

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**VICTOR TOZATO CUNHA**

**Análise de estabilidade e de dano potencial em queda de bloco rochoso no morro da Boa Vista, Vila Velha/ES**

**Caçapava do Sul**

**2024**

**VICTOR TOZATO CUNHA**

**Análise de estabilidade e de dano potencial em queda de bloco rochoso no morro da Boa Vista, Vila Velha/ES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. José Waldomiro Jimenez Rojas

Co-orientador: Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova

**Caçapava do Sul**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C645a Cunha, Victor Tozato

Análise de estabilidade e de dano potencial em queda  
de bloco rochoso no Morro da Boa Vista, Vila Velha/ES /  
Victor Tozato Cunha.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.

"Orientação: José Waldomiro Jimenez Rojas".

1. Geotecnia. 2. Sensoriamento. I. Título.

**VICTOR TOZATO CUNHA**

**Análise de estabilidade e de dano potencial em queda de bloco rochoso no morro da Boa Vista, Vila Velha/ES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 11 de julho de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. José Waldomiro Jimenez Rojas

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves

Banca Examinadora

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Felipe Guadagnin  
Banca Examinadora  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ITALO GOMES GONCALVES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2024, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 19/07/2024, às 08:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE GUADAGNIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/07/2024, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1492135** e o código CRC **B860B38E**.

## RESUMO

A ocupação desordenada em perímetros urbanos tem causado problemas para a população que ocupa essas regiões, problemas tanto no âmbito social quanto ambiental, estando vulneráveis à alagamentos, deslizamentos de solo, rocha e quedas de blocos. O mapeamento geológico-geotécnico é uma ferramenta extremamente importante para a avaliação de riscos nestes locais, graduando em escala de risco e delimitando áreas com vulnerabilidade à acidentes. Este trabalho visa analisar o risco geológico no Morro Boa Vista, situado no bairro São Torquato em Vila Velha/ES quanto ao fator de segurança para a ruptura de blocos e de possível trajetória em caso de queda destes. As metodologias a serem empregadas para elaboração de modelo virtual do afloramento inclui o uso de modelos 3D já existentes. Para análise do fator de segurança foi utilizado o método de equilíbrio limite dos blocos formados por fraturas discretas em modelo 3D. Para análise de queda de blocos foi utilizada a metodologia de movimento de corpo rígido. Ao realizar o mapeamento a partir do modelo virtual foram medidas as orientações das discontinuidades, observando-se que estas condicionam rupturas planares. Devido à baixa resolução do modelo, os resultados podem ser imprecisos. Foram discretizados ao todo cinco blocos rochosos: o bloco nº 5 já deslizou; os blocos nº 2 e nº 3 foram estabilizados por obras; o bloco nº 4 está sustentado pelos blocos nº 2 e nº 3; e o bloco nº 1, de maior dimensão com volume total de 41,6 mil m<sup>3</sup>, apresentou fator de segurança de 1,7 mesmo em condição saturada. Para simular a trajetória das quedas de blocos, foram considerados diferentes tamanhos de blocos desprendendo a partir do bloco nº 1. O coeficiente de restituição utilizado deve ser melhor estudado, pois sua variação pode impactar nos resultados. Os resultados mostraram que os blocos não chegariam a alcançar diretamente as casas na região da base do morro, mas poderiam servir como gatilho para desestabilizar outros blocos no caminho.

**Palavras-Chave:** Estabilidade de taludes, deslizamentos, sensoriamento

## ABSTRACT

The disordered occupation in urban perimeters has caused problems for the population that inhabits these regions, resulting in social and environmental issues, making them vulnerable to floods, landslides, and rockfalls. Geological-geotechnical mapping is an extremely important tool for risk assessment in these areas, grading the risk scale and delineating areas vulnerable to accidents. This study aims to analyze the geological risk in Morro Boa Vista, located in the São Torquato neighborhood in Vila Velha/ES, focusing on the safety factor for block rupture and the possible trajectory in case of their fall. The methodologies employed for creating a virtual model of the outcrop include the use of existing 3D models. For the safety factor analysis, the limit equilibrium method was used for blocks formed by discrete fractures in a 3D model. For the block fall analysis, the rigid body motion methodology was used. When performing the mapping from the virtual model, the orientations of the discontinuities were measured, observing that these condition planar ruptures. Due to the low resolution of the model, the results may be imprecise. A total of five rock blocks were discretized: block no. 5 has already slid; blocks no. 2 and no. 3 were stabilized by engineering works; block no. 4 is supported by blocks no. 2 and no. 3; and block no. 1, the largest with a total volume of 41.6 thousand m<sup>3</sup>, presented a safety factor of 1.7 even under saturated conditions. To simulate the trajectory of the falling blocks, different block sizes detaching from block no. 1 were considered. The restitution coefficient used should be better studied, as its variation can impact the results. The results showed that the blocks would not directly reach the houses at the base of the hill but could trigger the destabilization of other blocks along the path..

**Keywords:** Slope stability, landslides, remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bloco que se deslocou em janeiro de 2016. ....	19
Figura 2 - Local onde o bloco se desprende sendo contemplado com estruturas de contenção.....	20
Figura 3: Mapa de localização da área de estudo.....	21
Figura 4: Mapa geológico do Orógeno Araçuaí.....	23
Figura 5: Mapa geológico da região da Grande Vitória com área de estudo marcada em caixa preta.....	25
Figura 6: Representação esquemática da fotogrametria (os pontos de controle nas imagens estão marcados como cruzetas brancas). ....	27
Figura 7: Geometria da encosta que apresenta uma ruptura planar: (a) seção transversal mostrando os planos que formam uma ruptura planar; (b) superfícies de liberação nas extremidades da ruptura planar; (c) fatias de espessura unitária usadas na análise de estabilidade.....	31
Figura 8: Ruptura planar. A área sombreada no estereograma representa as possíveis direções de deslizamento ao longo da vertente representada. ....	32
Figura 9: Ilustração da esquerda representando um esquema de ruptura em forma de cunha; a ilustração da direita mostra o estereograma contendo a orientação da linha de interseção e a faixa do mergulho da linha de intersecção $\psi$ , onde a ruptura é viável. ....	33
Figura 10: Classes comuns de falhas de tombamento: a) tombamento de blocos de colunas de rocha; b) tombamento flexural de lajes de rocha inclinadas abruptamente em direção à face; c) tombamento de flexão de blocos. ....	34
Figura 11: Rolamento de blocos causados por desconfinamento. ....	35
Figura 12: Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	35
Figura 13: a) Componentes normais e de cisalhamento do esforço e deslocamento ao longo do plano de acamamento da amostra; b) Pico da resistência cisalhante e resistência cisalhante residual.....	36



Figura 14 - Influência das condições geológicas na estabilidade de taludes rochosos: (a) potencial ruptura planar; (b) potencial ruptura em cunha em rochas fracas e densamente fraturadas. ....	40
Figura 15: Desmembramento da força $W$ (peso do bloco) em componentes paralelas e perpendiculares ao plano de deslizamento (mergulho $\psi$ ). ....	41
Figura 16: Diagrama de Mohr mostrando a tensão de cisalhamento definida pela coesão e ângulo de fricção $\phi$ . ....	42
Figura 17 - Mapa de risco setorizado do Bairro São Torquato / Morro Boa Vista ....	44
Figura 18 - Obras de contenção de bloco rochoso sendo executado. ....	45
Figura 19: Fluxograma de planejamento e execução da metodologia aplicada. ....	47
Figura 20 - Imagens obtidas pelo levantamento feito com o drone. a) vertente do maciço com alta inclinação; b) bloco que deslizou em 2016. ....	48
Figura 21 – Inserção de códigos no "Destino" do atalho do software Google Chrome para permitir a renderização e obtenção correta do modelo do Google Earth. ....	49
Figura 22 - Imagem do software Blender com o modelo obtido através do Google Earth. ....	50
Figura 23 - Vista do modelo no Micromine com os blocos rochosos em evidência...	51
Figura 24 - Estereograma com o diagrama de rosetas das discontinuidades encontradas. ....	52
Figura 25 - Vista em planta do modelo 3D no software RocSlope com os cinco blocos discretizados. ....	53
Figura 26 - Vista para nordeste do modelo 3D no software RocSlope com os cinco blocos discretizados. ....	53
Figura 27 - Parâmetros utilizados no <i>software</i> Trajec3d para configurar as características do rompimento do bloco. ....	55
Figura 28 - Modelo 3D realizado no <i>software</i> Trajec3d sem textura com a trajetória do deslocamento de três blocos rochosos a partir da posição do Bloco 1. ....	56
Figura 29 - Vista em planta com a possível trajetória dos blocos em caso de queda. ....	57

