2	18,3	22 a 26	29,4
IP	14,0 a 15,7	16,3	6,0	5,0	12 a 13	23,8
Gs	2,60 a 2,68	2,61	2,64	2,67	2,61 a 2,62	2,67
γ (KN/m ³)	18,7 a 19,8	18,3 a 19,1	18,7	18,4	16,2 a 18,1	17,9
Resistência						
c'	45	45,4	52,2	34,8	0 a 1,6	28,8
ϕ'	27	26,8	33,3	32,0	27,9 a 34,9	33,0

A partir da média aritmética entre os valores obtidos pelos autores e os encontrados nos ensaios de cisalhamento direto, foram definidos os dados de entrada para o software GEO5 no que concerne à topologia de cada seção (Tabela 5.9). Já os dados para as falésias arenosas do final do trecho 04 foram estimados a partir da literatura de mecânica dos solos já que não foram encontrados trabalhos abordando encostas com as características específicas desse trecho.

Para os valores do Modulo de Elasticidade (E) foram estabelecidas intervalos de 20 a 60 MPa conforme estudos de SEVERO (2011), no entanto, as variações nessa faixa foram da ordem de centésimos no Fator de Segurança. Assim, os resultados foram apresentados referentes ao valor de 40 MPa. Com relação ao coeficiente de Poison (ν) adotou-se um valor de 0,3 para todos os solos. Na Tabela 5.5, são apresentados os dados utilizados para cada tipo de solo para a realização das análises de estabilidade.

Tabela 5.5 Parâmetros utilizados no programa GEO5.

Descrição	Classificação	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (Mpa)	ν	γ (kN/m ³)
Areia argilosa ou siltosa com coloração homogênea de alaranjada a avermelhada	(SC ou SM)	21,0	29,2	20	0,3	16,0
				40		
				60		
Areia argilosa ou siltosa com coloração variegada branca, amarela, vermelha e roxa.	(SC ou SM)	34,5	30,6	20	0,3	18,35
				40		
				60		
Argila de baixa plasticidade com coloração variegada branca, amarela, vermelha e roxa.	(ML ou CL)	77,7	31,6	20	0,3	16,2
				40		
				60		
Areia média com coloração amarela, cinza e preta	(SP)	10,0	32,0	20	0,3	17,0
				40		
				60		

5.3. Análises de estabilidade

5.3.1. Representação das seções transversais da falésia

A representação dos materiais constituintes e das seções transversais da falésia foi realizada a partir das observações e levantamentos realizados em campo e dos dados obtidos nos ensaios de laboratório.

Nos trechos 01 e 02, percebe-se a predominância de dois tipos de materiais constituintes da falésia, sendo o primeiro, classificado como argila de baixa plasticidade (CL), e o segundo trata-se de uma areia argilosa ou siltosa (SC-SM). As interfaces foram coerentes com as amostras coletadas em cada ponto, no entanto, podem existir variações que não puderam ser percebidas devido à presença de vegetação e solos depositados no pé da falésia.

Já nos trechos 03 e 04, não houve problemas de visualização da face da falésia, contudo, os materiais constituintes destes trechos, principalmente do trecho 03, são mais heterogêneos e apresentam aspectos visuais distintos, muitas vezes confundindo-se entre si. Os solos desses trechos são classificados como argila de baixa plasticidade, areia siltosa e areia argilosa, intercaladas eventualmente por camadas de pedregulhos com finos (camadas de seixos cimentada). A presença de camadas intercaladas de seixos são mais visíveis no trecho 03, apesar da existência do mesmo material nos trechos 02 e 04, porém de forma dispersa e não significativa.

Embora tenham sido representadas esquematicamente estas seções para a realização das análises de estabilidade, definidas estrategicamente para otimização dos trabalhos, foram realizadas análises adicionais de trechos específicos realizando-se uma interpolação e aproximação de valores tanto em relação à altura e espessura de camadas quanto à incidência de processos erosivos observados em campo (erosão basal).

As seções definidas neste item são apresentadas por trecho juntamente com a foto correspondente à seção (Figuras 5.17 a 5.28).

Trecho 01



Figura 5.17 Representação esquemática da Seção 1.1.

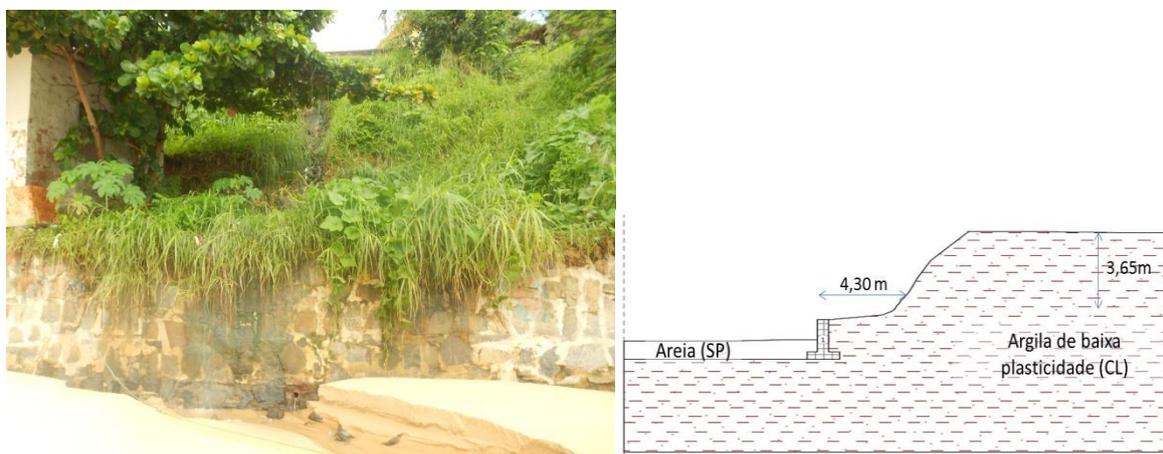


Figura 5.18 Representação esquemática da Seção 1.2.

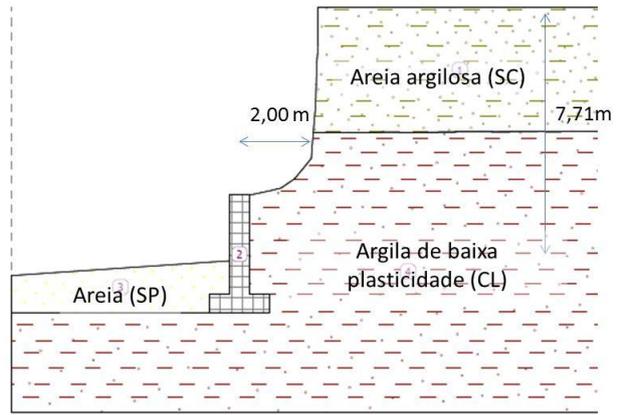


Figura 5.19 Representação esquemática da Seção 1.3.

Trecho 02

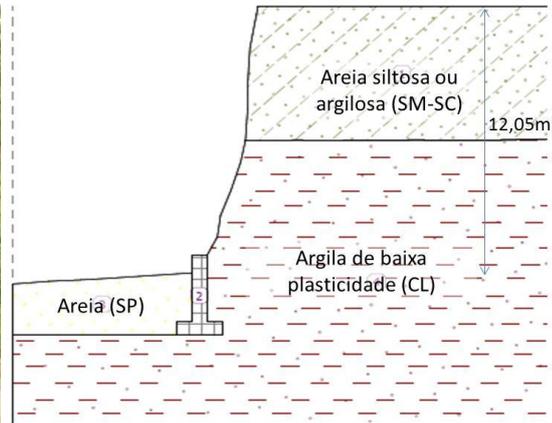


Figura 5.20 Representação esquemática da Seção 2.1.

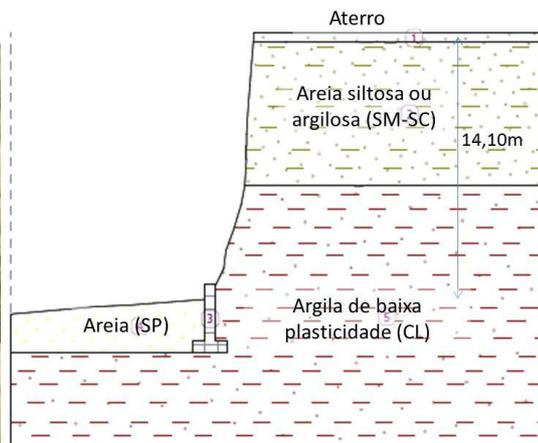


Figura 5.21 Representação esquemática da Seção 2.2.

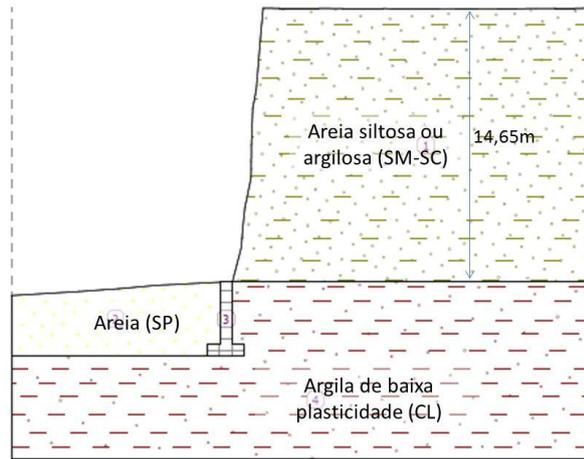


Figura 5.22 Representação esquemática da Seção 2.3.

Trecho 03

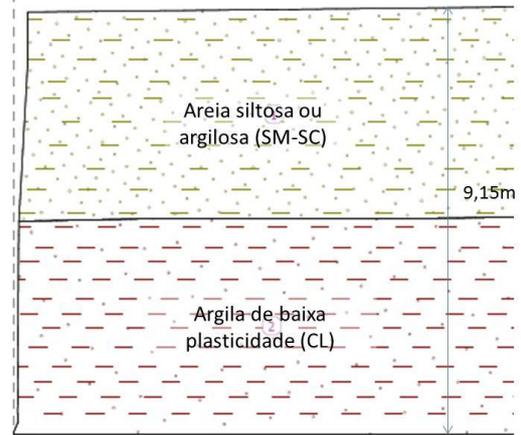


Figura 5.23 Representação esquemática da Seção 3.1.

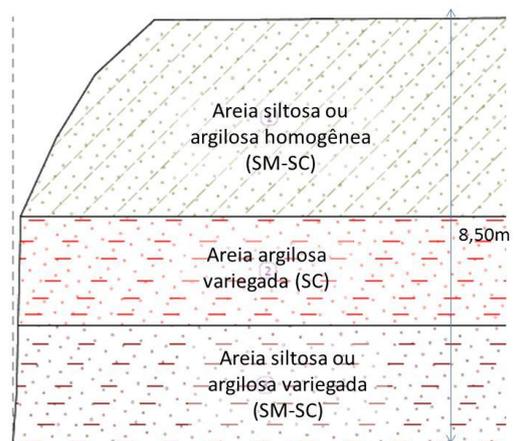


Figura 5.24 Representação esquemática da Seção 3.2.

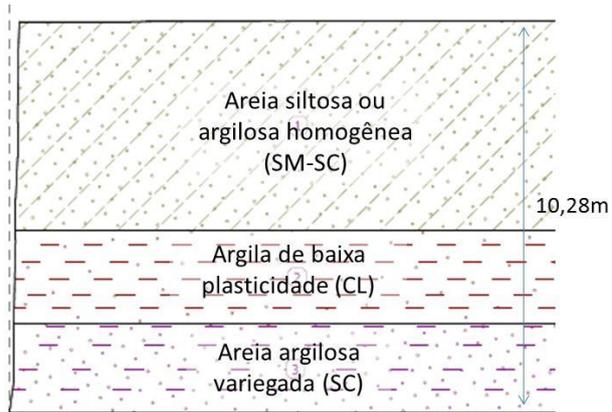


Figura 5.25 Representação esquemática da Seção 3.3.

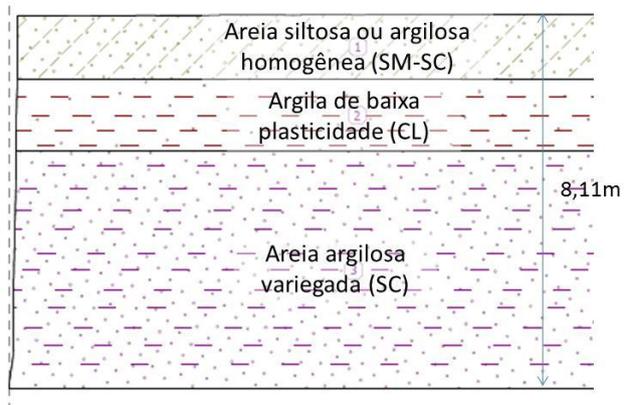


Figura 5.26 Representação esquemática da Seção 3.4.

Trecho 04

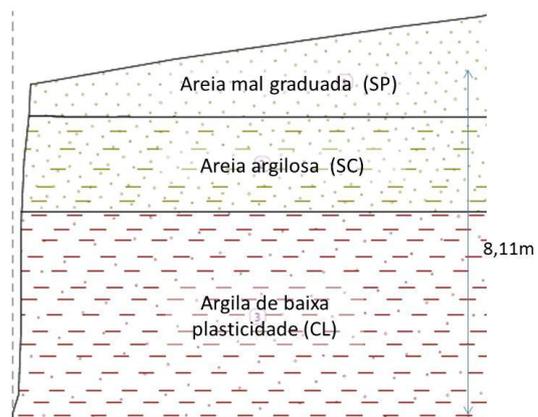


Figura 5.27 Representação esquemática da Seção 4.1.

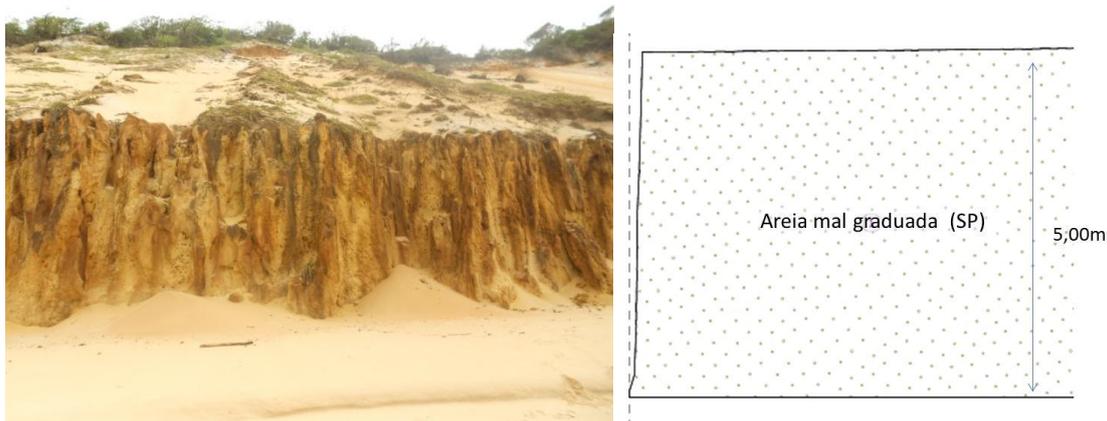


Figura 5.28 Representação esquemática da Seção 4.2.

5.3.2. Análises de estabilidade utilizando o módulo GEO5 - FEM

Neste módulo as análises foram realizadas de acordo com a configuração padrão utilizando o método iterativo de Newton-Raphson. Além disso, foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e o peso específico igual a 22 kN/m^3 para o muro de arrimo. Cada seção foi analisada sem nenhuma imposição de deslocamentos com exceção das extremidades já definidas pelo programa.

Os resultados contemplam as seções da falésia com a representação da dos deslocamentos horizontais em milímetros e o respectivo Fator de Segurança (FS) para cada seção analisada.

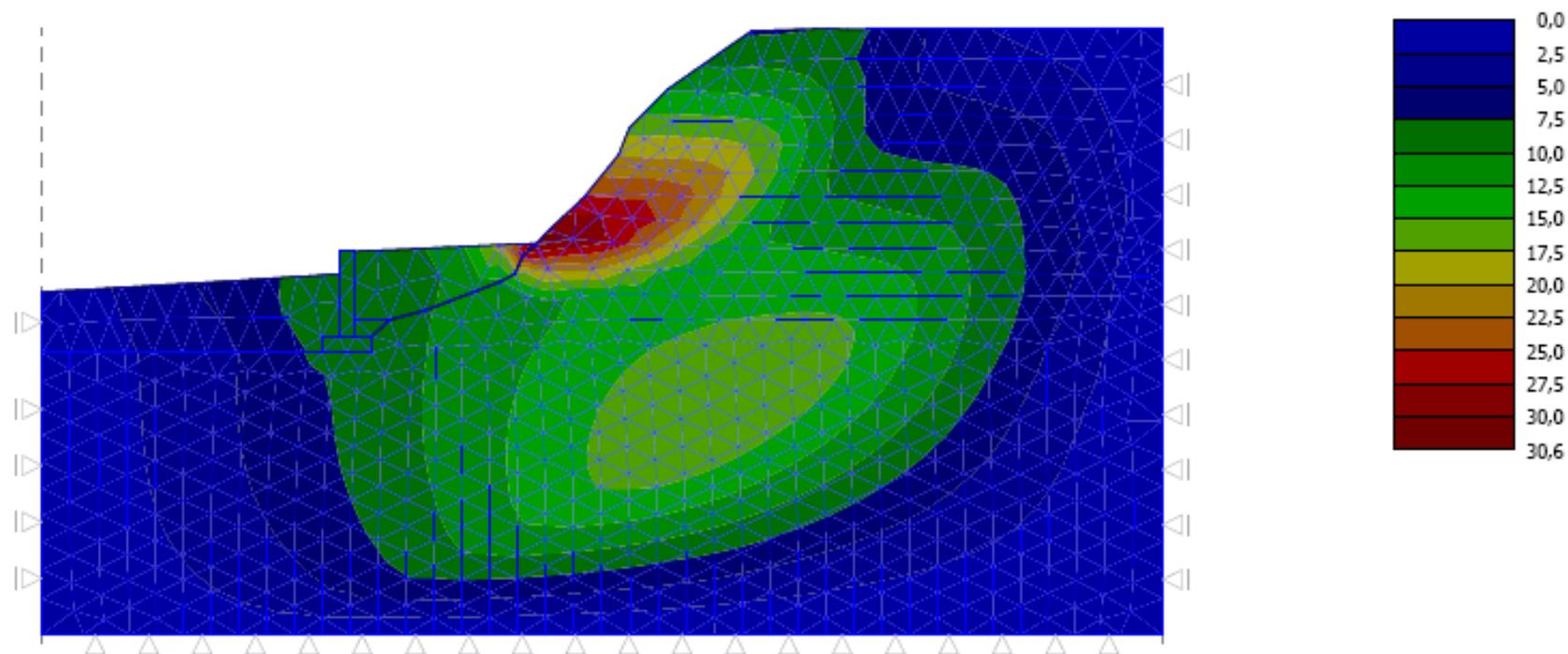
Trecho 01

No trecho 01, realizaram-se as análises de estabilidade para as três seções definidas anteriormente (S-1.1, S-1.2 e S-1.3). Os fatores de segurança variaram de 2,08 a 4,92, estando os resultados apresentados nas Figuras 5.29, 5.30 e 5.31.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <0,0; 30,6> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