Figura 30 - Vista isométrica para nordeste com a possível trajetória dos blocos em caso de queda.....	58
Figura 31 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo. ....	59
Figura 32 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo. ....	60
Figura 33 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de espaçamento entre descontinuidades no maciço rochoso. ....	29
Tabela 2 - Resistência ao cisalhamento de descontinuidades preenchidas e materiais de preenchimento.....	38
Tabela 3: Valores dos fatores de segurança totais mínimos.....	39
Tabela 4 - Descontinuidades medidas. ....	51

## **LISTA DE SIGLAS**

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

FS – Fator de segurança

MDE – Modelo Digital de Elevação

MVA – Modelos Virtuais de Afloramento

VANT – Veículo aéreo não tripulado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\psi_p$  – Mergulho do plano de deslizamento

$\psi_{fi}$  – Inclinação do talude

$\phi$  – Ângulo de atrito

$\alpha_i$  – Direção do mergulho da linha (*trend*)

$\psi_i$  – Mergulho da linha (*plunge*)

$\lambda$  – Número de descontinuidades por metro

$c$  – Coesão

$\tau$  - Resistência ao cisalhamento

$\sigma_n$  – Componente do esforço perpendicular ao plano de ruptura

$\sigma_1$  – Maior tensão efetiva de ruptura

$\sigma_3$  – Menor tensão efetiva de ruptura

$\sigma_{ci}$  – Resistência a compressão uniaxial

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.2	JUSTIFICATIVA .....	18
2	ÁREA DE ESTUDO .....	21
2.1	Localização da área .....	21
2.2	Contexto geológico.....	22
2.2.1	Geologia regional.....	22
2.2.2	Geologia local .....	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1	Teoria dos métodos e técnicas .....	26
3.1.1	Aerofotogrametria .....	26
3.1.2	Sensoriamento remoto.....	27
3.1.3	Caracterização de descontinuidades .....	28
3.1.4	Mecanismos de ruptura em taludes de rochas .....	30
3.1.5	Critério de ruptura Mohr-Coulomb .....	35
3.1.6	Teoria do fator de segurança .....	39
3.1.7	Softwares para criação do modelo 3D .....	43
3.1.8	Softwares de análise de estabilidade.....	43
3.2	Trabalhos anteriores aplicados .....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1	Resultados da observação de campo .....	48
5.2	Obtenção do modelo 3D .....	48
5.3	Análise do fator de segurança.....	52

5.4	Simulação da trajetória após rompimento .....	55
6	CONCLUSÕES .....	62
7	REFERÊNCIAS.....	64





## 1 INTRODUÇÃO

No ramo das geociências e da engenharia o estudo sobre a estabilidade de blocos rochosos, taludes naturais ou escavados, principalmente em áreas urbanas, é de grande importância, pois desastres desta natureza tendem a causar grandes perdas materiais ou humanas (Machado, 2006). A inadequação ou ausência de ordenamento à realidade urbana favorecem o aumento de risco de desastres nas áreas urbanas, pois uma das consequências do uso do espaço nessas condições é a ocupação de áreas passíveis de desastres futuros (Maricato, 1996, p. 58). Da mesma forma que em outras regiões do Brasil, o estado do Espírito Santo está inserido neste contexto.

O município de Vila Velha/ES possui regiões de relevo acidentado que é ocupado pela população que por muitas vezes modificam o relevo e vegetação, e de acordo com Farah (2003), a estabilidade de uma encosta, em seu estado natural, está atrelada a características geométricas, geológicas e pelo ambiente fisiológico em que se insere. Ou seja, a alteração antropogênica causada nestes locais, podem afetar a estabilidade natural do relevo, que por vezes já apresentam riscos de movimentação de solo e rocha.

Na região urbana do município de Vila Velha, distrito de São Torquato, recentemente nos anos de 2016 e 2020 ocorreram eventos de quedas de blocos rochosos do morro da boa vista que alertaram a comunidade e setores públicos para o risco geológico que existe no local. Em decorrência destes acidentes há a necessidade de aprofundamento no conhecimento das características geológica-geotécnica da área de estudo.

Com o avanço de tecnologias, muitos métodos de resolução de problemas podem sofrer mudanças, no caso do mapeamento geológico-geotécnico, o uso de VANT (veículo aéreo não tripulado) permite o acesso a locais inacessíveis para o mapeamento convencional e a elaboração de modelos em três dimensões de áreas de interesse, que auxiliam com qualidade o planejamento e execução de trabalhos, podendo reduzir tempo e custos de atividades.

Este baixo custo tem sido relevante para trabalhos científicos que abordam, por exemplo, o relevo e a geologia já que a aquisição de imagens por sensores em VANT's

permite a elaboração de modelos digitais de elevação (MDE), ortoimagens, curvas de nível, e modelos tridimensionais texturizados (Grupta; Ghonge, 2013; Nex; Remondino, 2013). Da mesma forma também isso se aplica também às imagens obtidas por sensores em satélites, podendo ser utilizado como complemento para imagens de VANT cobrindo áreas regionais.

## **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o risco geológico presente no Morro Boa Vista, localizado no bairro São Torquato na cidade de Vila Velha, ES.

Os objetivos específicos são:

- I. Elaborar Modelo Virtual de Afloramento da área em questão
- II. Elaborar mapa de risco geológico identificado blocos instáveis;
- III. Analisar mecanismos de ruptura: planar, cunha e tombamento;
- IV. Calcular o volume e o peso de blocos que oferecem risco geológico;
- V. Calcular o fator de segurança quanto ao deslizamento ou queda de blocos;
- VI. Estimar a área atingida caso ocorra o deslizamento ou queda de blocos.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O presente trabalho tem como estudo de caso o Morro Boa Vista, o qual situa-se em um antigo bairro de Vila Velha que começou sua ocupação por volta de 1940. Seguindo a linha de várias outras comunidades do estado e do Brasil, passou por um crescimento populacional desordenado, sendo considerado um local com vulnerabilidade social e geológica. Sua população se estabeleceu em um relevo bastante acidentado em meio a grandes blocos de rochas rolados, onde há casos em que estes blocos servem de base para a construção de residências. Com o aumento populacional do município estas áreas de risco tendem a serem cada vez mais ocupadas por famílias de baixa renda, crescendo assim a quantidade de pessoas vulneráveis ao risco geológico local.

No dia primeiro de janeiro de 2016 ocorreu um acidente geológico onde um grande bloco rochoso deslocou-se (Figura 1), movimentando outros grandes blocos de rocha no caminho percorrido, deixando cerca de 10 pessoas feridas.

Figura 1 - Bloco que se deslocou em janeiro de 2016.



Fonte: Luiz Felipe Lannes (2016).

Nesta ocasião foi realizada uma obra em caráter emergencial (Figura 2) com objetivo de estabilizar parte do maciço rochoso de onde o bloco se desprende. No ano de 2019 outro acidente ocorreu, porém, de proporções menores e sem vítimas, onde pequenos blocos rochosos movimentaram-se e atingiram parte de uma residência.

O presente trabalho justifica-se por ter objetivo de analisar e delimitar áreas de risco geológico podendo auxiliar em políticas públicas para mitigar o risco em que os municípios da região estão expostos no cotidiano. Além de colaborar no processo de tomada de decisão quanto aos métodos para a estabilização dos blocos de rocha identificados.

Figura 2 - Local onde o bloco se desprendeu sendo contemplado com estruturas de contenção.



Fonte: Autor (2016).

## 2 ÁREA DE ESTUDO

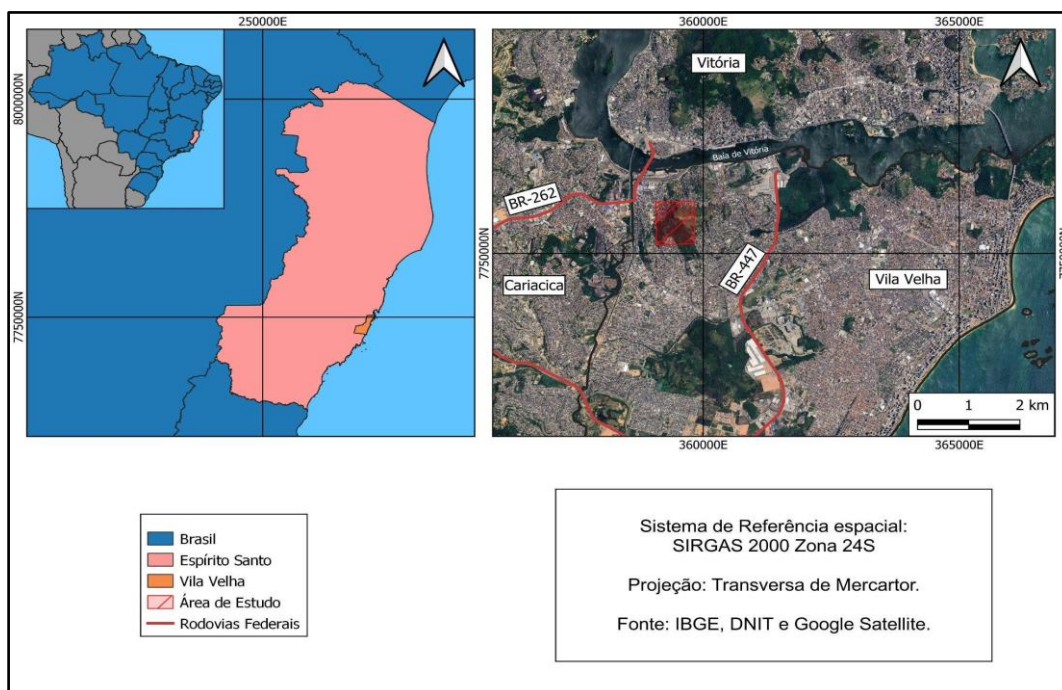
Neste capítulo serão descritas características da área de estudo, envolvendo localização e acesso, e as questões do contexto geológico em que a mesma se encontra.

### 2.1 Localização da área

A área de estudo, como mostra a figura 3, está localizada no bairro São Torquato, mais especificamente no Morro Boa Vista, no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo. O município pertence à região metropolitana do estado, às margens da Baía de Vitória.

O município de Vila Velha de acordo com da Silva Rosa *et al* (2016) teve sua urbanização ocorrida majoritariamente no contexto de modernidade, em que a ocupação do solo urbano ocorre como se fosse um espaço “vazio” aguardando um projeto de desenvolvimento e urbanização que ignora as características biogeofísicas locais.

Figura 3: Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor

No Morro Boa Vista a ocupação foi inicialmente “espontânea”, que é possível ser observado pelos tipos de construções características de aglomerados subnormais (da

Silva Rosa *et al.* 2018). Essa ocupação teve maior intensidade ao início de grandes projetos industriais, responsáveis por atrair migrantes para a metrópole e promover sua configuração atual (Siqueira, 2001; Celante, Sathler e da Silva Rosa, 2015). Em sua maioria, as residências se concentram em terrenos íngremes repletos de matacões sujeitos à rolamentos (CPRM, 2012; Defesa Civil Estadual do ES, 2016).

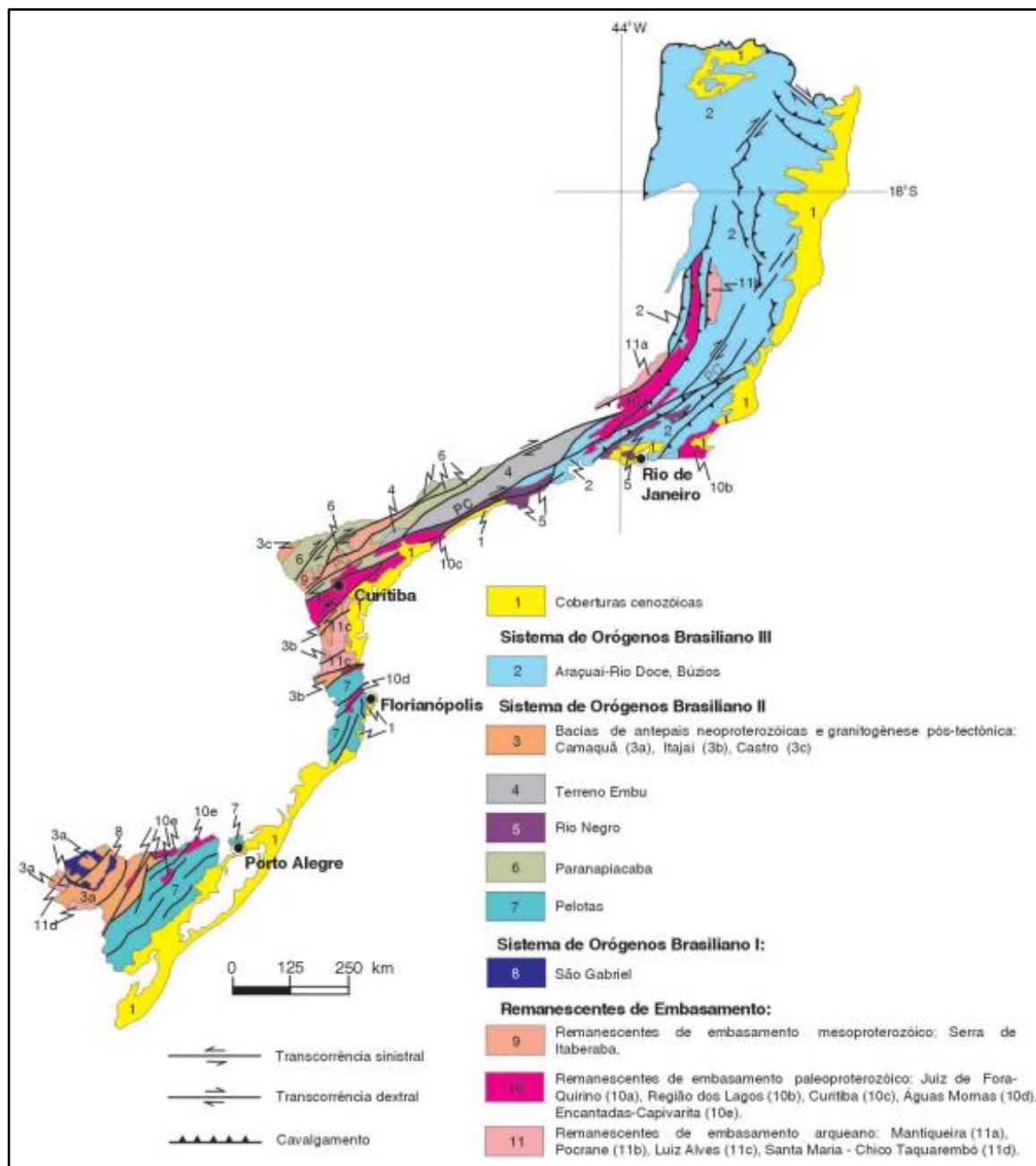
## **2.2 Contexto geológico**

Nesta seção serão descritas as características geológicas da área de estudo, baseada na revisão bibliográfica de trabalhos importantes sobre a geologia regional da área de estudo.

### **2.2.1 Geologia regional**

De acordo com Almeida *et al.* (1977, 1981), a Província Mantiqueira pode ser definida como uma faixa paralela à costa do Atlântico do sudeste e sul do Brasil, com direção NE-SW e mais de 3.000 km de comprimento, como mostrado na figura 4.

Figura 4: Mapa geológico do Orógeno Araçuai.



Fonte: Pedrosa-Soares *et al.* (2007).

Heilbron *et al.* (2004) diz que a Província Mantiqueira pode ser dividida em três segmentos: Segmento Setentrional, que corresponde ao Orógeno Araçuai; Segmento Central, que engloba a Faixa Ribeira, a Zona de Interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira, os terrenos Apiaí, São Roque e Embu; Segmento Meridional, que inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel.