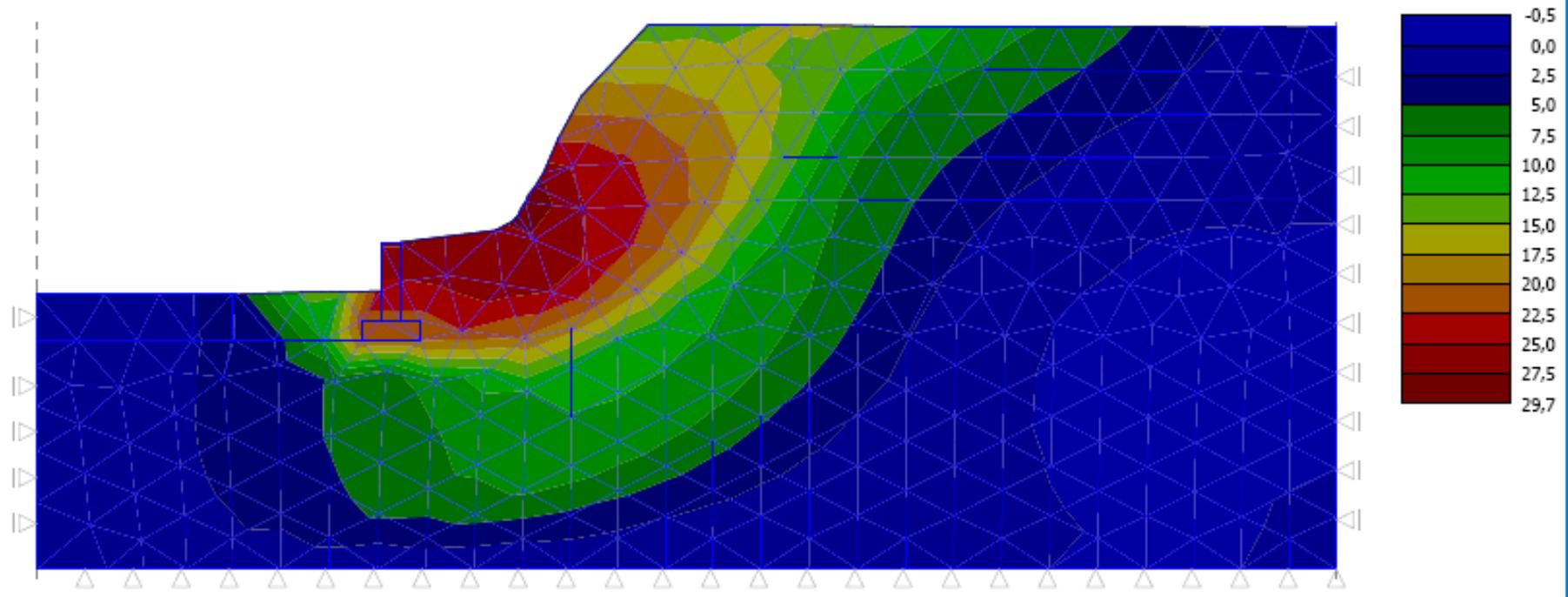
Fator de segurança FS = 4,78

Figura 5.29 Análise de estabilidade para a seção 1.1 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d x; escala : <-0,5; 29,7> mm



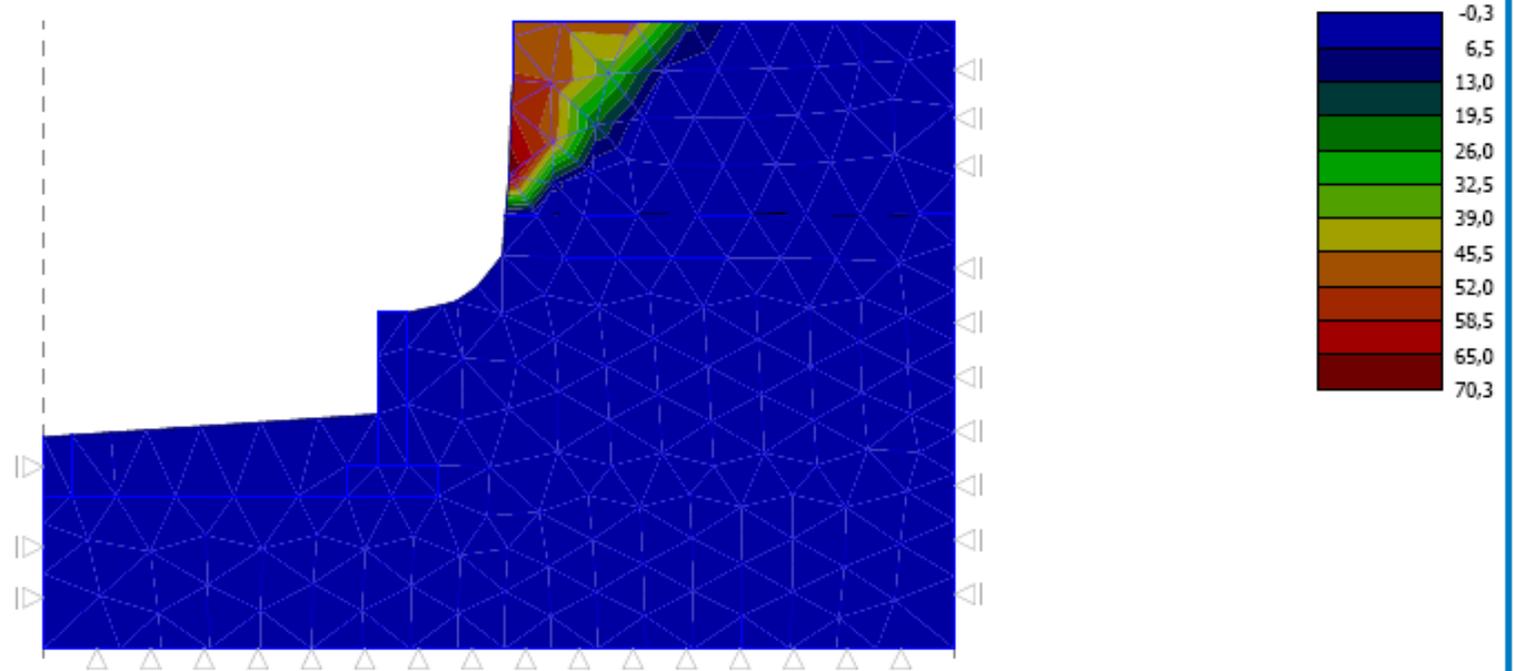
Análise de Estabilidade terminada com sucesso.
Ajuste de análise : padrão
Fator de segurança FS = 4,92

Figura 5.30 Análise de estabilidade para a seção 1.2 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <-0,3; 70,3> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

Fator de segurança FS = 2,08

Figura 5.31 Análise de estabilidade para a seção 1.3 utilizando o GEO5-FEM.

Em relação à escala de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.32).

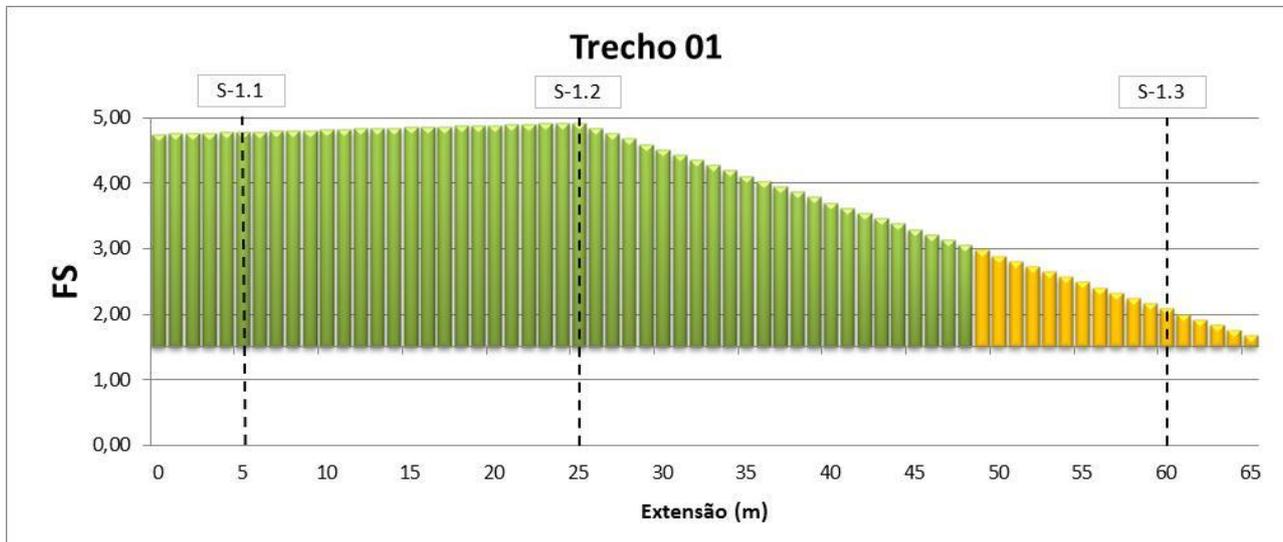


Figura 5.32 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 01.

De acordo com a Figura 5.32 percebe-se que o trecho 01 tem seu grau de estabilidade variando de moderado a estável. Aliás, em torno de 74% do trecho pode ser considerado estável, ou seja, os fatores de segurança encontrados são maiores ou igual a 3,0, correspondentes às faixas verticais representadas pela cor verde.

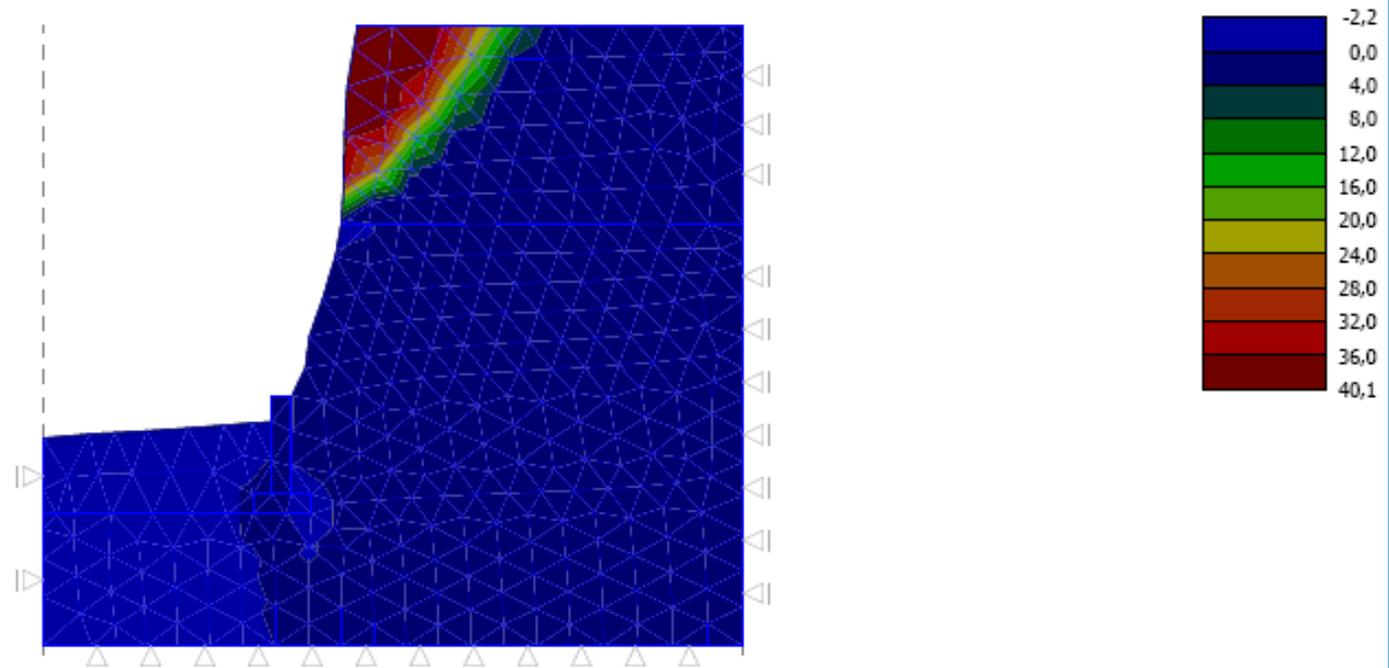
Trecho 02

No trecho 02, realizaram-se as análises de estabilidade para as três seções definidas anteriormente (S-2.1, S-2.2 e S-2.3). Os fatores de segurança variaram de 1,00 a 1,46, os resultados estão apresentados nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d z; escala : <-2,2; 40,1> mm



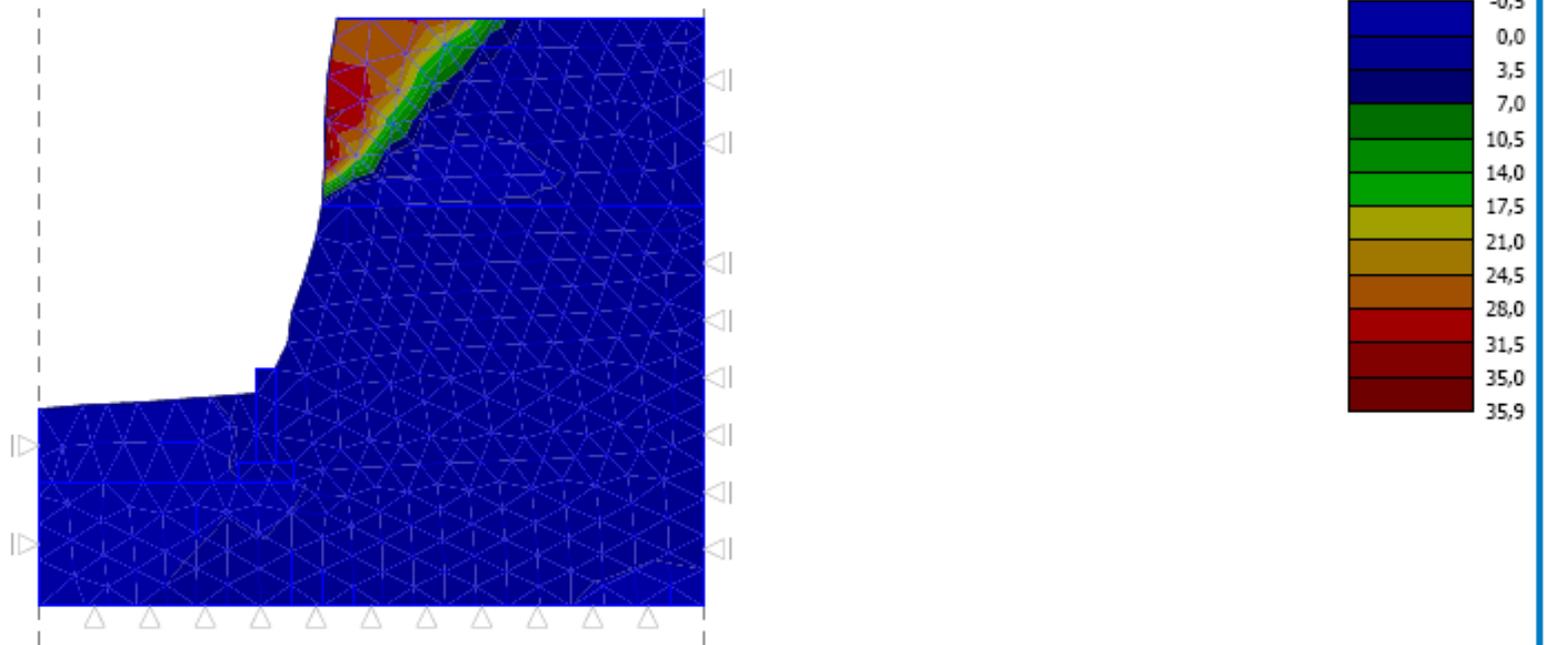
Análise de Estabilidade terminada com sucesso.
Ajuste de análise : padrão
Fator de segurança FS = 1,46

Figura 5.33 Análise de estabilidade para a seção 2.1 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <-0,5; 35,9> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

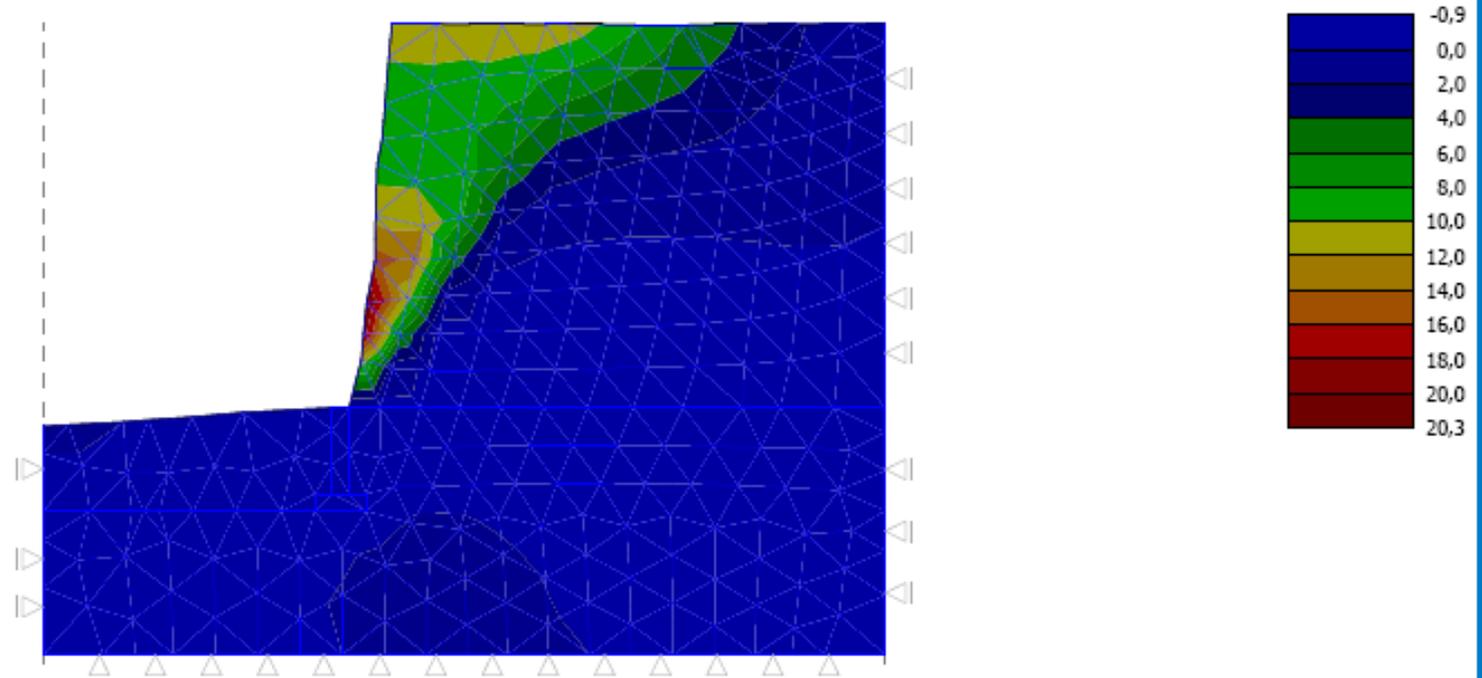
Fator de segurança FS = 1,46

Figura 5.34 Análise de estabilidade para a seção 2.2 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <-0,9; 20,3> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.
Ajuste de análise : padrão
Fator de segurança FS = 1,00

Figura 5.35 Análise de estabilidade para a seção 2.3 utilizando o GEO5-FEM.

Em relação à escala definida para o grau de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.36).

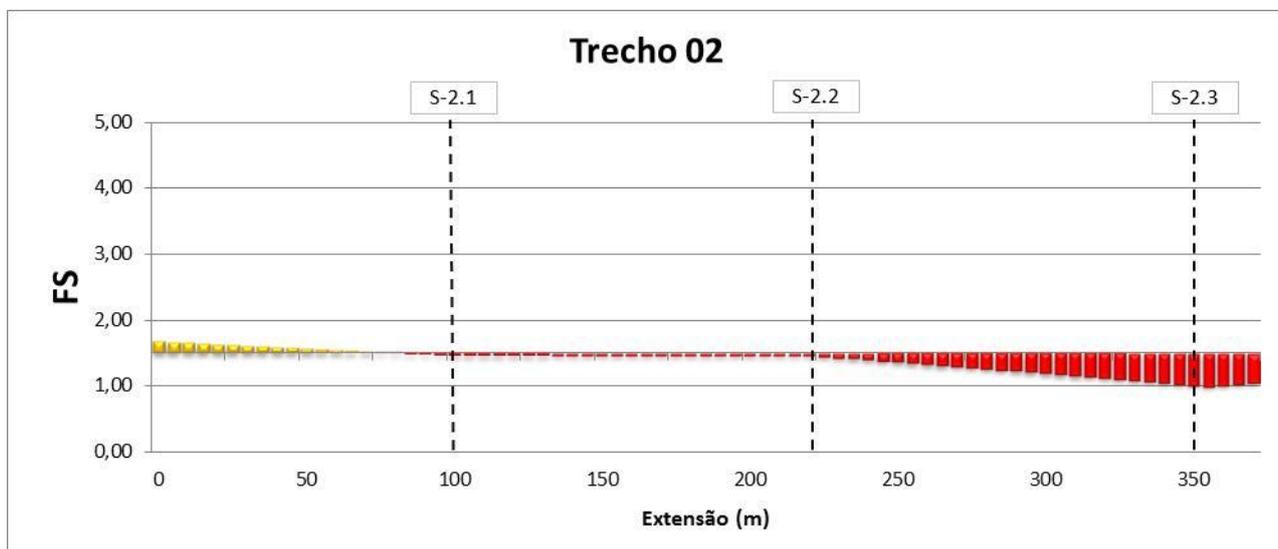


Figura 5.36 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 02.

De acordo com a Figura 5.36 percebe-se que o trecho 02 varia de moderado a instável, sendo que 18% do trecho são considerados instáveis, isto é, apresentam fatores de segurança inferiores a 1,5, correspondentes as faixas verticais representadas pela cor vermelha.

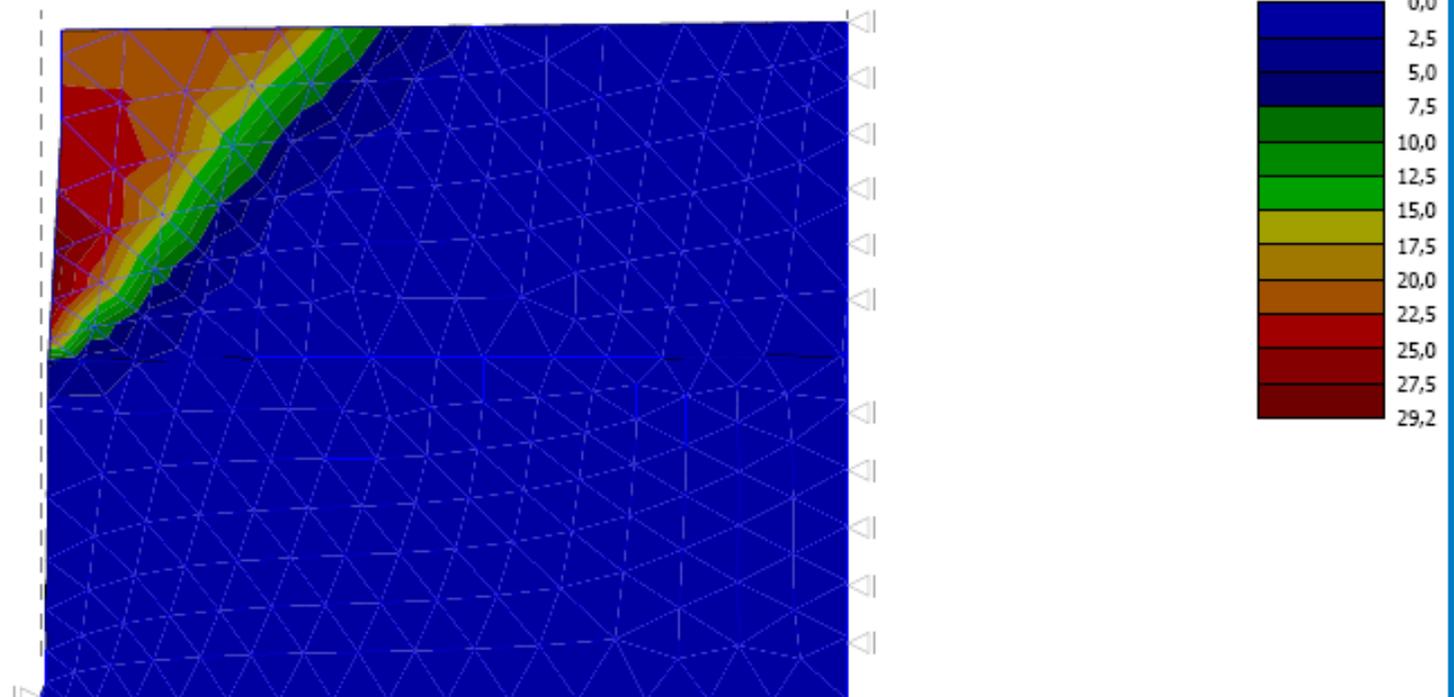
Trecho 03

No trecho 03, realizaram-se as análises de estabilidade para as quatro seções definidas anteriormente (S-3.1, S-3.2, S-3.3 e S-3.4). Os fatores de segurança variaram de 1,41 a 1,69, estando os resultados apresentados nas Figuras 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <0,0; 29,2> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

Fator de segurança FS = 1,41

Figura 5.37 Análise de estabilidade para a seção 3.1 utilizando o GEO5-FEM.

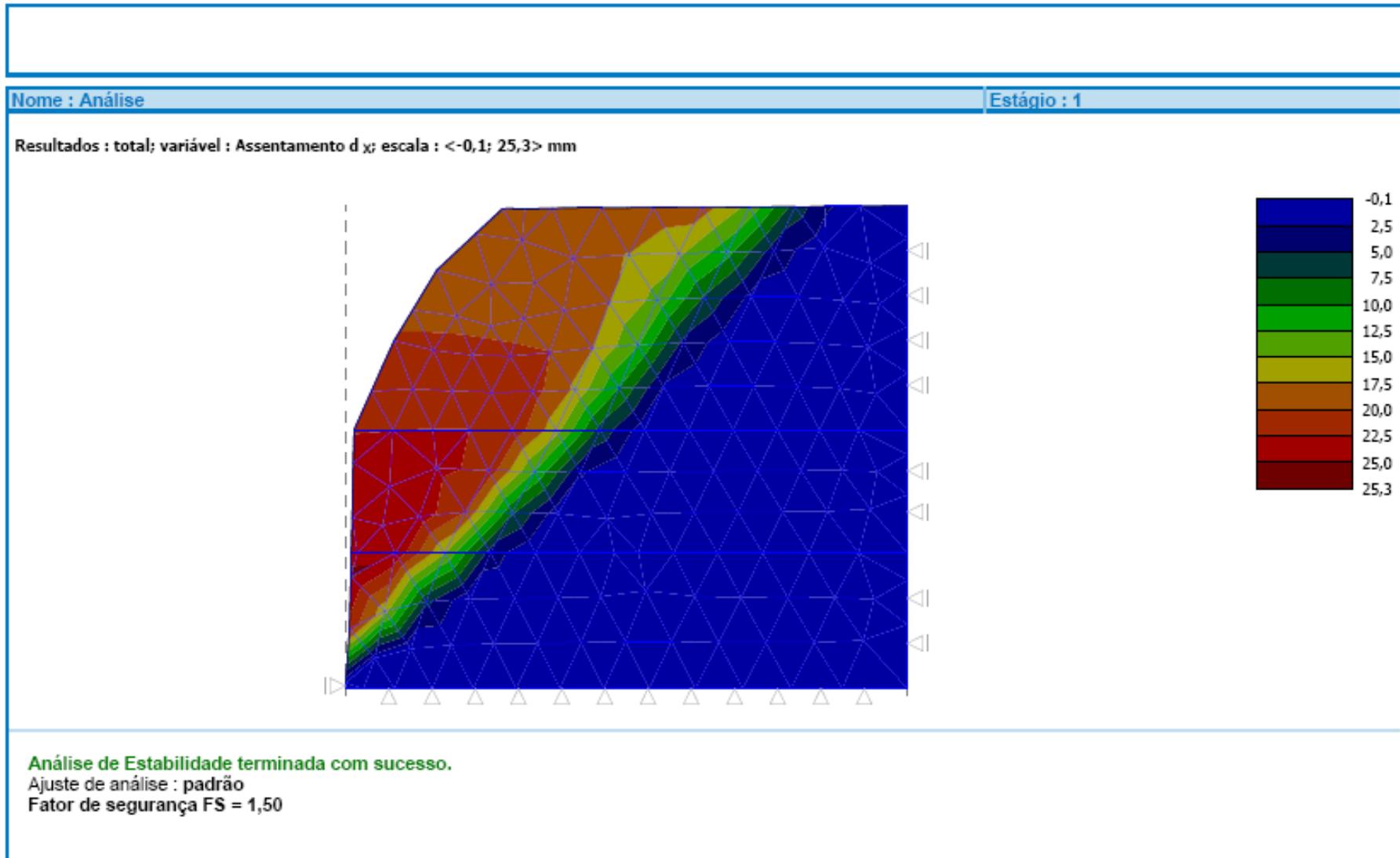
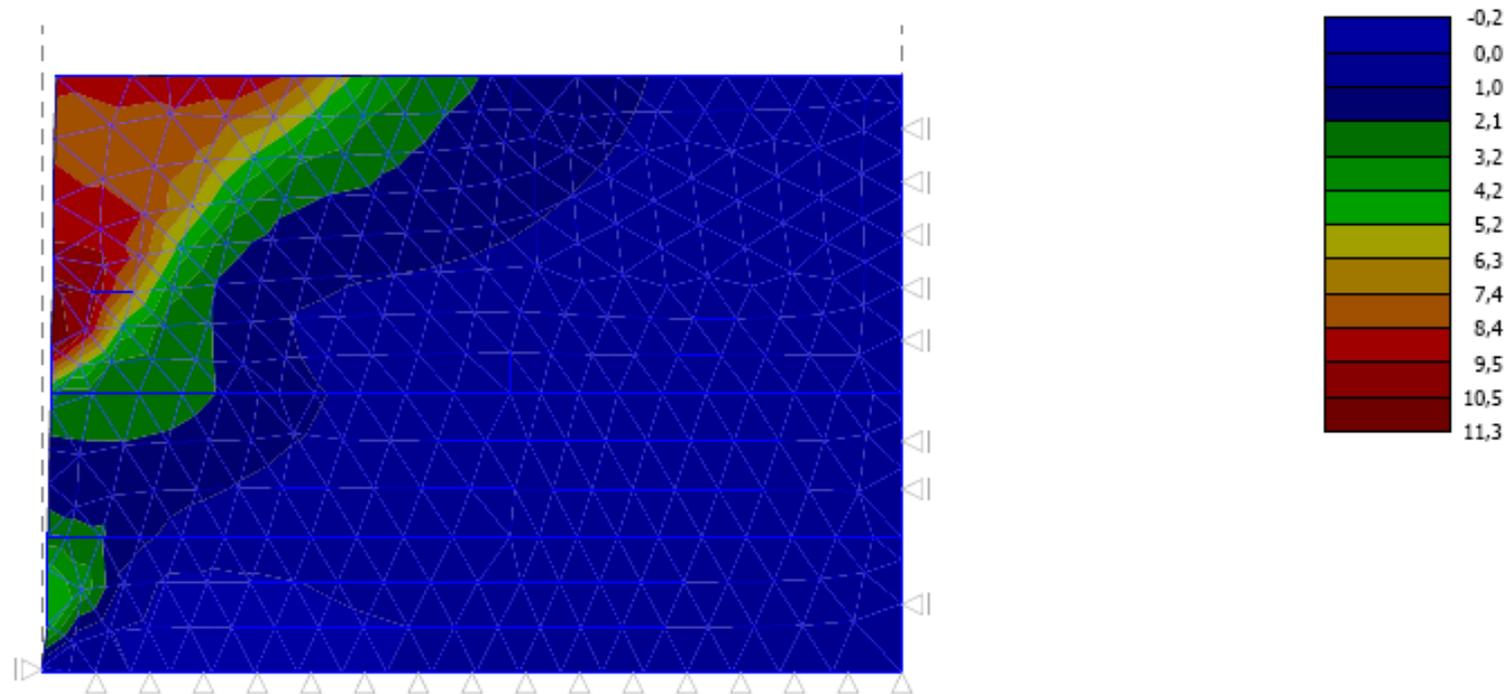


Figura 5.38 Análise de estabilidade para a seção 3.2 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d x; escala : <-0,2; 11,3> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

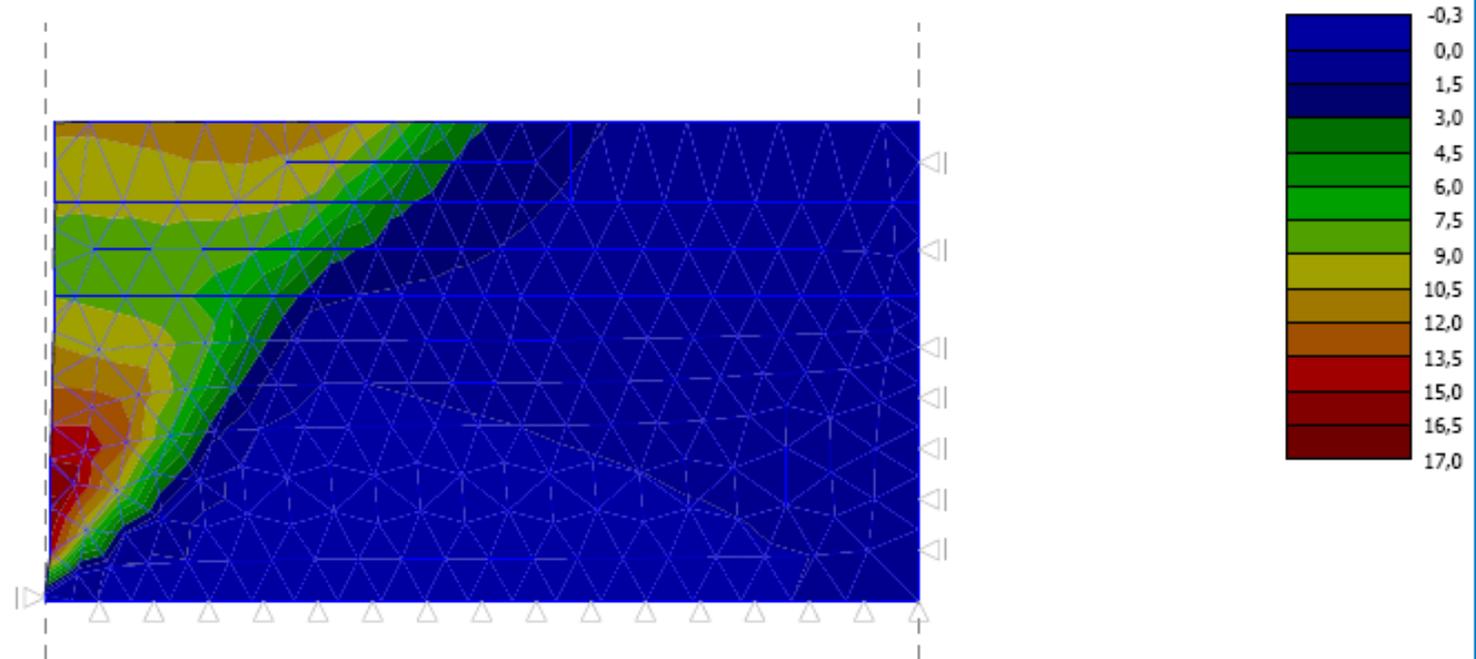
Fator de segurança FS = 1,41

Figura 5.39 Análise de estabilidade para a seção 3.3 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <-0,3; 17,0> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

Ajuste de análise : padrão

Fator de segurança FS = 1,69

Figura 5.40 Análise de estabilidade para a seção 3.4 utilizando o GEO5-FEM.

Em relação ao grau de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.41).

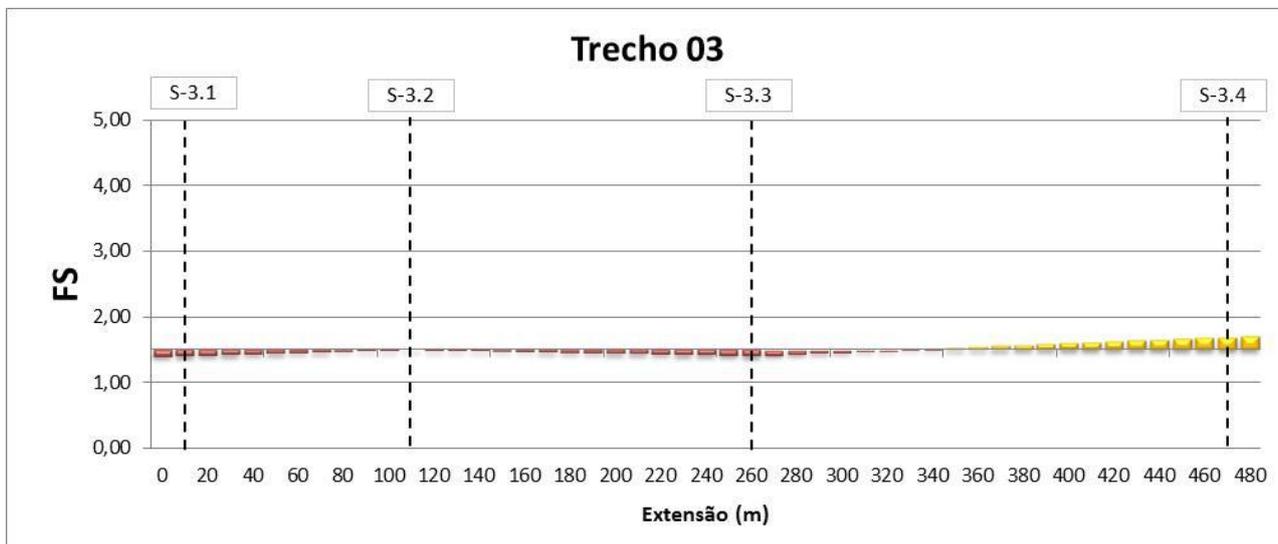


Figura 5.41 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 03.