No contexto da Província Mantiqueira a área de estudo está localizada no Orógeno Araçuaí, que de acordo com Pedrosa-Soares *et al* (2001) consiste em um complexo intrusivo que faz parte de uma série de corpos ígneos plutônicos, indeformados, que tiveram sua origem no estágio de colapso gravitacional do orógeno, e foi denominado supersuíte G5.

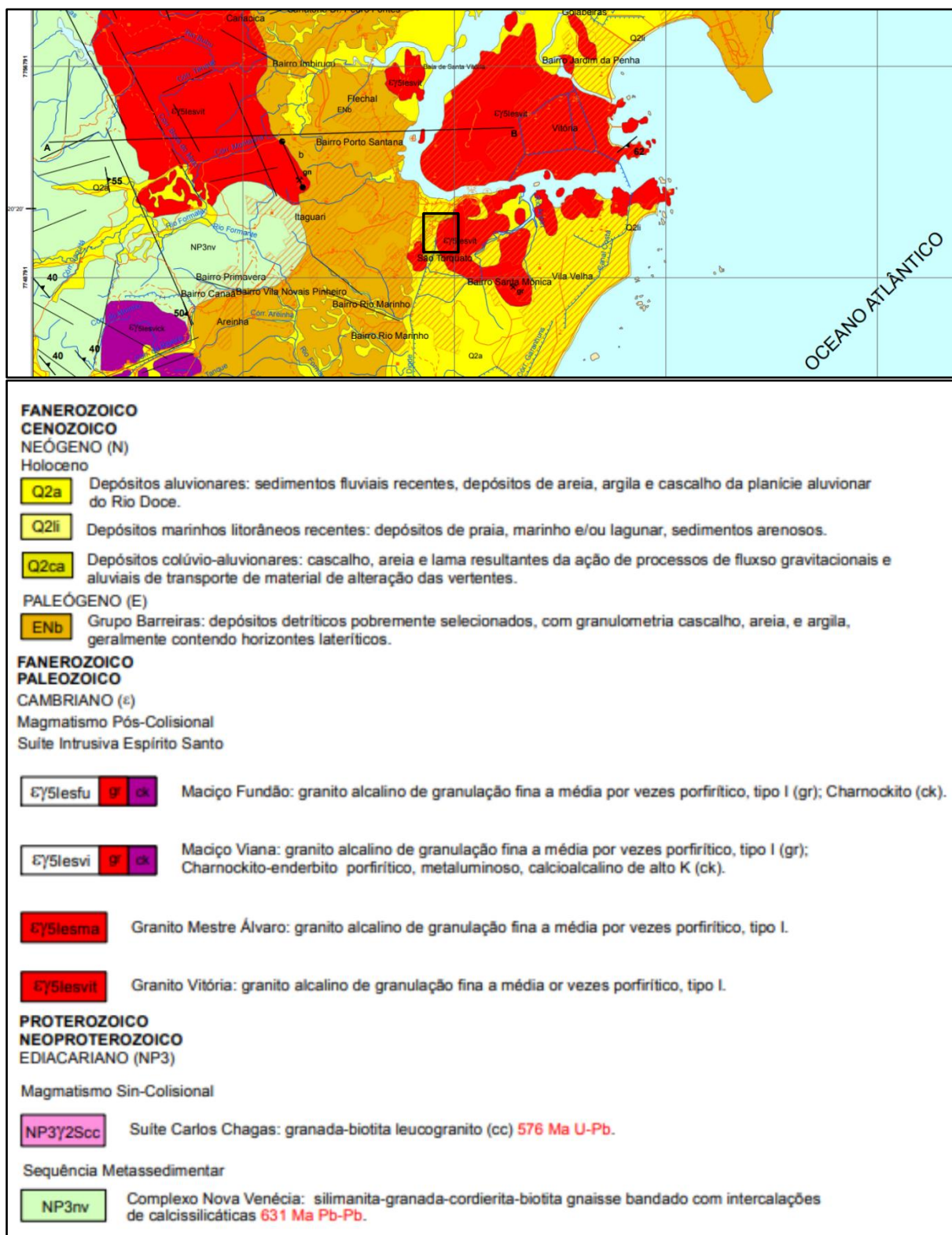
O Orógeno Araçuaí é uma faixa de dobramentos Neoproterozóica que limita, a sul e a sudeste o Cráton São Francisco. A suíte G5 representa o plutonismo tipo I e A2, cálcio-alcálico rico em potássio e ferro, do estágio pós colisional do Orógeno Araçuaí (Soares *et al.*, 2007, p. 11), livre de foliação regional (embora a foliação de borda e/ou fluxo ígneo possam localmente ser concordante com a foliação regional). Muitas destas intrusões são circunscritas pela foliação regional em torno de seus contatos (Pedrosa-Soares *et al.* 2001).

### **2.2.2 Geologia local**

A área de estudo está inserida no contexto geológico local no Maciço Vitória, mostrado na figura 5, que se trata de um maciço representado por vários corpos individualizados de Granito Porfírico, envolvendo megacristais de 3x1cm de dimensões, exibe foliação de fluxo magmático e intrusões de diques basálticos (CPRM, 2014).



Figura 5: Mapa geológico da região da Grande Vitória com área de estudo marcada em caixa preta.



Fonte: Modificado de Carta geológica: folha Vitória - DF.24-V-B-I, CPRM. (2014).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão revisadas as referências bibliográficas existentes sobre os conceitos necessários para aplicação das metodologias propostas para o trabalho, além da revisão de trabalhos anteriores na mesma área de estudo ou com temáticas semelhantes.

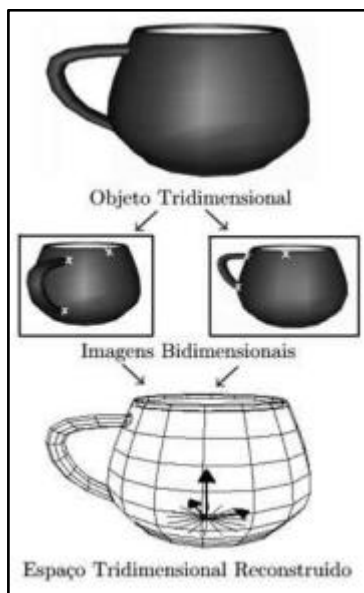
#### **3.1 Teoria dos métodos e técnicas**

A avaliação da estabilidade de taludes e sua aplicação envolvem a utilização de uma variedade de métodos, técnicas, teorias, análises e exemplos. Neste contexto, vamos apresentar a seguir uma descrição de alguns desses métodos, com o objetivo de destacar informações pertinentes para compreender e aplicar este estudo.

##### **3.1.1 Aerofotogrametria**

De acordo com Coelho & Brito (2007), a fotogrametria se trata da transformação de um sistema bidimensional em um sistema tridimensional, para que essa transformação seja implantada, é necessário um conjunto de pontos de controle, como mostrado na figura 6, e a sobreposição de pelo menos 60% entre as fotos e 30% entre as linhas de voo. Quanto maior a quantidade de pontos de controle, mais confiáveis tendem a ser os resultados, porém, convém verificar até onde é economicamente viável a obtenção de muitos pontos de controle. Devido a isso, Coelho & Brito (2007), afirmaram que alguns processos foram desenvolvidos, de modo, que a partir de apenas alguns pontos de controle, possa ser gerada uma infinidade de outros, com precisões aceitáveis para serem utilizados como se fossem pontos de controle reais.

Figura 6: Representação esquemática da fotogrametria (os pontos de controle nas imagens estão marcados como cruzetas brancas).



Fonte: Coelho & Brito (2007).

Através da fotogrametria, podem-se gerar modelos virtuais de afloramento ou MVAs, que são modelos criados utilizando imagens georreferenciadas de afloramentos a partir de técnicas computacionais. Como dito por Tavani *et al.* (2014), um modelo virtual de afloramento tem a capacidade de retratar uma superfície topográfica em um ambiente virtual tridimensional. Modelos ortorretificados possibilitam a obtenção de dados como as orientações de planos de descontinuidades, sendo vantajoso em estudos de análise de estabilidade de taludes, que podem frequentemente ter áreas inacessíveis, por exemplo.