Conforme Figura 5.41 percebe-se que o trecho 02 varia de moderado a instável, sendo que 62% do trecho é considerado instável, isto é, apresentam fatores de segurança inferiores a 1,5, correspondentes as faixas verticais representadas pela cor vermelha.

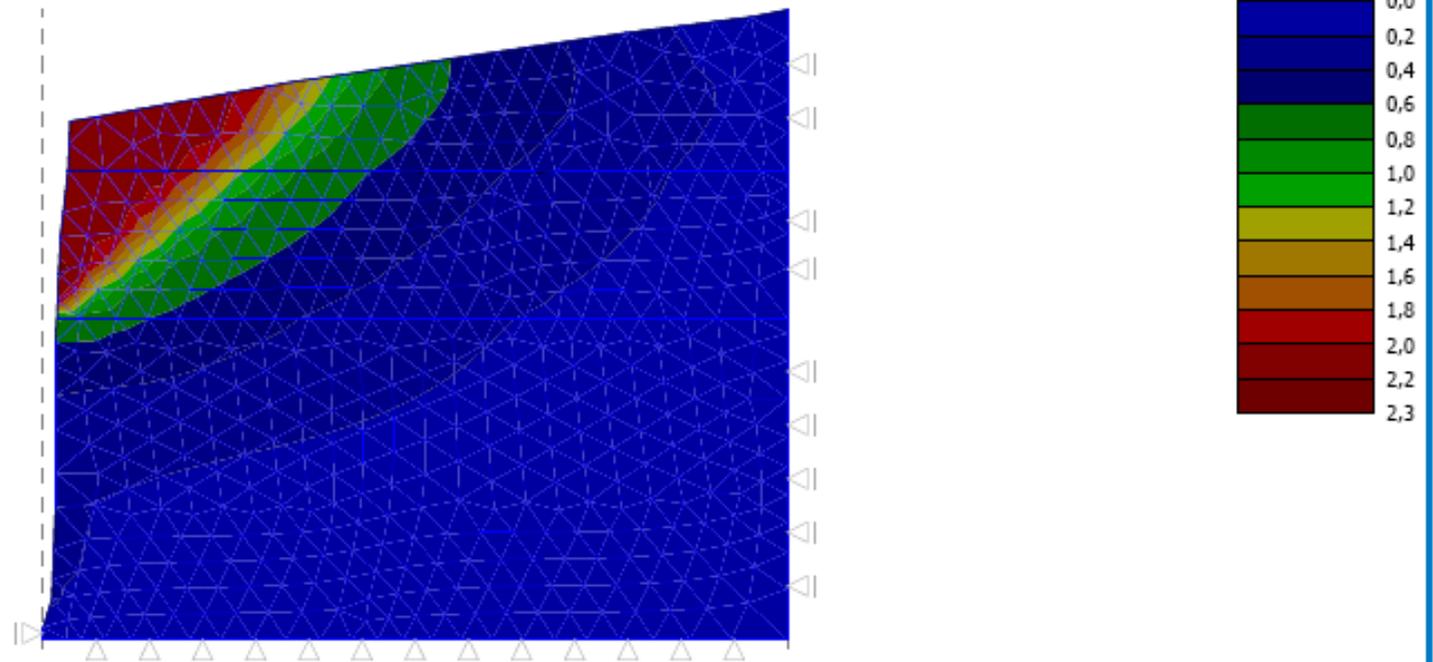
Trecho 04

No trecho 04, realizaram-se as análises de estabilidade para as duas seções definidas anteriormente (S-4.1 e S-4.2). Os fatores de segurança foram respectivamente 3,14 a 1,00, os resultados estão apresentados nas Figuras 5.42 e 5.43.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d x; escala : <0,0; 2,3> mm



Análise de Estabilidade terminada com sucesso.

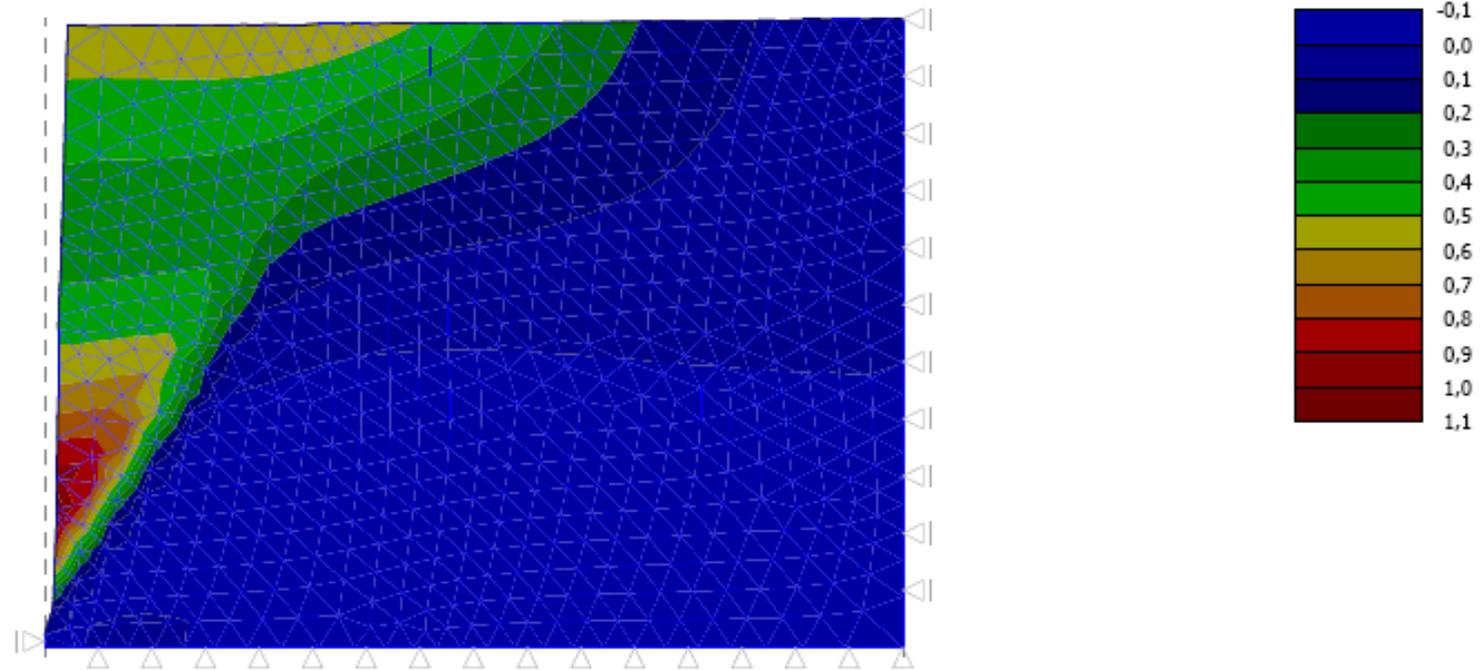
Ajuste de análise : padrão

Fator de segurança FS = 3,14

Figura 5.42 Análise de estabilidade para a seção 4.1 utilizando o GEO5-FEM.

Nome : Análise

Estágio : 1

Resultados : total; variável : Assentamento d_x; escala : <-0,1; 1,1> mm**Análise de Estabilidade terminada com sucesso.**

Ajuste de análise : padrão

Fator de segurança FS = 1,00

Figura 5.43 Análise de estabilidade para a seção 4.2 utilizando o GEO5-FEM.

Em relação ao grau de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.44).

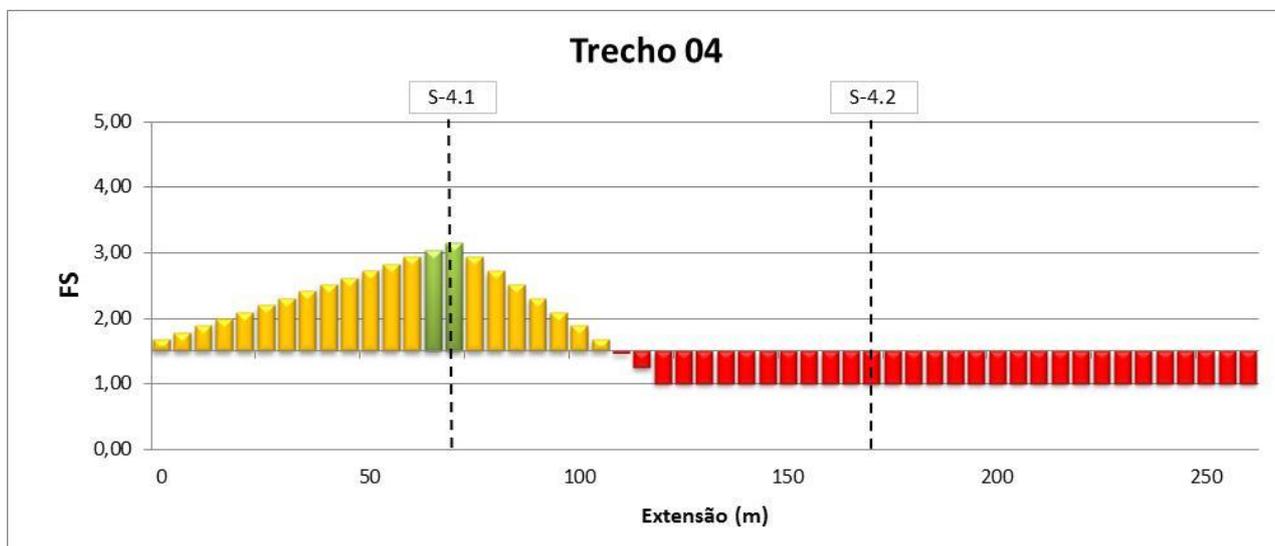


Figura 5.44 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 04.

De acordo com a Figura 5.44 percebe-se que a parte inicial do trecho possui um grau de estabilidade moderado a estável, e a parte final pode ser considerada instável.

5.3.3. Análises de estabilidade utilizando o módulo GEO5 - Estabilidade de Taludes

No módulo de Estabilidade de Taludes pode-se realizar a análise considerando a superfície otimizada (superfície de escorregamento crítica), no entanto o cálculo é realizado para apenas um método.

Neste caso, para se calcular simultaneamente utilizando todos os métodos disponíveis é necessário impor a localização da superfície de escorregamento. Assim, optou-se por proceder à análise de estabilidade por apenas um método, no caso o Método de Bishop (método amplamente utilizado na solução de problemas geotécnicos envolvendo estabilidade de taludes), e em seguida para esta superfície de escorregamento foram encontrados os fatores de segurança para os métodos de Spencer, Morgenstern & Price, Fellenius, além de Bishop. Apesar do módulo calcular os resultados pelo método de Shahunyants, este não foi incluso na discussão dos resultados já que o método não é descrito no manual do programa e não é amplamente difundido.

Os resultados contemplam as seções da falésia com a representação da topologia, e os respectivos Fatores de Segurança (FS) para cada seção analisada, bem como a localização da superfície crítica de escorregamento.

Trecho 01

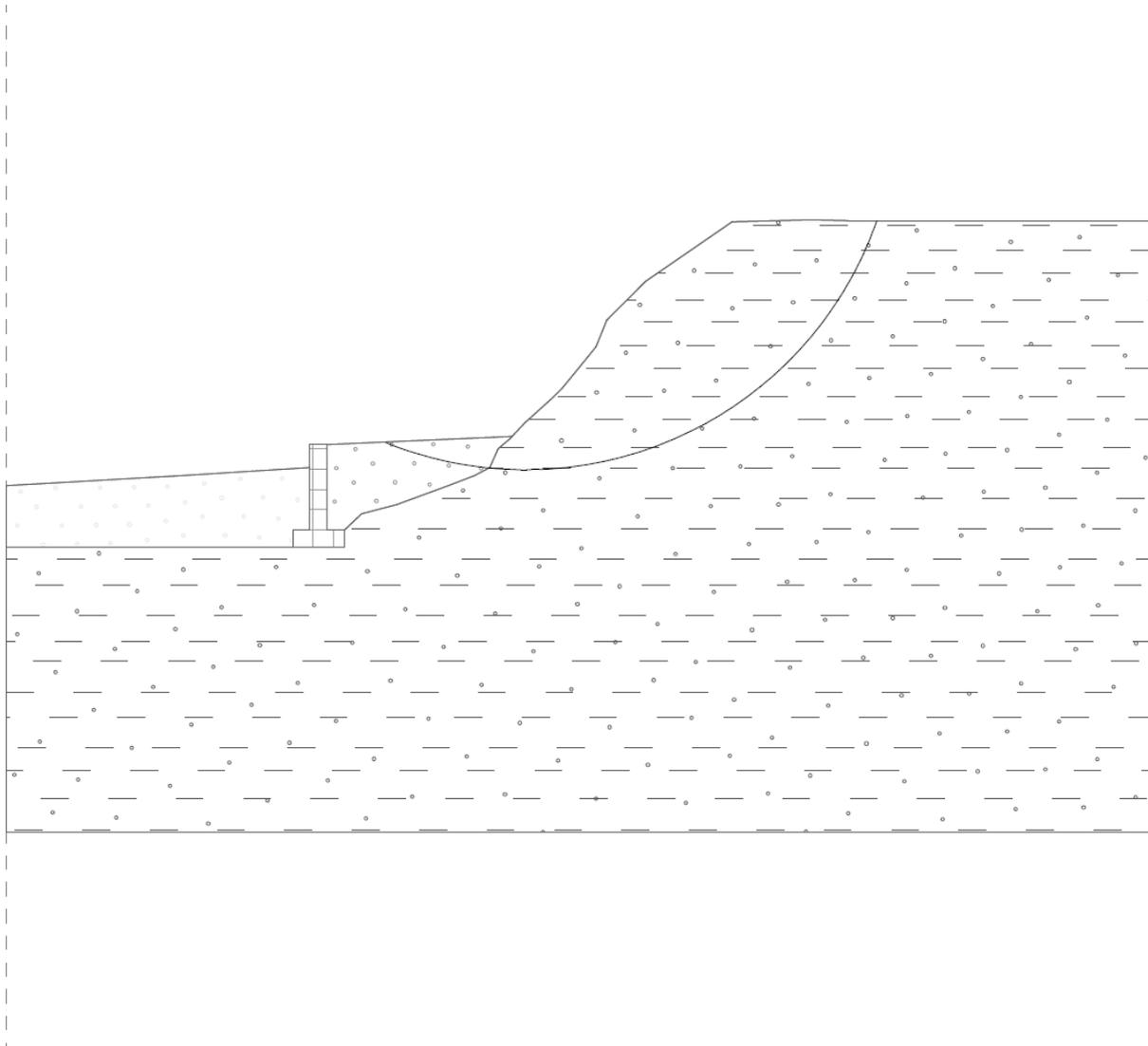
No trecho 01, realizaram-se novamente as análises de estabilidade para as três seções definidas anteriormente (S-1.1, S-1.2 e S-1.3) utilizando o método de Bishop com otimização da superfície crítica de escorregamento e, em seguida, utilizando essa superfície para cálculo dos fatores por todos os métodos aplicáveis no programa.

É importante destacar que o software não apresentou resultados do método de Janbu para as seções 1.1 e 1.2, considerando a superfície crítica de escorregamento apresentada. Mesmo localizando-se a superfície crítica pelo método de Janbu, verificou-se que a superfície muda e gera fatores de segurança mais elevados. Portanto, optou-se em conservar a superfície crítica encontrada inicialmente.

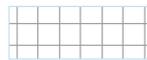
Para este trecho, os fatores de segurança variaram de 1,92, considerando o menor valor na seção 1.3 pelo método de Bishop, a 4,93, pelo método de Morgenstern & Price para a seção 1.2 (Figuras 5.45, 5.46 e 5.47).