### 3.1.2 Sensoriamento remoto

De acordo com Fiori, o sensoriamento remoto possibilita a identificação, através de seus produtos, de padrões formados por estruturas geológicas tanto superficiais quanto profundas. E tanto os relevos quanto as drenagens que se destacam nas imagens podem apresentar padrões específicos, determinados por fatores estruturais e litológicos. Portanto, através de produtos de sensoriamento remoto, como os modelos digitais de elevação, é possível analisar características geológicas, incluindo padrões de descontinuidades e o volume de blocos.

### **3.1.3 Caracterização de descontinuidades**

Segundo Fiori (2015), descontinuidade é considerada um plano de fraqueza nas rochas, ao longo do qual o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento, que pode mesmo ser nula, dependendo da frequência e natureza do preenchimento das descontinuidades presentes, como falhas, juntas, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração e veios ou diques. Para caracterizar as descontinuidades é necessário levar em consideração alguns fatores mensuráveis que serão abordados à frente.

#### **3.1.3.1 Orientação espacial**

A orientação espacial é descrita em termos de direção e mergulho do plano de superfície da mesma. A influência da orientação de descontinuidades na resistência do maciço rochoso é evidenciada no deslizamento de blocos em taludes ao longo de uma descontinuidade, e sua importância tem sido bem estudada nos maiores escorregamentos ocorridos, como o de Vaiont na Itália (Muller, 1964)

Dois aspectos são de extrema relevância quando se trata da influência da orientação das juntas na estabilidade de vertentes rochosas: a) se as juntas ou as interseções entre elas surgem na vertente com um ângulo igual ou menor que a inclinação da própria vertente ou talude, e b) se o ângulo de inclinação das juntas ou o declive das interseções das juntas supera o ângulo de atrito ao longo das superfícies. Portanto, o mero fato de as descontinuidades e suas interseções emergirem nas vertentes dos taludes é de significativo interesse para a estabilidade das mesmas.

#### **3.1.3.2 Espaçamento ou frequência**

O espaçamento, ou frequência, das descontinuidades é geralmente expresso em termos da distância média entre elas, como mostrado na tabela 1, sendo que

essas distâncias são comumente medidas ao longo de linhas de varredura (Fiori, 2015).

Tabela 1: Tabela de espaçamento entre descontinuidades no maciço rochoso.

<b>Termo</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>
Extremamente pequeno	< 20
Muito pequeno	20 – 60
Pequeno	60 – 200
Moderado	200 – 600
Grande	600 – 2000
Muito grande	2000 – 6000
Extremamente grande	> 6000

Fonte: ISMR (1983).

A frequência ( $f_d$ ), expressa em número de juntas por metro de linha de varredura, onde N é o número de traços de descontinuidades interceptadas pela linha de varredura e L é o comprimento da linha de varredura, em metros.

$$f_d = \frac{N}{L} \quad (1)$$

O espaçamento médio ( $E_d$ ), ou a distância média entre as descontinuidades, é igual ao inverso da frequência  $f_d$ , e é expresso pela seguinte relação:

$$E_d = \frac{1}{f_d} \quad (2)$$

A presença e a densidade de descontinuidades impactam diretamente a qualidade e a resistência global do maciço rochoso. Segundo Fiori (2015), quando o espaçamento das descontinuidades é significativamente amplo, o comportamento do maciço rochoso é principalmente determinado pelas características da rocha intacta, e é influenciado pelo tamanho dos blocos rochosos presentes.

### **3.1.3.3 Persistência ou extensão**

A persistência de uma descontinuidade é expressão de sua continuidade ininterrupta ao longo da extensão horizontal e na vertical, podendo variar de alta (>20m) a muito baixa (<1m). Este parâmetro define o tamanho dos blocos e o comprimento das superfícies de deslizamento potenciais, portanto, o mapeamento deve se concentrar em medir a persistência do conjunto de descontinuidades que terá a maior influência na estabilidade (Wyllie & Mah, 2005).

### **3.1.4 Mecanismos de ruptura em taludes de rochas**

De acordo com Fiori (2015), a estabilidade de taludes rochosos tem como base as atitudes dos planos de fraqueza em relação à atitude da vertente ou talude, levando-se em consideração o ângulo de atrito atuante ao longo do plano de fraqueza. Muitos blocos em talude estão em condições estáveis, embora contenham planos de fraqueza muito inclinados. Essa condição ocorre quando não há liberdade de movimentação ao longo da superfície de fraqueza, pois, pode haver impedimentos para sua movimentação (Fiori, 2015). Porém, uma vez retirado este impedimento, o bloco ficará livre para movimentar-se. Esta movimentação ou ruptura em blocos rochosos podem ocorrer de quatro formas diferentes, que serão citadas abaixo.

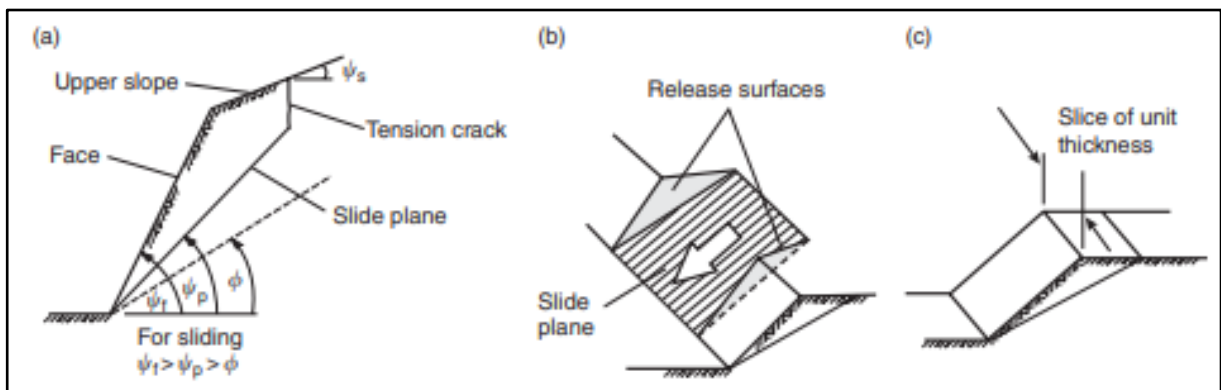
#### **3.1.4.1 Ruptura Planar**

Segundo Wyllie & Mah (2004), como mostrado na figura 7 , para que ocorra uma ruptura planar, é necessário que algumas condições geométricas sejam satisfeitas:

- O plano no qual o deslizamento ocorre deve ser alinhado paralelo ou quase paralelo (dentro de aproximadamente 20 graus) à face da encosta;
- O plano de deslizamento deve aflorar na face da encosta, o que significa que a inclinação do plano deve ser menor que a inclinação da face da encosta, ou seja,  $\psi_p < \psi_f$ ;

- A inclinação do plano de deslizamento deve ser maior do que o ângulo de atrito deste plano, ou seja,  $\psi_p > \phi$ ;
- A extremidade superior da superfície de deslizamento deve interseccionar a parte superior da encosta ou terminar em uma fratura de tração;
- Superfícies de liberação que oferecem resistência negligenciável ao deslizamento devem estar presentes na massa de rocha para definir os limites laterais do deslizamento. Alternativamente, a ruptura pode ocorrer em um plano de deslizamento que passa pela convexidade ou "nariz" da encosta.

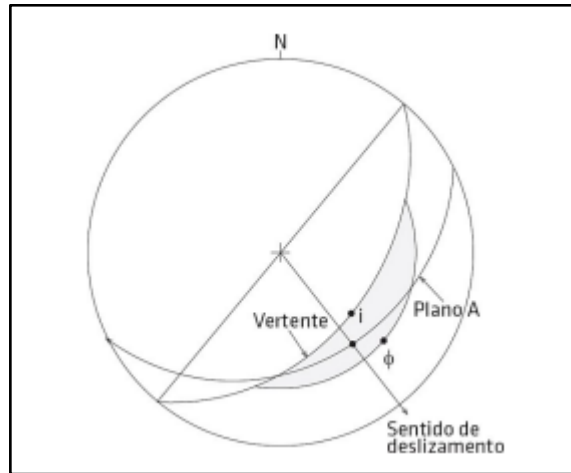
Figura 7: Geometria da encosta que apresenta uma ruptura planar: (a) seção transversal mostrando os planos que formam uma ruptura planar; (b) superfícies de liberação nas extremidades da ruptura planar; (c) fatias de espessura unitária usadas na análise de estabilidade.



Fonte: Wyllie & Mah (2005).

O padrão típico na representação estereográfica dos polos dos planos de descontinuidade, que viabiliza a ocorrência de uma ruptura planar em um talude de rocha, coincide com o exemplo ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Ruptura planar. A área sombreada no estereograma representa as possíveis direções de deslizamento ao longo da vertente representada.



Fonte: Fiori (2015).

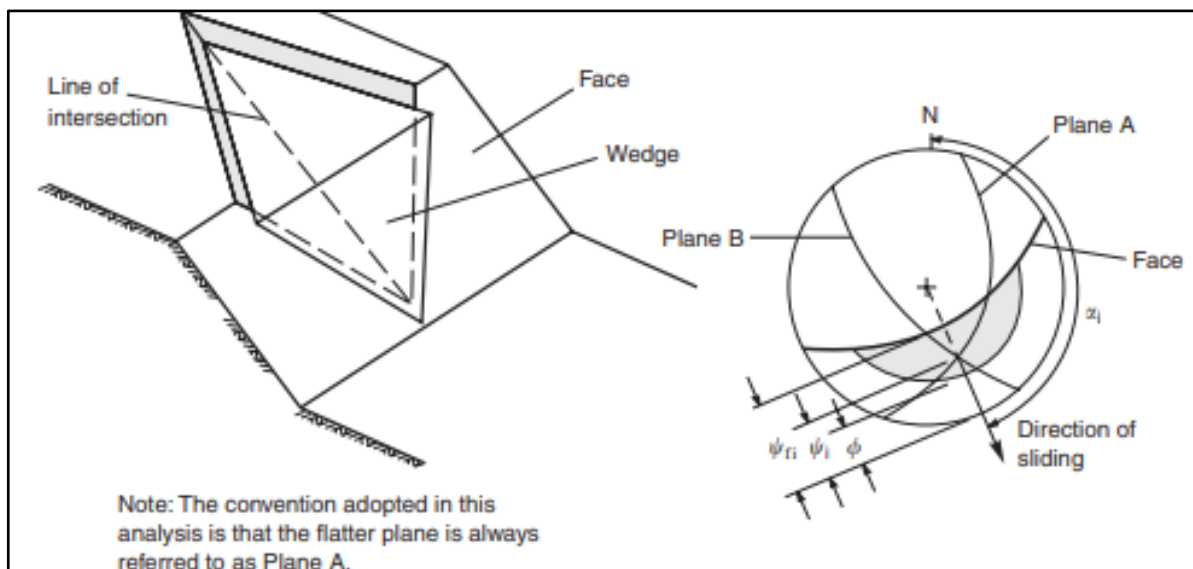
### 3.1.4.2 Ruptura em Cunha

Como mostrado na figura 9, os deslizamentos em cunha envolvem escorregamentos translacionais ao longo de pelo menos dois conjuntos de planos que se intersectam (Fiori, 2015). E ainda seguindo as afirmações de Fiori (2015), os deslizamentos em cunha devem satisfazer três condições:

- As superfícies de deslizamento deverão intersectar ou aflorar na face.
- A linha de intersecção dos dois planos de deslizamento deverá aflorar na face.
- O caimento da linha de intersecção deverá ser maior que o ângulo de atrito dos planos.



Figura 9: Ilustração da esquerda representando um esquema de ruptura em forma de cunha; a ilustração da direita mostra o estereograma contendo a orientação da linha de intersecção e a faixa do mergulho da linha de intersecção  $\psi_i$ , onde a ruptura é viável.



Fonte: Wyllie & Mah (2005).

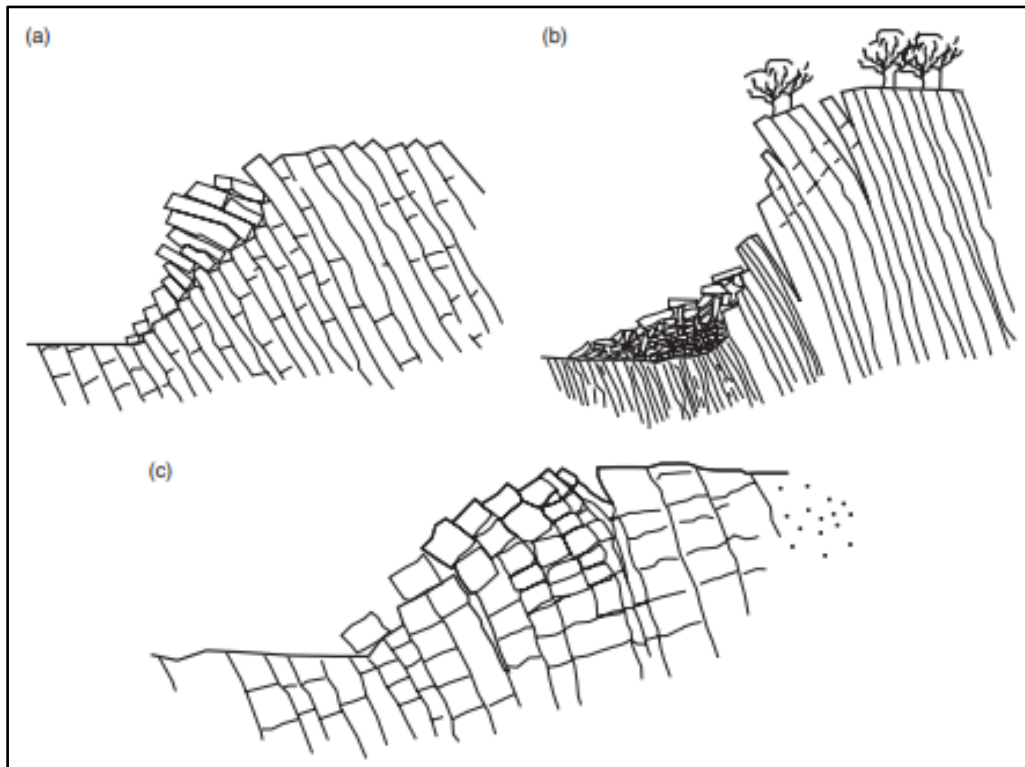
### 3.1.4.3 Ruptura de Tombamento

O tombamento de blocos não está ligado a escorregamento propriamente dito, segundo Fiori (2015), trata-se de blocos individuais, ou um conjunto de blocos que rotacionam sobre eixos fixos tombando sobre a face livre da vertente, e para tal, deve-se haver três condições, que são:

- Deverá haver duas famílias de descontinuidades que se entrecruzam, inclinadas uma a favor e outra contra a inclinação da face;
- As condições mais favoráveis ao tombamento aparecem quando a família que mergulha contra a face é inclinada a ângulos maiores que  $(90 - \phi)$  (Hoek & Bray, 1981; Walton, 1985), enquanto a família que mergulha a favor deverá ter inclinações menores que o ângulo de atrito interno;
- Os rumos de mergulho desses planos deverão se situar dentro de  $20^\circ$  do rumo de mergulho da face do talude.

Em 1976, Goodman & Bray descreveram três tipos de rupturas por tombamento que podem ser encontradas em campo, são elas, tombamento em bloco, tombamento flexural e tombamento bloco-flexural, como é mostrado na figura 10.

Figura 10: Classes comuns de falhas de tombamento: a) tombamento de blocos de colunas de rocha; b) tombamento flexural de lajes de rocha inclinadas abruptamente em direção à face; c) tombamento de flexão de blocos.

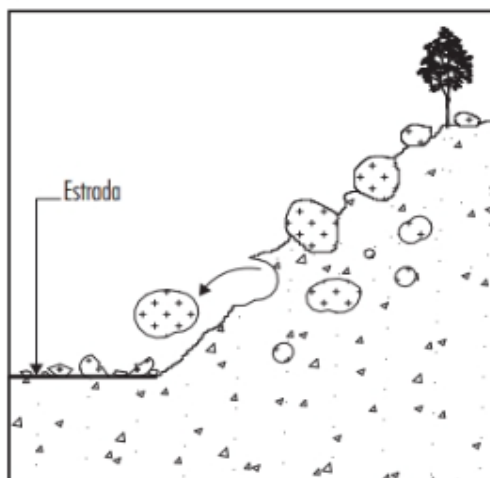


Fonte: Goodman & Bray (1976).