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia siltosa (Aterro)



Muro de arrimo



Areia mal graduada (SP), fofa



Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

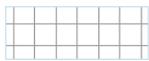
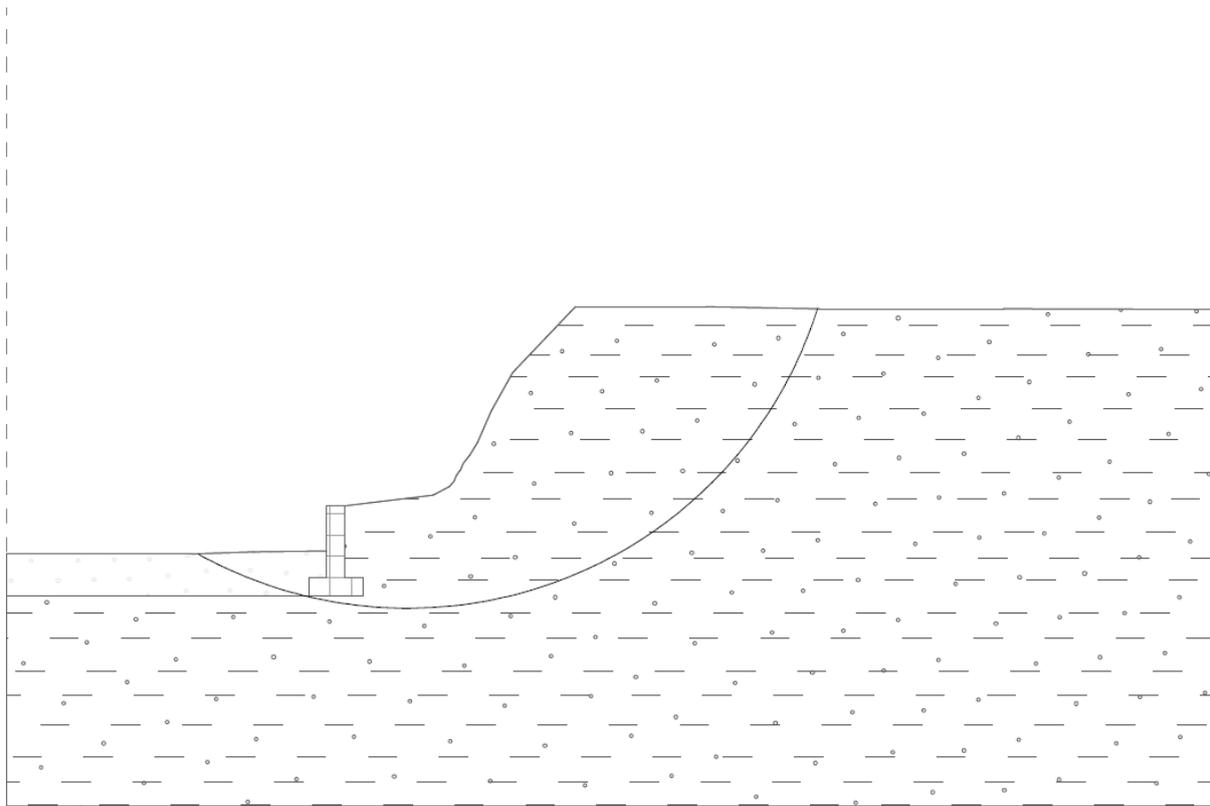
Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 4,82 > 1,50 **tabela aceita**
 Fellenius / Petterson : FS = 4,73 > 1,50 **tabela aceita**
 Spencer : FS = 4,86 > 1,50 **tabela aceita**
 Janbu : **A solução não foi encontrada.**
 Morgenstern-Price : FS = 4,87 > 1,50 **tabela aceita**
 Shahunyants : FS = 4,88 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.45 Análise para a seção 1.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Nome : Análises

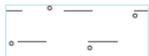
Estágio - análise : 1 - 1



Muro de arrimo



Areia pouco graduada, fofa



Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

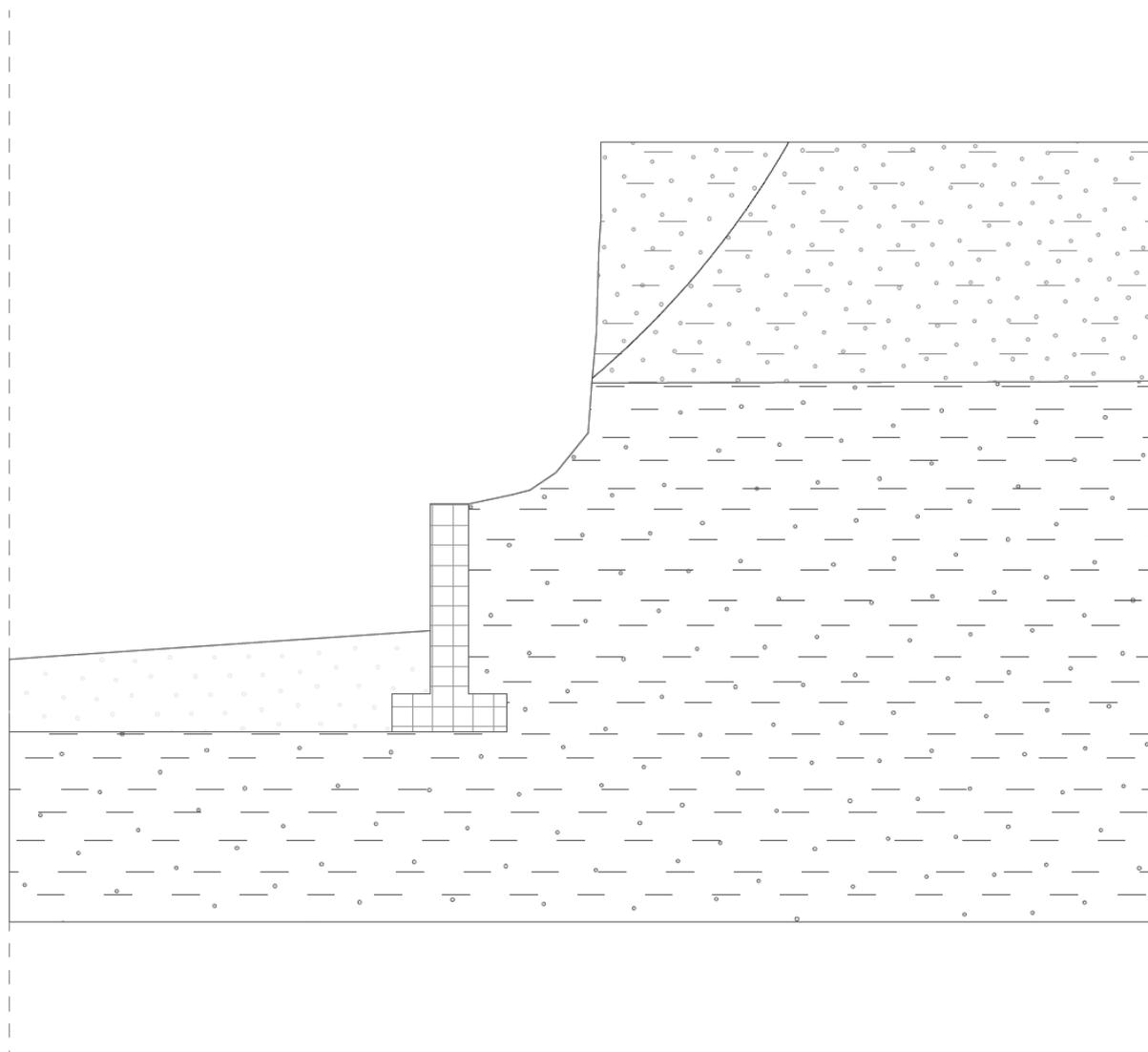
Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 4,89 > 1,50 **tabela aceita**
 Fellenius / Petterson : FS = 4,74 > 1,50 **tabela aceita**
 Spencer : FS = 4,92 > 1,50 **tabela aceita**
 Janbu : **A solução não foi encontrada.**
 Morgenstern-Price : FS = 4,93 > 1,50 **tabela aceita**
 Shahunyants : FS = 4,85 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.46 Análise para a seção 1.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia siltosa ou argilosa (SC)

Muro de arrimo

Areia pouco graduada, fofa

Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 1,92 > 1,50 **tabela aceita**
 Fellenius / Petterson : FS = 1,95 > 1,50 **tabela aceita**
 Spencer : FS = 1,94 > 1,50 **tabela aceita**
 Janbu : FS = 1,94 > 1,50 **tabela aceita**
 Morgenstern-Price : FS = 1,98 > 1,50 **tabela aceita**
 Shahunyants : FS = 1,98 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.47 Análise para a seção 1.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Assim, considerando a escala de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.48).

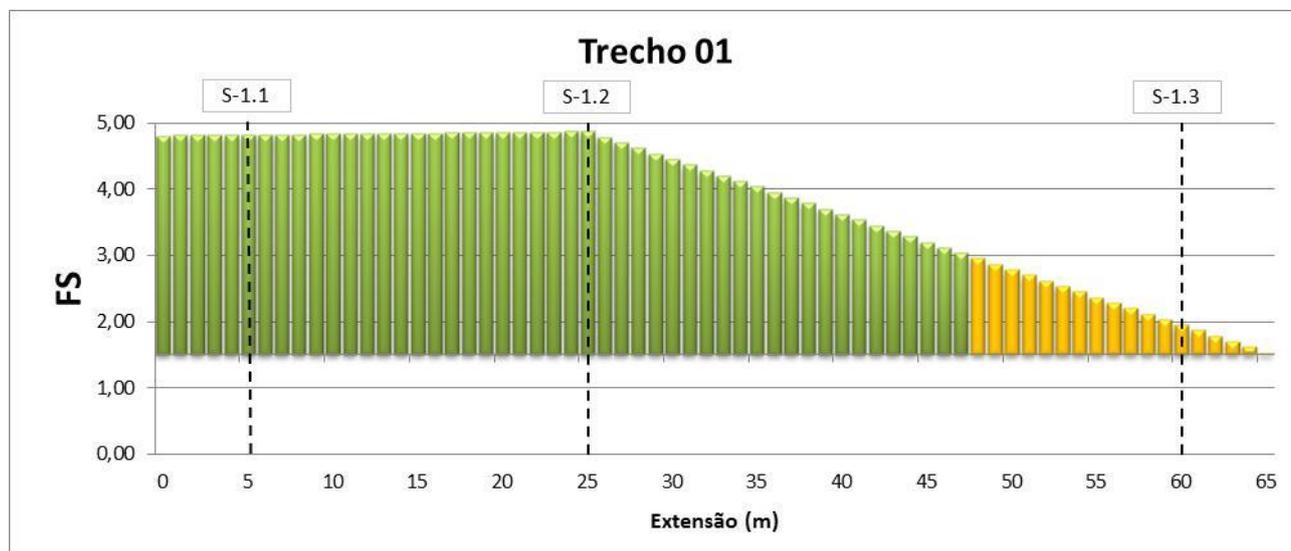


Figura 5.48 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 01.

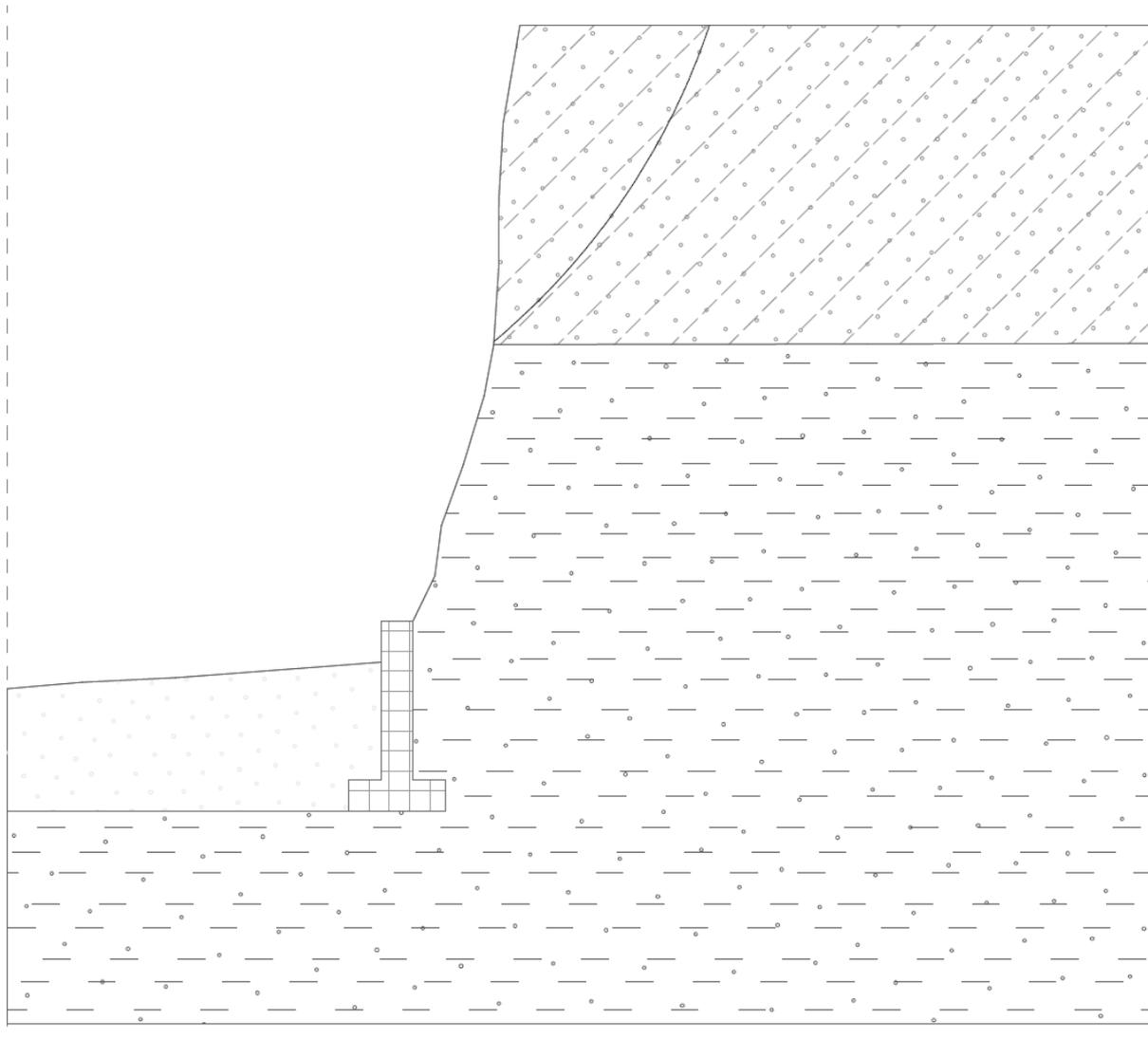
De acordo com a Figura 5.48 percebe-se que o trecho 01 tem seu grau de estabilidade variando de moderado a estável. Enfatizando que em torno de 72% do trecho pode ser considerado estável, ou seja, os fatores de segurança encontrados são maiores ou igual a 3,0, correspondentes às faixas verticais representadas pela cor verde.

Trecho 02

No trecho 02, realizaram-se novamente as análises de estabilidade para as três seções definidas anteriormente (S-2.1, S-2.2 e S-2.3) impondo a superfície crítica de escorregamento pelo método de Bishop e, em seguida, utilizando essa superfície para cálculo dos fatores por todos os métodos aplicáveis no programa. Os fatores de segurança variaram de 1,07, considerando o menor valor na seção 2.2 pelo método de Bishop, a 1,39, pelo método de Fellenius/Peterson para a seção 2.1 (Figuras 5.49, 5.50 e 5.51).

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)



Muro de arrimo



Areia pouco graduada, fofa



Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

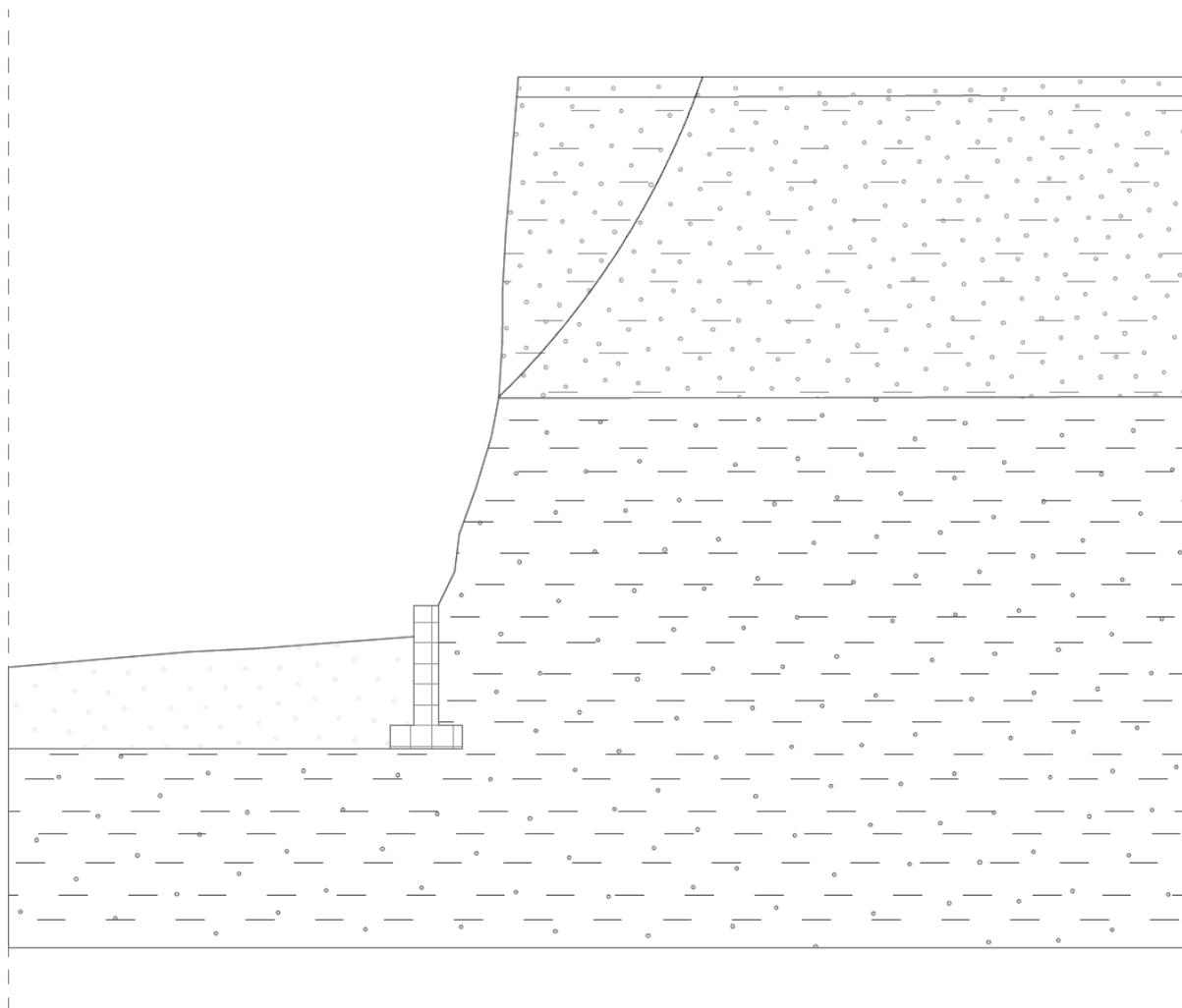
Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

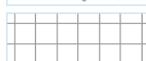
Bishop :	FS = 1,33 < 1,50	Tabela não aceita
Fellenius / Petterson :	FS = 1,39 < 1,50	Tabela não aceita
Spencer :	FS = 1,37 < 1,50	Tabela não aceita
Janbu :	FS = 1,37 < 1,50	Tabela não aceita
Morgenstern-Price :	FS = 1,38 < 1,50	Tabela não aceita
Shahunyants :	FS = 1,43 < 1,50	Tabela não aceita

Figura 5.49 Análise para a seção 2.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



-  Aterro (SM-SC)
-  Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)
-  Muro de arrimo
-  Argila de baixa plasticidade (CL)
-  Areia pouco graduada, fofa

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

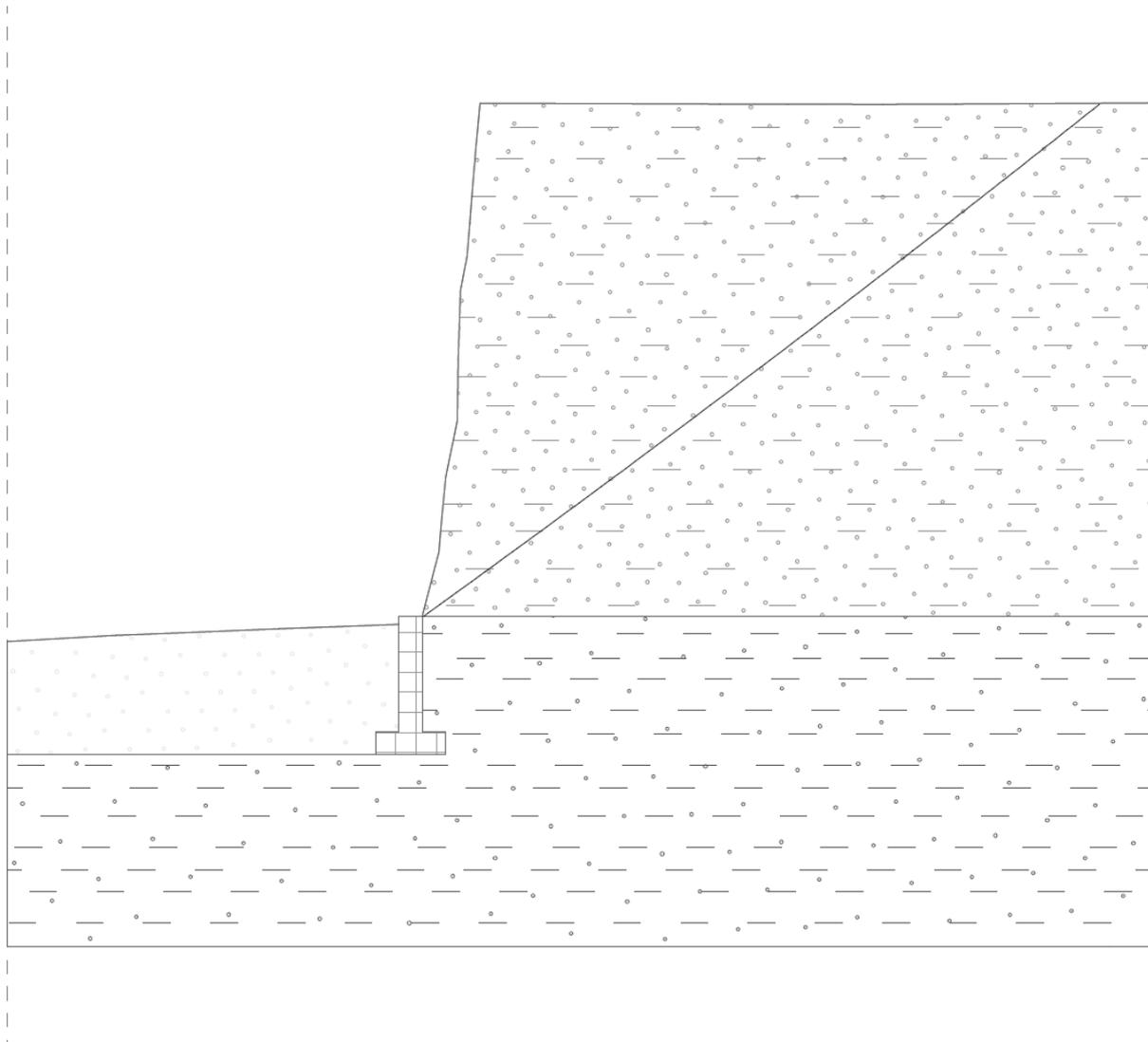
Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop :	FS = 1,07 < 1,50	Tabela não aceita
Fellenius / Petterson :	FS = 1,11 < 1,50	Tabela não aceita
Spencer :	FS = 1,10 < 1,50	Tabela não aceita
Janbu :	FS = 1,10 < 1,50	Tabela não aceita
Morgenstern-Price :	FS = 1,11 < 1,50	Tabela não aceita
Shahunyants :	FS = 1,14 < 1,50	Tabela não aceita

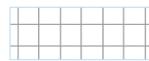
Figura 5.50 Análise para a seção 2.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)



Muro de arrimo



Areia pouco graduada, fofa



Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita
Fellenius / Petterson :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita
Spencer :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita
Janbu :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita
Morgenstern-Price :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita
Shahunyants :	FS = 1,29 < 1,50	Tabela não aceita

Figura 5.51 Análise para a seção 2.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Dessa forma, considerando o grau de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.52).

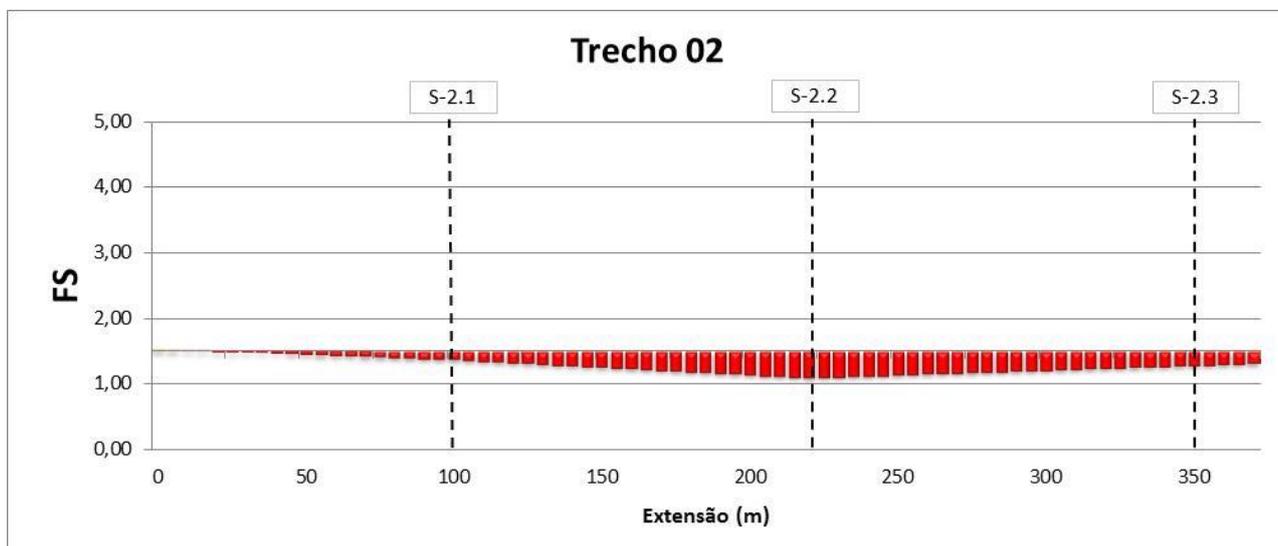


Figura 5.52 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 02.

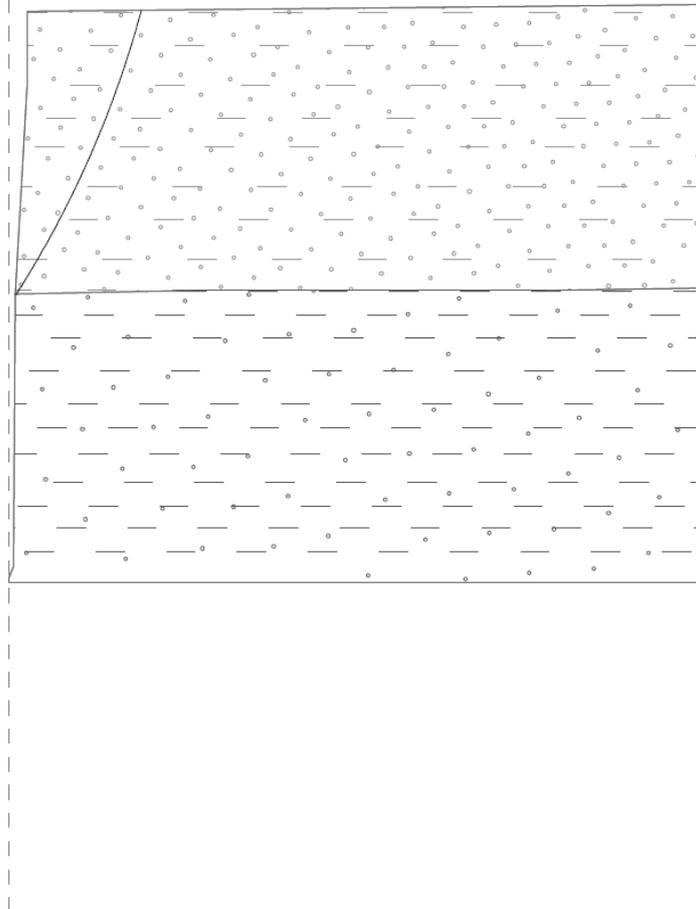
De acordo com a Figura 5.52 percebe-se que o trecho 02 varia de moderado a instável, sendo que 65% do trecho 02 são considerados instáveis, isto é, apresentam fatores de segurança inferiores a 1,5, correspondentes as faixas verticais representadas pela cor vermelha.

Trecho 03

No trecho 03, realizaram-se novamente as análises de estabilidade para as quatro seções definidas anteriormente (S-3.1, S-3.2, S-3.3 e S-3.4) utilizando o mesmo procedimento das seções anteriores. Os fatores de segurança variaram de 1,36, pelo método de Bishop para a seção 3.1, a 1,77, considerando o método de Fellenius/Peterson para a seção 3.4 (Figuras 5.53, 5.54, 5.55 e 5.56).

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)



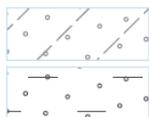
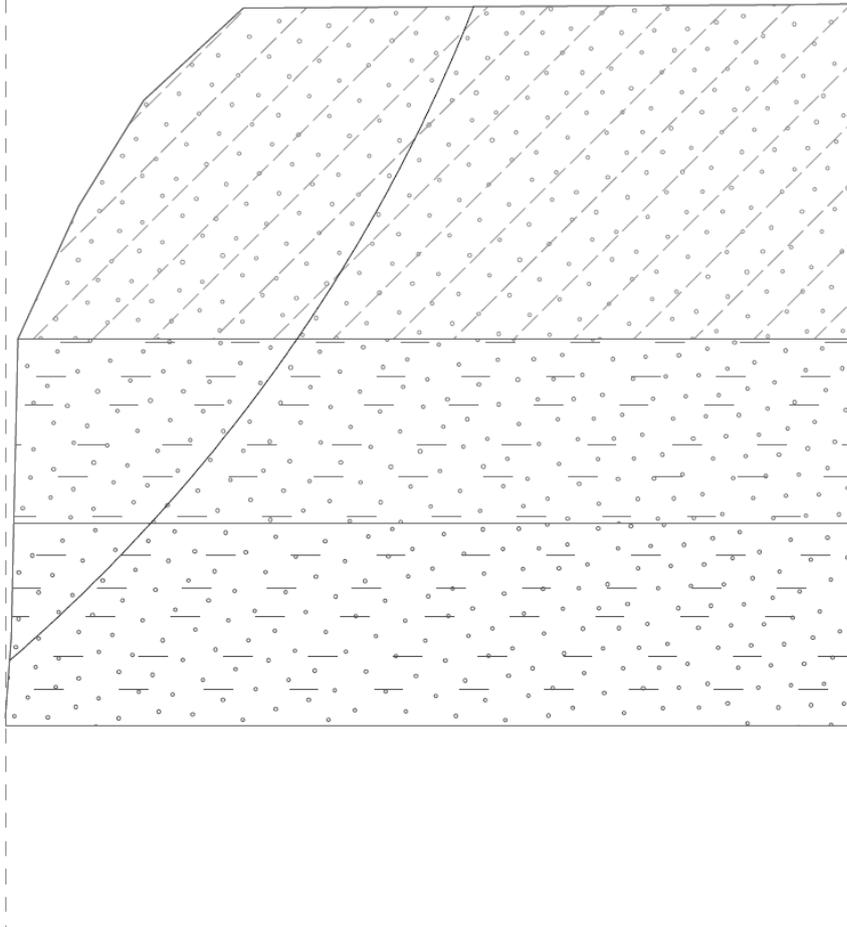
Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 1,36 < 1,50 **Tabela não aceita**
Fellenius / Petterson : FS = 1,43 < 1,50 **Tabela não aceita**
Spencer : FS = 1,42 < 1,50 **Tabela não aceita**
Janbu : FS = 1,44 < 1,50 **Tabela não aceita**
Morgenstern-Price : FS = 1,44 < 1,50 **Tabela não aceita**
Shahunyants : FS = 1,48 < 1,50 **Tabela não aceita**

Figura 5.53 Análise para a seção 3.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.



Areia siltosa ou argilosa homogênea (SM-SC)



Areia argilosa variegada (SC)



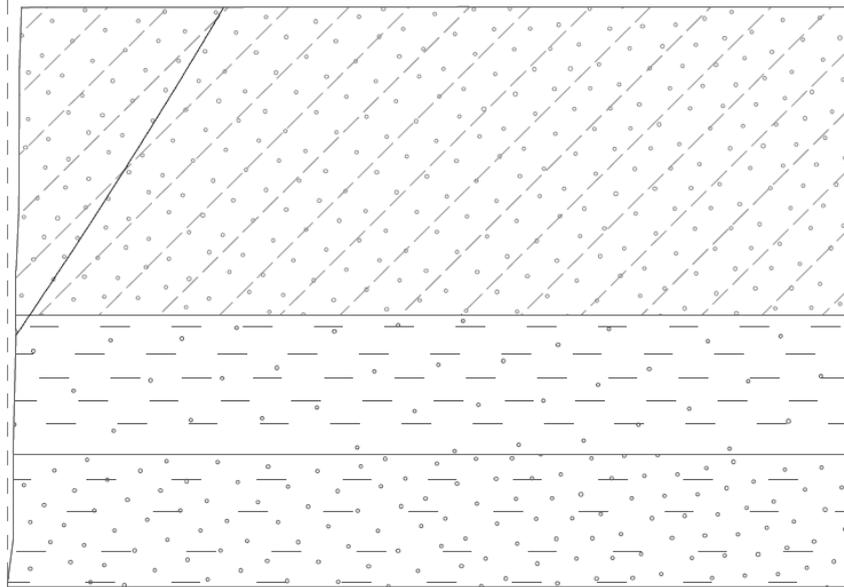
Areia siltosa ou argilosa variegada (SM-SC)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 1,53 > 1,50 **tabela aceita**
Fellenius / Petterson : FS = 1,55 > 1,50 **tabela aceita**
Spencer : FS = 1,54 > 1,50 **tabela aceita**
Janbu : FS = 1,55 > 1,50 **tabela aceita**
Morgenstern-Price : FS = 1,55 > 1,50 **tabela aceita**
Shahunyants : FS = 1,56 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.54 Análise para a seção 3.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.



Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)



Argila de baixa plasticidade (CL)



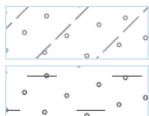
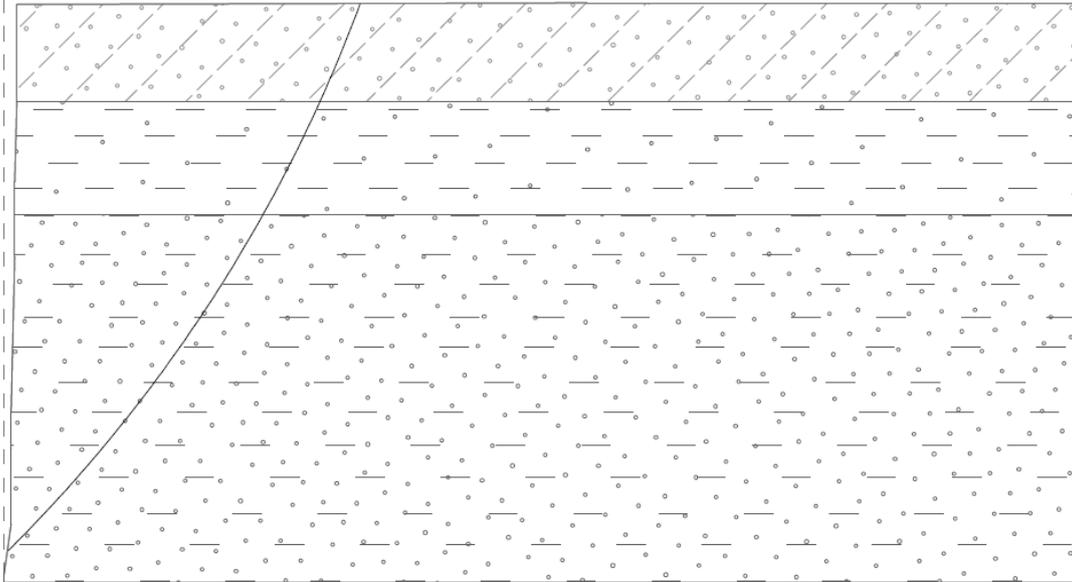
Areia argilosa variegada (SC)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 1,50 < 1,50 **Tabela não aceita**
Fellenius / Petterson : FS = 1,51 > 1,50 **tabela aceita**
Spencer : FS = 1,51 > 1,50 **tabela aceita**
Janbu : FS = 1,51 > 1,50 **tabela aceita**
Morgenstern-Price : FS = 1,51 > 1,50 **tabela aceita**
Shahunyants : FS = 1,51 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.55 Análise para a seção 3.3 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.



Areia siltosa ou argilosa homogênea (SM-SC)

Areia argilosa variegada (SC)



Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 1,69 > 1,50 **tabela aceita**

Fellenius / Petterson : FS = 1,77 > 1,50 **tabela aceita**

Spencer : FS = 1,74 > 1,50 **tabela aceita**

Janbu : FS = 1,75 > 1,50 **tabela aceita**

Morgenstern-Price : FS = 1,75 > 1,50 **tabela aceita**

Shahnyants : FS = 1,82 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.56 Análise para a seção 3.4 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Em relação à escala de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.57).

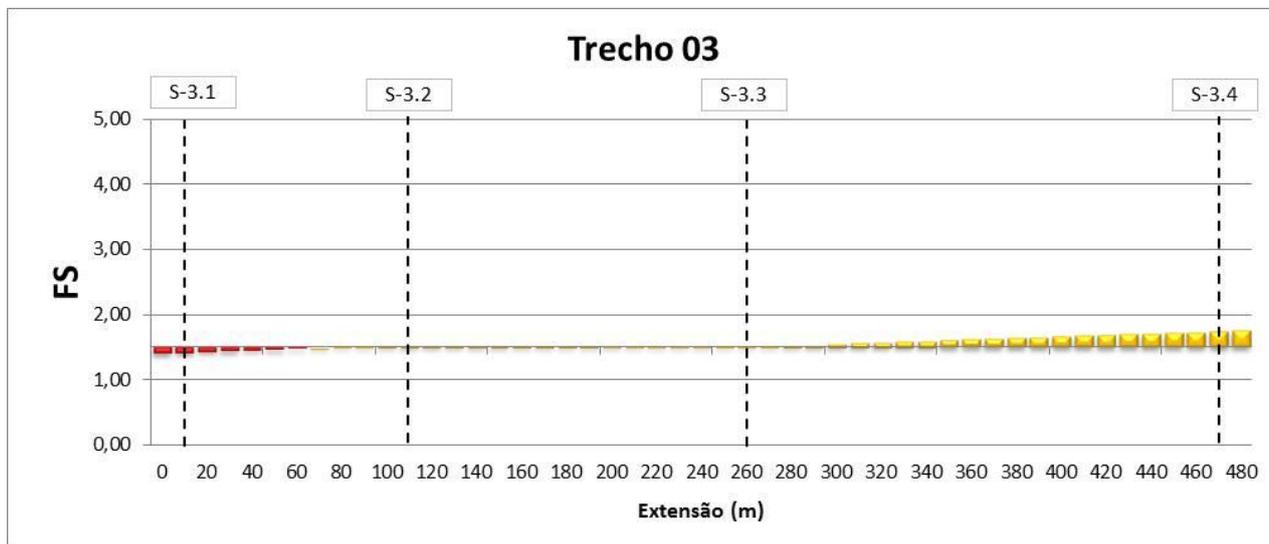


Figura 5.57 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 03.