#### 3.1.4.4 Rolamento de blocos

Por conta da compartimentação de maciços causados por intemperismo em faces de taludes naturais ou escavados, pode ocorrer o desprendimento de matacões gerando assim rolamentos de blocos. Como visto na figura 11, os blocos em forma de matacões que ficam expostos na superfície em razão da erosão do solo adjacente podem perder a estabilidade, rolando encosta abaixo (Queiroz, 2016).

Figura 11: Rolamento de blocos causados por desconfinamento.



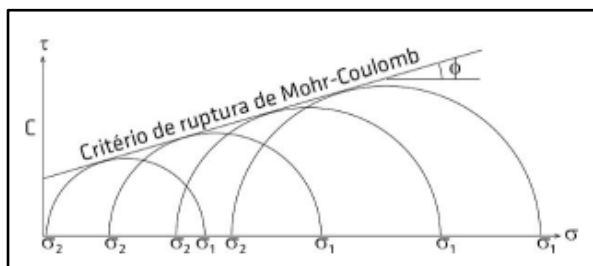
Fonte: Queiroz (2016).

Em 1977, Hoek e Bray propuseram uma metodologia para verificar a estabilidade de blocos na superfície de taludes admitindo ângulo de atrito na base de  $\phi = 35^\circ$ . A situação é extrema quando a altura do bloco é muito grande em relação à base e a inclinação da encosta é íngreme, ocorrendo o rolamento e o salto (Queiroz, 2016).

### 3.1.5 Critério de ruptura Mohr-Coulomb

De acordo com Fiori (2015), o critério de Mohr-Coulomb representa as condições críticas de combinações de esforços de tensão cisalhante e normal, representada por uma reta envelope tangenciando o círculo de Mohr, como observado na figura 12.

Figura 12: Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.



Fonte: Fiori (2015).

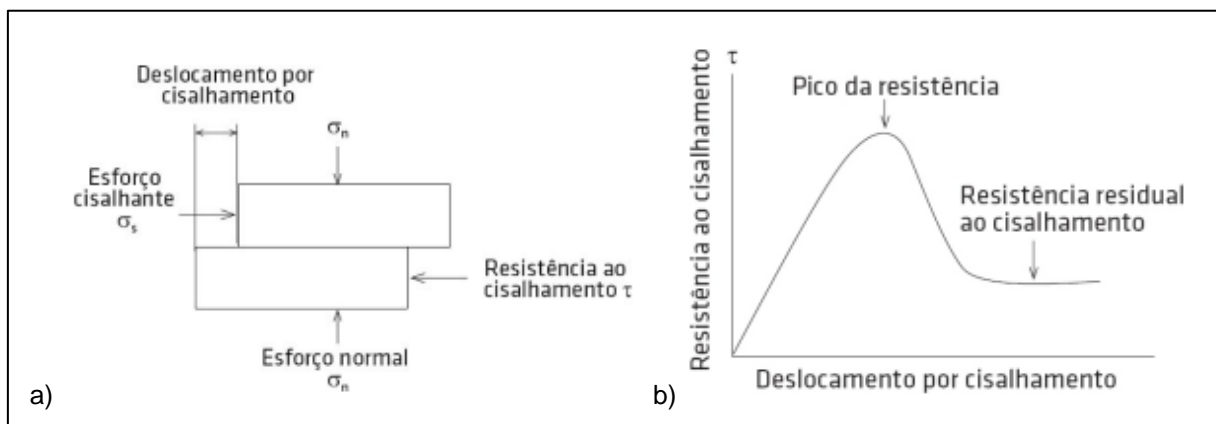
Para se chegar nesta reta é utilizada a equação abaixo:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (3)$$

Onde  $\tau$  equivale ao pico de esforço cisalhante,  $\phi$  o ângulo de atrito entre duas superfícies,  $c$  a coesão e  $\sigma_n$  a componente do esforço perpendicular ao plano de ruptura.

O critério de Mohr-Coulomb também é utilizado para representar o mínimo esforço que o material oferece após a máxima deformação, como ilustra a figura 13a, também chamado de resistência residual, que Fiori (2015) apresenta sendo uma amostra ao ser submetida a um esforço, este esforço então se subdivide em duas componentes, uma perpendicular ao esforço (esforço normal)  $\sigma_n$ , e outra paralela ao plano (esforço cisalhante), sendo responsável pelo deslocamento da rocha.

Figura 13: a) Componentes normais e de cisalhamento do esforço e deslocamento ao longo do plano de acamamento da amostra; b) Pico da resistência cisalhante e resistência cisalhante residual



Fonte: Fiori (2015).

Como observado na Figura 13b, a resistência ao esforço cisalhante aumenta rapidamente, até atingir o pico da resistência - quando ocorre a ruptura do material - e as duas porções da amostra se deslocam. Continuando-se com o experimento, à medida que o deslocamento das duas porções continua o esforço cisalhante que precisa para a movimentação, diminui, onde mantém-se constante, mesmo para um grande deslocamento, este patamar representa a resistência ao esforço residual (Fiori, 2015).

De acordo com Barton (1974), o controle mineralógico da resistência ao cisalhamento é parcialmente determinado pela fração de argila presente no preenchimento de descontinuidades. Barton (1974) afirma que, à medida que a fração de argila aumenta, a resistência ao cisalhamento é influenciada pelos minerais argilosos presentes. Com base nessa premissa, em seu trabalho foi elaborada a Tabela 2 que apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito para diferentes tipos de rochas, considerando suas variadas características.

Tabela 2 - Resistência ao cisalhamento de descontinuidades preenchidas e materiais de preenchimento.

Rock	Description	Peak $c'$ (MPa)	Peak $\phi^\circ$	Residual $c'$ (MPa)	Residual $\phi^\circ$
Basalt	Clayey basaltic breccia, wide variation from clay to basalt content	0.24	42		
Bentonite	Bentonite seam in chalk Thin layers Triaxial tests	0.015 0.09-0.12 0.06-0.1	7.5 12-17 9-13		
Bentonitic shale	Triaxial tests Direct shear tests	0-0.27	8.5-29	0.03	8.5
Clays	Over-consolidated, slips, joints and minor shears	0-0.18	12-18.5	0-0.003	10.5-16
Clay shale	Triaxial tests Stratification surfaces	0.06	32	0	19-25
Coal measure rocks	Clay mylonite seams, 10 to 25 mm	0.012	16	0	11-11.5
Dolomite	Altered shale bed, $\pm$ 150 mm thick	0.04	1(5)	0.02	17
Diorite, granodiorite and porphyry	Clay gouge (2% clay, PI = 17%)	0	26.5		
Granite	Clay filled faults Sandy loam fault filling Tectonic shear zone, schistose and broken granites, disintegrated rock and gouge	0-0.1 0.05 0.24	24-45 40 42		
Greywacke	1-2 mm clay in bedding planes			0	21
Limestone	6 mm clay layer 10-20 mm clay fillings <1 mm clay filling	0.1 0.05-0.2	13-14 17-21	0	13
Limestone, marl and lignite	Interbedded lignite layers Lignite/marl contact	0.08 0.1	38 10		
Limestone	Marlaceous joints, 20 mm thick	0	25	0	15-24
Lignite	Layer between lignite and clay	0.014-.03	15-17.5		
Montmorillonite Bentonite clay	80 mm seams of bentonite (montmorillonite) clay in chalk	0.36 0.016-.02	14 7.5-11.5	0.08	11
Schists, quartzites and siliceous schists	100-15- mm thick clay filling Stratification with thin clay Stratification with thick clay	0.03-0.08 0.61-0.74 0.38	32 41 31		
Slates	Finely laminated and altered	0.05	33		
Quartz / kaolin / pyrolusite	Remoulded triaxial tests	0.042-.09	36-38		

Fonte: Barton (1974).

### 3.1.6 Teoria do fator de segurança

O fator de segurança quantificado pelo limite de equilíbrio da encosta, é um dos métodos mais utilizados para projeto de encostas e há ampla experiência em suas aplicações para todos os tipos de condições geológicas, tanto para solos quanto para rochas, sendo considerado estável se  $FS > 1$  (Wyllie & Mah, 2004).

Na tabela 2, os valores dos fatores de segurança máximos e mínimos correspondem a cargas usuais e condições de serviço, e cargas máximas e às piores condições geológicas esperadas.