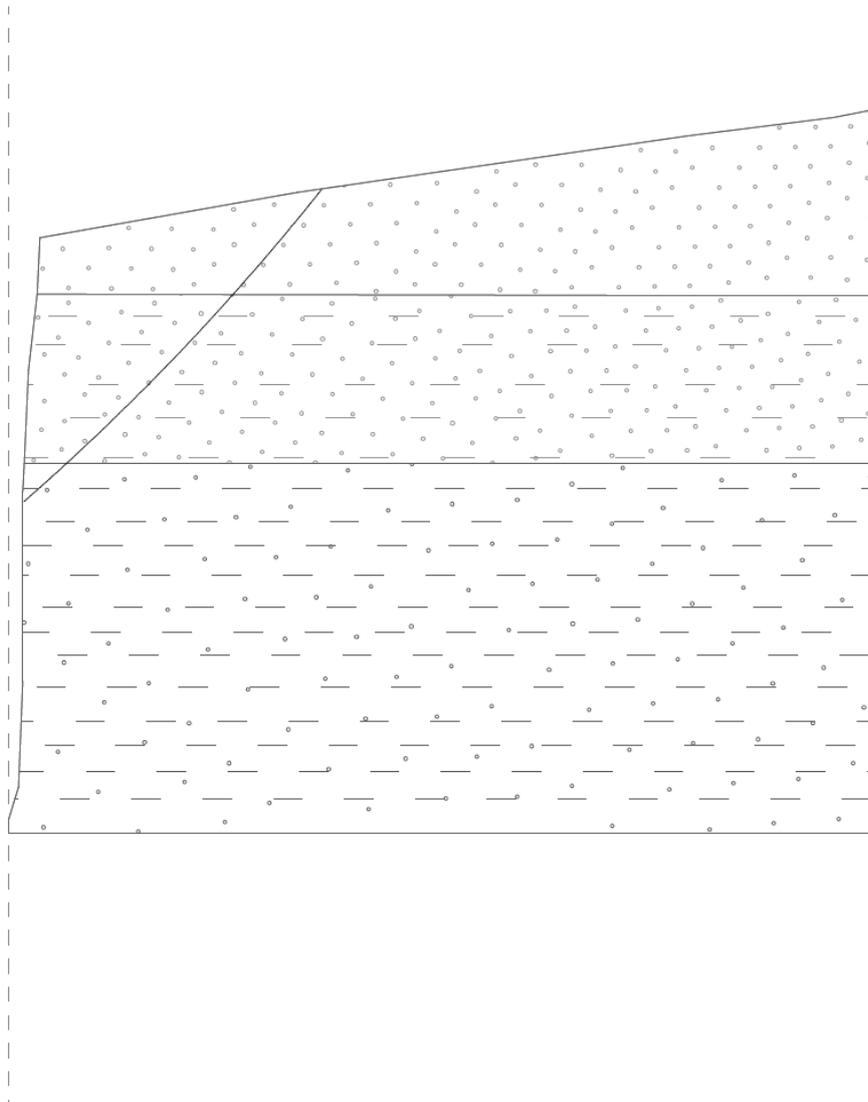
De acordo com a Figura 5.57 percebe-se que o trecho 03 varia de moderado a instável, sendo que em torno de 15% do trecho é considerado instável, isto é, apresentam fatores de segurança inferiores a 1,5, correspondentes as faixas verticais representadas pela cor vermelha.

Trecho 04

No trecho 04, realizaram-se as análises de estabilidade para as duas seções definidas anteriormente (S-4.1 e S-4.2) utilizando o mesmo procedimento anterior. Os fatores de segurança encontrados variaram na faixa de 3,63 a 3,64 para a seção 4.1 e 1,02 a 1,06 para a seção 4.2, estando os resultados apresentados nas Figuras 5.58 e 5.59.

Nome : Análises

Estágio - análise : 1 - 1



Areia mal graduada (SP)



Areia siltosa ou argilosa (SM-SC)



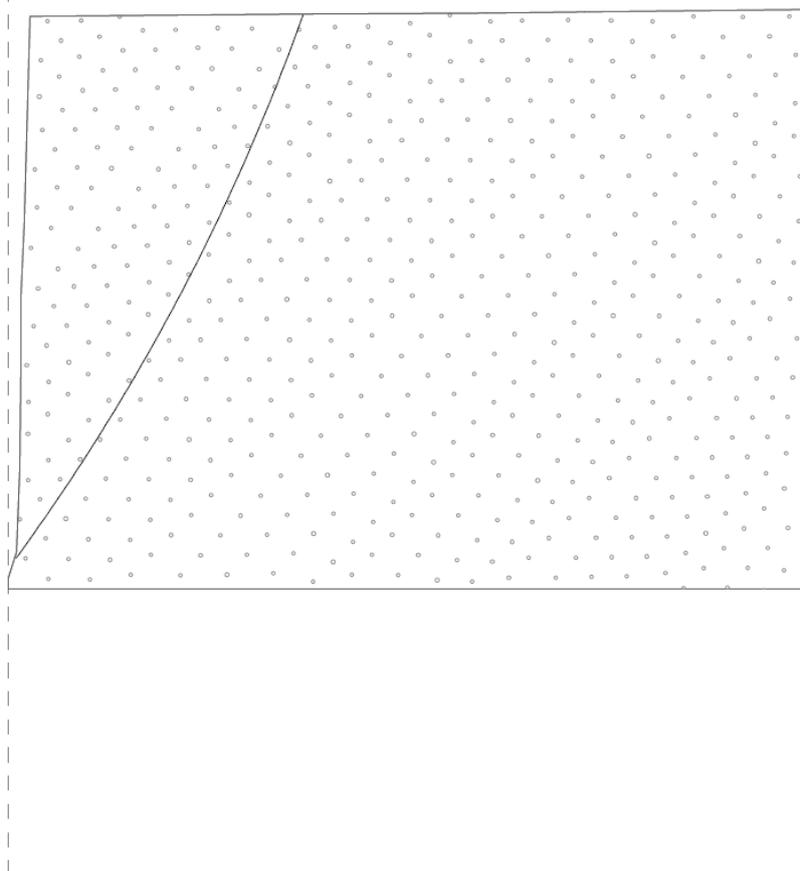
Argila de baixa plasticidade (CL)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop : FS = 3,63 > 1,50 **tabela aceita**
 Fellenius / Petterson : FS = 3,63 > 1,50 **tabela aceita**
 Spencer : FS = 3,64 > 1,50 **tabela aceita**
 Janbu : FS = 3,64 > 1,50 **tabela aceita**
 Morgenstern-Price : FS = 3,64 > 1,50 **tabela aceita**
 Shahunyants : FS = 3,60 > 1,50 **tabela aceita**

Figura 5.58 Análise para a seção 4.1 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.



 Areia mal graduada (SP)

Análise da superfície de deslizamento sem otimização.

Verificação da estabilidade de talude (Todos os métodos)

Bishop :	FS = 1,02 < 1,50	Tabela não aceita
Fellenius / Petterson :	FS = 1,06 < 1,50	Tabela não aceita
Spencer :	FS = 1,04 < 1,50	Tabela não aceita
Janbu :	FS = 1,06 < 1,50	Tabela não aceita
Morgenstern-Price :	FS = 1,06 < 1,50	Tabela não aceita
Shahunyants :	FS = 1,07 < 1,50	Tabela não aceita

Figura 5.59 Análise para a seção 4.2 utilizando o GEO5 - Estabilidade de Taludes.

Em relação ao grau de estabilidade constante na metodologia da pesquisa, e considerando uma variação linear dos fatores de segurança ao longo do trecho entre as seções analisadas, obteve-se a representação gráfica que consolida os resultados dos fatores de segurança e o grau de estabilidade para toda a extensão do trecho (Figura 5.60).

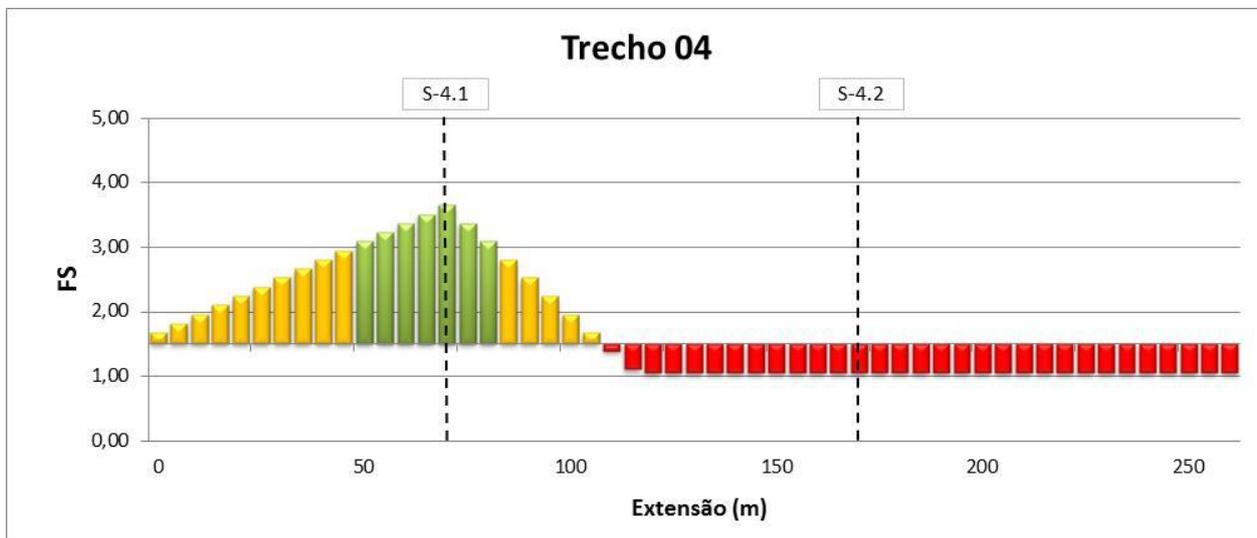


Figura 5.60 Variação dos Fatores de Segurança para o trecho 04.

De acordo com a Figura 5.60 percebe-se que a parte inicial do trecho possui um grau de estabilidade variando moderado a estável e a parte final pode ser considerada instável.

5.3.4. Análise comparativa entre os resultados

A partir do conjunto de análises de estabilidade realizadas para as diversas seções da falésia em estudo observa-se, na maior parte dos casos, uma coerência nos valores dos fatores de segurança encontrados pelos métodos baseados no equilíbrio-limite e pelo método dos elementos finitos (MEF) conforme pode-se observar na Figura 5.61.

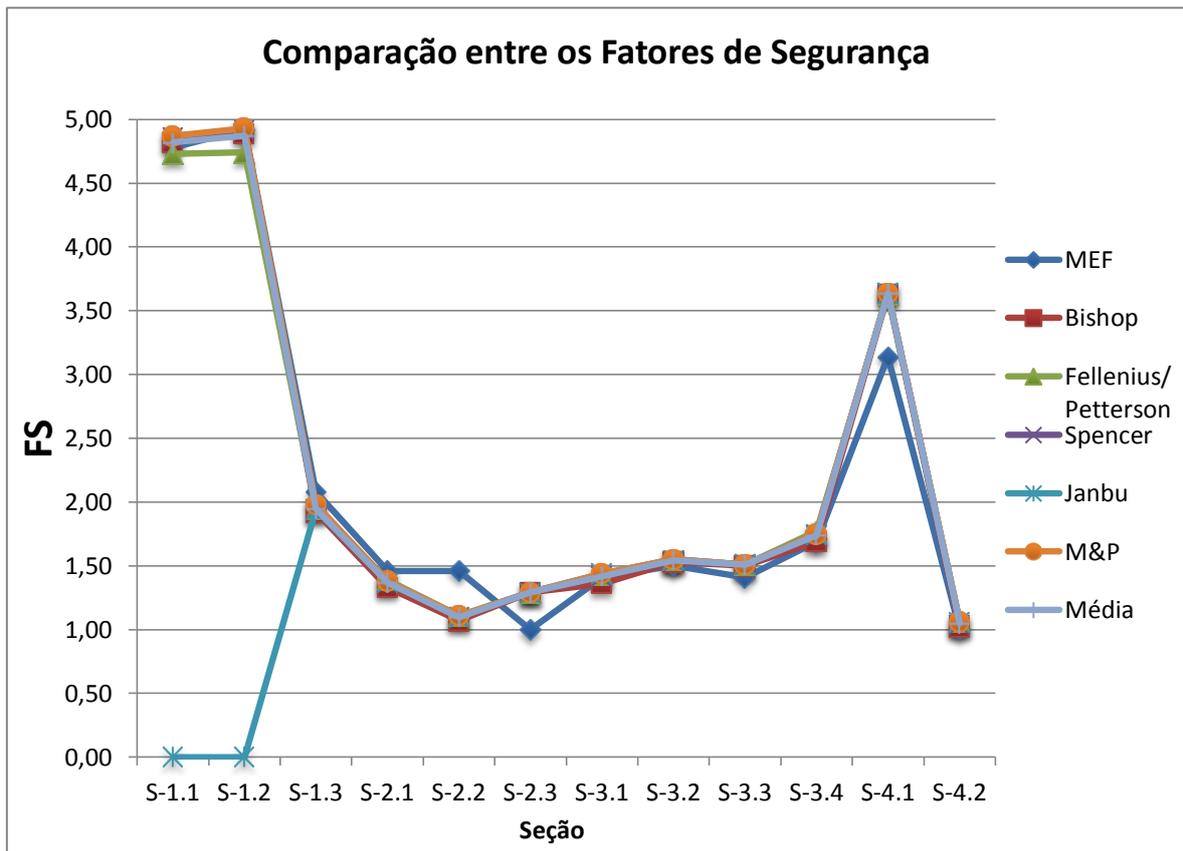


Figura 5.61 Análise comparativa entre os métodos.

Em termos particulares, analisando trecho a trecho, verifica-se que no trecho 01 as análises realizadas considerando o método dos elementos finitos foram próximas daquelas baseadas no equilíbrio-limite. A análise da seção 1.1 apresentou valor praticamente idêntico entre os dois métodos ($FS_{MEF} = 4,78$ e $FS_{MÉDIO} = 4,82$). Nas demais seções (1.2 e 1.3), os fatores de segurança determinados pelo MEF foram inferiores ao valor médio entre os métodos de equilíbrio-limite. Assim, as análises de estabilidade pelo método dos elementos finitos para este trecho forneceram valores variando em uma porcentagem de 0,8% a 6,7% em relação ao fator de segurança médio dos métodos de equilíbrio-limite.

No trecho 02, percebe-se uma variação maior quando comparado o MEF à média dos fatores de segurança obtidos pelos método de equilíbrio-limite, principalmente nas seções 2.2 e 2.3. Na seção 2.1, a variação entre os dois métodos foi razoável, em torno de 6,6%, enquanto que na seção 2.2 e 2.3 as variações foram de 32,7% e 22,5% respectivamente.

Os fatores de segurança obtidos para o trecho 03 mantiveram-se muito próximos em todas as seções comparando-se os dois métodos de análise. As variações nessas seções foram respectivamente, 0,7%, 2,6%, 6,6% e 2,9%.

Por último, no trecho 04, a diferença foi de 13,7% para a primeira seção e de 4,8% para a segunda.

Os fatores de segurança referentes a cada seção estão apresentados na Tabela 5.6, bem como o FS médio entre os métodos baseados no equilíbrio-limite.

Tabela 5.6 Resumo das análises por seção e método.

Trecho	Seção	MEF	Métodos de equilíbrio-limite					FS Médio
			Bishop	Fellenius/ Peterson	Spencer	Janbu	Morgenstern & Price	
01	S-1.1	4,78	4,82	4,73	4,86	-	4,87	4,82
	S-1.2	4,92	4,89	4,74	4,92	-	4,93	4,87
	S-1.3	2,08	1,92	1,95	1,94	1,94	1,98	1,95
02	S-2.1	1,46	1,33	1,39	1,37	1,37	1,38	1,37
	S-2.2	1,46	1,07	1,11	1,10	1,10	1,11	1,10
	S-2.3	1,00	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
03	S-3.1	1,41	1,36	1,43	1,42	1,44	1,44	1,42
	S-3.2	1,50	1,53	1,55	1,54	1,55	1,55	1,54
	S-3.3	1,41	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
	S-3.4	1,69	1,69	1,77	1,74	1,75	1,75	1,74
04	S-4.1	3,14	3,63	3,63	3,64	3,64	3,64	3,64
	S-4.2	1,00	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,05

Conclusões e Recomendações

6.1. Conclusões

Os segmentos de falésia nessa zona costeira possuem alturas variando em torno de 4 m e 15 m e inclinações de aproximadamente 40° a 90°, apresentando em grande parte os solos constituintes identificados por SILVA (2003) e SEVERO (2005).

O checklist desenvolvido por BRAGA (2005) é uma ferramenta norteadora indispensável nas investigações iniciais de campo, e servem como um modelo padrão para estudos costeiros regionais.

Os mecanismos de movimento de massa identificados compreendem quedas, tombamentos, escorregamentos e solapamento do pé da falésia. Sendo que o trecho 03 apresenta todos esses mecanismos atuando concomitantemente e o trecho 02 não sofre processo erosivo costeiro devido à proteção do muro de arrimo.

De acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), os solos constituintes das falésias na zona costeira de Baía Formosa/RN são classificados como SC, SM, CL, GC e SP. Já, considerando a classificação granulométrica, os solos são predominantemente, na base, areias argilosas e argilas arenosas com coloração variegada entre as cores branca, amarela, laranja, vermelha e roxa; e no topo, areias siltosas e argilosas com coloração laranja a vermelha, homogênea e com leve heterogeneidade em alguns locais.

O material do topo é menos plástico e apresenta massa específica dos solos variando de 2,60 a 2,67, e o material da base é mais plástico e a massa específica real varia de 2,62 a 2,74.

Os parâmetros de resistência dos dois principais solos identificados nessa área de falésia (Base e Topo) estão dentro da faixa de valores médios obtidos para a formação Barreiras, considerando-se a condição inundada do solo. Entretanto, para os solos do topo, ao se comparar diretamente com os dados obtidos por SEVERO (2005) e SILVA (2003) em Tibau do Sul/RN, observa-se que os resultados dos ensaios apontam um valor bem menor para a coesão e um pouco mais elevado para o ângulo de atrito. Em termos percentuais, o valor do intercepto de coesão obtido por SEVERO (2005) e SILVA (2003)

foram, aproximadamente, duas vezes maior do que o obtido em Baía Formosa/RN, por outro lado, o ângulo de atrito ficou muito próximo, respectivamente 7% e 5% abaixo do obtido no presente estudo. Enquanto que para o material da base, a variação em relação ao ângulo de atrito da falésia em estudo foi 25% maior que os obtidos pelos dois autores, e para a coesão, foi em torno de 34%.

Os trechos 02 e 03, independente do método utilizado nas análises, foram considerados instáveis devido aos fatores de segurança estarem abaixo ou muito próximos de 1,5. Tal consideração reforça as observações de campo, já que o trecho 02 possui falésias mais elevadas e o trecho 03 está submetido à erosão costeira direta. Entretanto, pode-se considerar o trecho 03 como o mais crítico devido à ausência de estruturas de proteção costeira e à estreita faixa de praia. Fato que não ocorre no trecho 02, o qual possui uma extensa faixa de praia e é protegido por um muro de arrimo que restringe o acesso dos banhistas às áreas adjacentes do pé da falésia.

Por fim, as análises de estabilidade fornecem valores relativamente próximos quando se comparam as realizadas a partir do método dos elementos finitos com aquelas obtidas pelos métodos baseados no equilíbrio-limite. Observa-se além, que em geral, as análises realizadas utilizando os método de equilíbrio-limite são mais conservadoras quando comparadas às análises baseadas em elementos finitos, ou seja, fornecem fatores de segurança menores na maioria dos casos.

6.2. Recomendações e sugestões de trabalhos futuros

As análises de estabilidade de falésias são ferramentas que auxiliam e dão suporte às decisões e políticas públicas voltadas ao gerenciamento de costa e podem ser aplicadas especificamente, como é o caso deste estudo, para em seguida servirem como parte integrante de estudos costeiros regionais.

Na mesma área, as pesquisas podem ser intensificadas através de monitoramentos costeiros utilizando o escaneamento a laser (LIDAR) visando obter dados para estudos de recuo de falésias e da linha de costa.

Podem ser realizadas investigações geotécnicas englobando: sondagens à percussão (SPT) ou cone (CPT) e uma campanha abrangente de ensaios de

cisalhamento direto inundados e não inundados, ensaios triaxiais drenados e não drenados (CD, CU e UU) e instrumentação de taludes.

Com posse de dados e informações sobre as propriedades geotécnicas das falésias dessa área, recomendam-se análises comparativas com outras falésias da região visando abranger ou unificar a fonte de informações e dados sobre os parâmetros de resistência das falésias na zona costeira do estado.

Recomendam-se ainda, que sejam levadas em consideração variáveis como nível freático, sucção do solo, falhas geológicas, mecanismos localizados de quedas de detritos e blocos, além da erodibilidade e desagregação do solo na base da falésia.

Como recomendação final, sugere-se a realização de estudos abrangentes abordando os processos erosivos instalados na zona costeira de Baía Formosa/RN e a futura integração desses estudos com aqueles desenvolvidos nas demais regiões costeiras do estado.

CAPÍTULO 7

Referências bibliográficas

ABNT - NBR 9604: **Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas.** Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - NBR 7181: **Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - NBR 6459: **Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - NBR 7180: Solo – **Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – NBR 11682 – **Estabilidade de Taludes.** Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - NBR 12770: Solo – **Solo Coesivo - Compressão Não Confinada.** Rio de Janeiro, 1992.

AMARAL, R. F. **A dinâmica evolutiva e o problema da erosão na zona costeira do município de Tibau do Sul/RN.** Grupo de Estudos em Geotecnologia e Meio Ambiente – GEOTEC. Parecer Técnico. 2001. 38p.

ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y. A.; LIMA, R. O.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V. C.; LIMA-FILHO, F. P. **Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte.** Revista do Instituto de Geociências – USP São Paulo, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006.

BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; TATUMI, S. H.; YEE, M.; GIANNINI, P. C. F. **Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do**

Rio Grande do Norte. Revista do Instituto de Geociências – USP. São Paulo, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004.

BRAGA, K. G. **O Uso do Checklist na Identificação de Processos Erosivos.** 2005. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária - UFRN. 99p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **DNER 93/94 – Solos – Determinação da Densidade Real.** Rio de Janeiro: IPR, 1994.

CASTEDO, R., MURPHY, W., LAWRENCE, J. , PAREDES, C. **A new process–response coastal recession model of soft rock cliffs.** *Geomorphology* , 2012.

CASTRO, J. W. A.; FERNANDES, D.; DIAS, F. F. **Monitoramento do Processo de Erosão Costeira na Praia das Tartarugas, Rio das Ostras - Estado do Rio de Janeiro / Brasil: Aplicação de Metodologia Quantitativa.** *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 2011. pp. 355-368.

COLLINS, B. D. & SITAR, N. **Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA.** *Geomorphology* 97, 2008. pp. 483–501.

COLLINS, B. D. & SITAR, N. **Stability of Steep Slopes in Cemented Sands.** *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* © ASCE, 2011. pp. 43-51.

DINIZ, R. F. **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 (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2002.

FIORI, A. P.& CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes.** 2ª Ed. rev. e ampl. – Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

GEO5 – Geotechnical Software Suite. **User's Guide**. Fine Civil Engineering Software. Version 16. 2013.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2012.

GOMES, F. Z. **Estudo da erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Mestrado em Engenharia Civil, 2001. 207p.

GOOLE MAPAS. Disponível em <http://www.google.com.br>. Acesso em 10 de Dezembro de 2011.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1983.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Mestrado em Engenharia Civil, 2002. 204p.

LIMA, E. Q. **Vulnerabilidade Ambiental da Zona Costeira de Pititinga, Rio do Fogo, Rio Grande do Norte**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2010. 116p.

MARQUES, R. F.; COUTINHO, R. Q.; MARQUES, A. G. **Caracterização Geotécnica de um Perfil de Solo Não Saturado da Formação Barreiras da Cidade de Maceió/AL**. XIII COBRAMSEG, Curitiba-PR, 2006.

MAZZER, A. M.; DILLENBURG, S. R.; SOUZA, C. R. G. **Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, 2008. pp. 278-294.

NASCIMENTO, K. C. **Monitoramento por DGPS e Análise dos Processos Erosivos da Linha de Costa na Praia de Pirangi do Norte - Parnamirim / RN.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária - UFRN. 2009. 112p.

OLIVEIRA, F. F. G. **Aplicação das Técnicas de Geoprocessamento na Análise dos Impactos Ambientais e na Determinação da Vulnerabilidade Ambiental no Litoral Sul do Rio Grande do Norte.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, UNESP. 2011. 250p.

PIÉRRRI, G. C. S. **Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2008. 173p.

SAMPAIO, A. C. F.; MELO, A. A.; FARIA, A. P.; MENEZES, P. M. L. **Oscilação do nível do mar no futuro e possíveis conseqüências no Brasil: Pequeno Ensaio.** Rio de Janeiro: IGEO/UFRJ, 2003, 10p.

SANTOS JR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. **Processos de Instabilização em Falésias: Estudo de um Caso no Nordeste do Brasil.** Geotecnia N. 114 – Novembro, 2008, Pp. 71-90.

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 - UFRN. 2005. 139p.

SEVERO, R. N. F. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul-RN, considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.280p.

SILVA, W. de S. **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, UFRN. 2003.

SILVA, J. P. M. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes.** Dissertação de Mestrado - Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2011.

SOUSA, D. C.; JARDIM DE SÁ, E. F.; VITAL, H.; NASCIMENTO, M. A. L. 2008. **Falésias na Praia de Ponta Grossa, Icapuí, CE - Importantes Deformações Tectônicas Cenozóicas em Rochas Sedimentares da Formação Barreiras.** In: Winge,M.; Schobbenhaus,C.; Souza,C.R.G.; Fernandes,A.C.S.; BerbertBorn,M.; Queiroz,E.T. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Brasília: CPRM, 2009. v. 2. 515 p.

STRAMANDINOLI, R. S. B. **Modelos de Elementos Finitos para Análise Não Linear Física e Geométrica de Vigas e Pórticos Planos de Concreto Armado.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins.** Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1998.

SUGUIO, K.; NOGUEIRA, A. C. R. **Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado**

como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. Geociências, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 461-479, 1999.

VANDAMME, J. ; ZOU, Q. ; ELLIS, E. **Novel particle method for modelling the episodic collapse of soft coastal bluffs.** Geomorphology, 2012. pp. 295–305.

WOLTERS, G. & MÜLLER, G. **Effect of Cliff Shape on Internal Stresses and Rock Slope Stability.** Journal of Coastal Research, Vol. 24, N^o. 1, Janeiro, 2008. pp. 52–61.

Anexo 01

Modelo de Checklist aplicado na área de estudo.

(Adaptado de NASCIMENTO, 2009 e de BRAGA, 2005)

CHECKLIST DE CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO VISUAL									
Nome/lugar:			Trecho:			Lua:			
Data/horário:			Maré:						
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO									
Caracterização da falésia									
Falésia viva:									
Falésia recuada:									
Dunas:									
Altura da falésia (aproximada):									
Vegetação/distribuição:			Topo		Face		Base		
Uso da falésia									
Acesso à praia		Mirante		Área de proteção					
Outros		Descrição:							
Presença de estruturas/construções na falésia/dunas									
Uso:		Residencial		Comercial/Serviços		Industrial			
Distância da estrutura até a borda da falésia/duna									
IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO									
Escoamento superficial									
Escoamento descontrolado pela face da falésia									
Erosão pluvial									
Contribuição para a erosão superficial			Drenagem		Irrigação				
Outros		Descrição:							
Percolação de água subterranean									
Maneira pela qual a água é infiltrada no topo da falésia			Naturalmente						
Tanques sépticos		Drenagem							
Outros		Descrição:							
Há superfícies úmidas na face da falésia?									
Movimentos de massa									
Há deslizamentos ativos ou históricos?									
Outros tipos de movimento de massa:									
Ação de ondas									
Presença de bermas ou depósito de tálus:									
Linhas de arenitos na faixa de praia:			Tipo						
As ondas escovam o pé da falésia?									
Há proteção no pé da falésia?			Tipo						
Existe obra de controle de erosão?			Tipo						
A obra causa mais erosão?									
Observações:									

Anexo 02

Checklist utilizado no trecho 01 da área de estudo.

CHECKLIST DE CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO VISUAL									
Nome/lugar: Baía Formosa/RN			Trecho: 01			Lua: Cheia			
Data/horário: 07.04.2012 / 07:45h			Maré: Baixa-mar						
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO									
Caracterização da falésia									
Falésia viva:								N	
Falésia recuada:								S	
Dunas:								N	
Altura da falésia (aproximada):								3m a 8m	
Vegetação/distribuição:		S	Topo	X	Face	X	Base	X	
Uso da falésia									
Acesso à praia		X	Mirante	X	Área de proteção				
Outros		Descrição:							
Presença de estruturas/construções na falésia/dunas									
Uso:		Residencial	X	Comercial/Serviços			Industrial		
Distância da estrutura até a borda da falésia/duna								0m	
IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO									
Escoamento superficial									
Escoamento descontrolado pela face da falésia								S	
Erosão pluvial								S	
Contribuição para a erosão superficial			Drenagem	S	Irrigação		N		
Outros		S	Descrição: Lançamento de águas servidas						
Percolação de água subterrânea									
Maneira pela qual a água é infiltrada no topo da falésia						Naturalmente		S	
Tanques sépticos		N	Drenagem		S				
Outros		S	Descrição: Águas servidas						
Há superfícies úmidas na face da falésia?								S	
Movimentos de massa									
Há deslizamentos ativos ou históricos?								S	
Outros tipos de movimento de massa:			Quedas/Tombamentos						
Ação de ondas									
Presença de bermas ou depósito de tálus:								S	
Linhas de arenitos na faixa de praia:		S	Tipo	Arenitos paralelos à linha de costa					
As ondas escovam o pé da falésia?								N	
Há proteção no pé da falésia?		S	Tipo	Muro de arrimo					
Existe obra de controle de erosão?		N	Tipo						
A obra causa mais erosão?									
Observações: A falésia é constituída de dois tipos de materiais, um argilo-arenoso em praticamente todo o trecho e outro com coloração avermelhada no final do trecho (perceptível em alguns locais sem vegetação). A inclinação da falésia varia de 40° a 85°. Existe vegetação em praticamente todo o trecho. A base da falésia é protegida por muro de arrimo com altura variando de 0,80m a 2,00 m.									

Anexo 03

Checklist utilizado no trecho 02 da área de estudo.

CHECKLIST DE CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO VISUAL									
Nome/lugar: Baía Formosa/RN			Trecho: 02		Lua: Cheia				
Data/horário: 07.04.2012 / 08:00h			Maré: Baixa-mar						
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO									
Caracterização da falésia									
Falésia viva:								S	
Falésia recuada:								S	
Dunas:								N	
Altura da falésia (aproximada):								8m a 15m	
Vegetação/distribuição:			S	Topo	X	Face	X	Base	X
Uso da falésia									
Acesso à praia		Mirante		X	Área de proteção				
Outros		Descrição:							
Presença de estruturas/construções na falésia/dunas									
Uso:		Residencial	Comercial/Serviços			X	Industrial		
Distância da estrutura até a borda da falésia/duna								3m	
IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO									
Escoamento superficial									
Escoamento descontrolado pela face da falésia								N	
Erosão pluvial								S	
Contribuição para a erosão superficial			Drenagem	N	Irrigação		N		
Outros		N	Descrição:						
Percolação de água subterrânea									
Maneira pela qual a água é infiltrada no topo da falésia						Naturalmente	S		
Tanques sépticos		N	Drenagem			N			
Outros		N	Descrição:						
Há superfícies úmidas na face da falésia?								N	
Movimentos de massa									
Há deslizamentos ativos ou históricos?								S	
Outros tipos de movimento de massa:			Escorregamento/Quedas/Tombamentos						
Ação de ondas									
Presença de bermas ou depósito de tálus:								S	
Linhas de arenitos na faixa de praia:			N	Tipo					
As ondas escovam o pé da falésia?								N	
Há proteção no pé da falésia?			S	Tipo		Muro de arrimo			
Existe obra de controle de erosão?			N	Tipo					
A obra causa mais erosão?									
Observações:									
<p>A falésia é constituída, basicamente, por dois tipos de materiais. No topo, material areno-argiloso ou siltoso com coloração avermelhada tendendo a uma coloração variegada em alguns locais e na base, um material mais argiloso de coloração variegada. Existe vegetação por todo o trecho, inclusive árvores de grande porte. A base da falésia é protegida por muro de arrimo com altura variando de 0m a 1,20m (existe uma parte do muro encoberta pela areia da praia). A altura da falésia está compreendida entre 8m a 15m e sua inclinação é de aproximadamente 90°.</p>									

Anexo 04

Checklist utilizado no trecho 03 da área de estudo.

CHECKLIST DE CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO VISUAL									
Nome/lugar: Baía Formosa/RN			Trecho: 03			Lua: Cheia			
Data/horário: 07.04.2012 / 08:30h			Maré: Baixa-mar						
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO									
Caracterização da falésia									
Falésia viva:								S	
Falésia recuada:								N	
Dunas:								S	
Altura da falésia (aproximada):								8 a 12m	
Vegetação/distribuição:		N		Topo		Face		Base	
Uso da falésia									
Acesso à praia		X		Mirante		Área de proteção			
Outros		Descrição:							
Presença de estruturas/construções na falésia/dunas									
Uso:		Residencial		Comercial/Serviços		Industrial			
Distância da estrutura até a borda da falésia/duna									
IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO									
Escoamento superficial									
Escoamento descontrolado pela face da falésia								N	
Erosão pluvial								S	
Contribuição para a erosão superficial			Drenagem		N		Irrigação		
Outros		N		Descrição:					
Percolação de água subterrânea									
Maneira pela qual a água é infiltrada no topo da falésia						Naturalmente		S	
Tanques sépticos		N		Drenagem		N			
Outros		N		Descrição: Presença de drenagem, mas sem infiltração no topo.					
Há superfícies úmidas na face da falésia?								S	
Movimentos de massa									
Há deslizamentos ativos ou históricos?								S	
Outros tipos de movimento de massa:				Solapamento na base da falésia/Quedas/Tombamentos					
Ação de ondas									
Presença de bermas ou depósito de tálus:								N	
Linhas de arenitos na faixa de praia:			S		Tipo		Arenitos ferruginosos		
As ondas escovam o pé da falésia?								S	
Há proteção no pé da falésia?			N		Tipo				
Existe obra de controle de erosão?			N		Tipo				
A obra causa mais erosão?									
Observações:									
O trecho possui uma maior complexidade no que diz respeito à constituição da falésia. No topo, material areno-siltoso com variação de tonalidade da cor amarelada (areia) à coloração avermelhada e na base, um material mais argiloso de coloração variegada. Existe uma camada intermediária constituída de material argiloso e seixos. Não existe vegetação na falésia. A base da falésia não é protegida por muro de arrimo. A altura da falésia está entre 8 a 12m e sua inclinação é de aproximadamente 90°.									

Anexo 05 Checklist utilizado no trecho 04 da área de estudo.

CHECKLIST DE CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO VISUAL									
Nome/lugar: Baía Formosa/RN			Trecho: 04			Lua: Cheia			
Data/horário: 07.04.2012 / 09:00h			Maré: Baixa-mar						
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO									
Caracterização da falésia									
Falésia viva:			S						
Falésia recuada:			S						
Dunas:			S						
Altura da falésia (aproximada):			4 a 8 m						
Vegetação/distribuição:			S	Topo	X	Face		Base	
Uso da falésia									
Acesso à praia			Mirante			Área de proteção			
Outros			Descrição:						
Presença de estruturas/construções na falésia/dunas									
Uso:		Residencial		Comercial/Serviços			Industrial		
Distância da estrutura até a borda da falésia/duna									
IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO TRECHO									
Escoamento superficial									
Escoamento descontrolado pela face da falésia			N						
Erosão pluvial			S						
Contribuição para a erosão superficial			Drenagem	N	Irrigação		N		
Outros		N	Descrição:						
Percolação de água subterrânea									
Maneira pela qual a água é infiltrada no topo da falésia					Naturalmente		S		
Tanques sépticos		N	Drenagem		N				
Outros		N	Descrição:						
Há superfícies úmidas na face da falésia?			S						
Movimentos de massa									
Há deslizamentos ativos ou históricos?			S						
Outros tipos de movimento de massa:			Solapamento na base da falésia/Quedas/Tombamentos						
Ação de ondas									
Presença de bermas ou depósito de tálus:			S						
Linhas de arenitos na faixa de praia:		S	Tipo		Arenitos de praia em formação e ferruginosos				
As ondas escovam o pé da falésia?			S						
Há proteção no pé da falésia?		N	Tipo						
Existe obra de controle de erosão?		N	Tipo						
A obra causa mais erosão?									
Observações:									
O trecho possui duas constituições típicas da falésia. A primeira é similar ao final do trecho 03, sendo que, gradativamente, a altura vai diminuindo e o material da base vai desaparecendo. A segunda se caracteriza por se composta de material proveniente de dunas em processo inicial de cimentação, originando possivelmente o material do topo da falésia dos trechos anteriores. Existe vegetação apenas no topo da falésia e também não existe muro de arrimo. A altura da falésia varia de aproximadamente 4m a 8m e sua inclinação é de aproximadamente 90°.									