Tabela 3: Valores dos fatores de segurança totais mínimos.

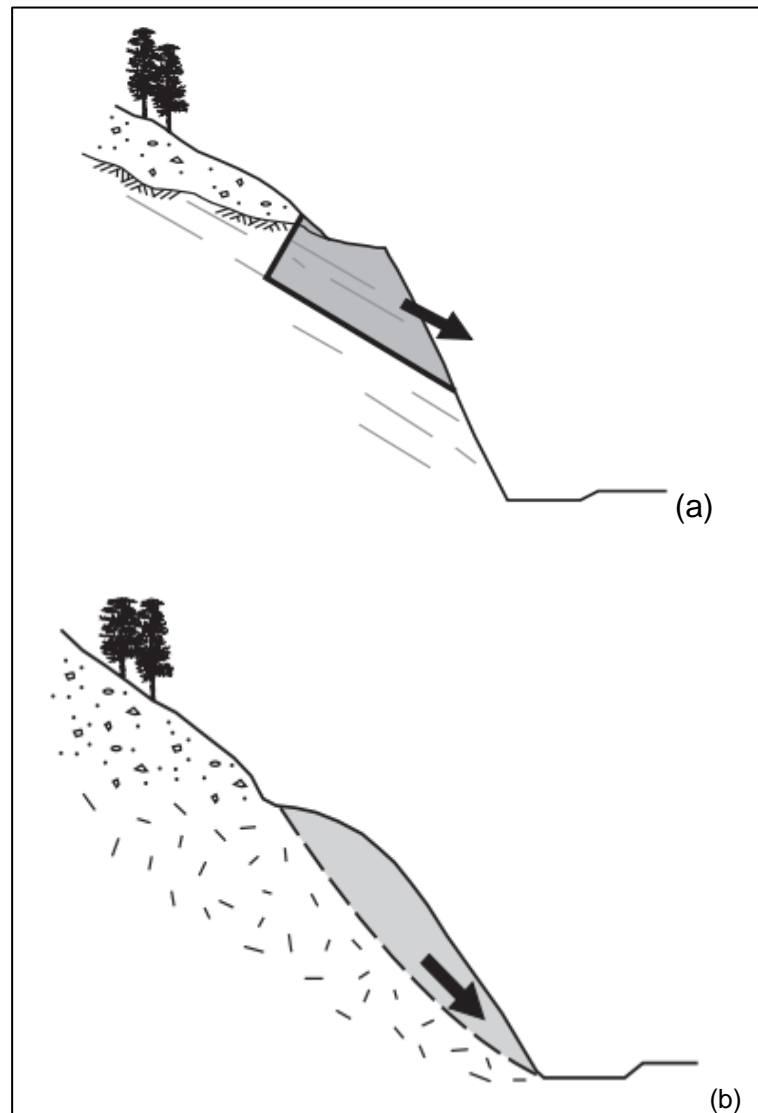
Tipo de Falha	Categoria	Fator de Segurança
Escorregamento	Escorregamento de terra	1,3-1,5
	Manuseio de terra escavações, estruturas	1,5-2,0
	Fundações	2-3

Fonte: Modificado de Wyllie & Mah (2004).

De acordo com Wyllie & Mah (2004), a determinação do fator de segurança real deve ser apropriada a cada local e requer uma variedade de fatores geológicos a serem considerados. Algumas condições locais como: ausência de afloramento, inexistência de histórico das condições de estabilidade local, incerteza no mecanismo de ruptura da encosta, dificuldade em obter amostras inalteradas para testes de resistência ou extrapolar os resultados de testes de laboratório para condições *in situ*, devem usar o fator de segurança máximo das faixas citadas na tabela 2.

A estabilidade de taludes rochosos para as condições mostradas da figura 14, dependem da resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de deslizamento. Para todas as falhas de cisalhamento, pode-se utilizar o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, no qual a resistência ao cisalhamento é expressa em termos de coesão  $c$  e ângulo de atrito  $\phi$ . (Wyllie & Mah, 2004.)

Figura 14 - Influência das condições geológicas na estabilidade de taludes rochosos: (a) potencial ruptura planar; (b) potencial ruptura em cunha em rochas fracas e densamente fraturadas.



Fonte: Wyllie & Mah (2204).

Wyllie e Mah (2004), apontam que para calcular o fator de segurança de um bloco como mostrado na figura 15, primeiro é necessário desmembrar a força atuante na superfície de deslizamento em componente perpendicular e paralela a essa superfície. Para isso utiliza-se as equações abaixo:

$$\sigma = \frac{W \cos \psi_p}{A} \quad (4)$$



$$\tau_s = \frac{W \sin \psi_p}{A} \quad (5)$$

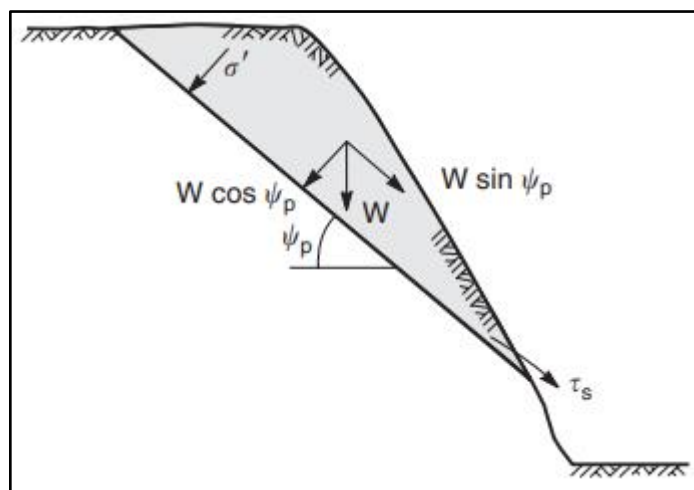
$$\tau = c + \frac{W \cos \psi_p \tan \phi}{A} \quad (6)$$

E então a estabilidade do bloco pode ser calculada pela razão entre as forças resistentes e impulsoras através das equações a seguir:

$$FS = \frac{\text{força resisitiva}}{\text{força impulsoras}} \quad (7)$$

$$FS = \frac{cA + W \cos \psi_p \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (8)$$

Figura 15: Desmembramento da força W (peso do bloco) em componentes paralelas e perpendiculares ao plano de deslizamento (mergulho  $\psi_p$ ).

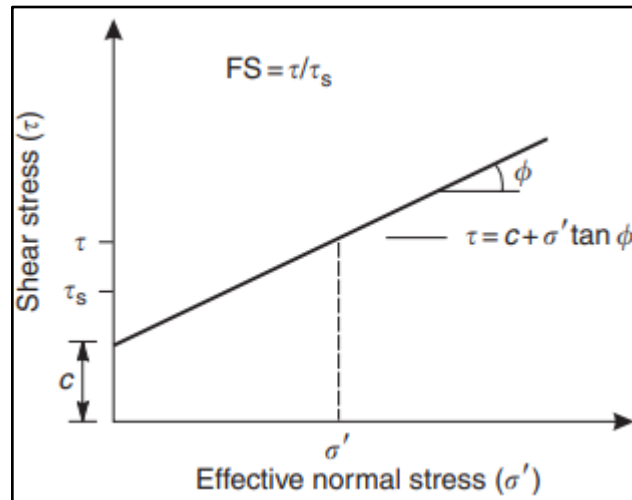


Fonte: Wyllie & Mah (2004).

Na Figura 16, são traçados os valores de tensão de cisalhamento que deslocam ( $\tau_s$ ) e os valores de tensão de cisalhamento resistente ( $\tau$ ), conforme definido pela equação de Mohr-Coulomb, e mostra que o estresse de resistência excede o

estresse de deslocamento, então o fator de segurança é maior do que um e a inclinação é estável.

Figura 16: Diagrama de Mohr mostrando a tensão de cisalhamento definida pela coesão e ângulo de fricção  $\phi$ .



Fonte: Wyllie & Mah (2004).

Conforme Wyllie & Mah (2004), se a superfície de deslizamento estiver limpa e sem preenchimento, então pode-se considerar a coesão igual a zero, então a equação do fator de segurança será:

$$FS = \frac{\cos \psi_p \cdot \tan \phi}{\sin \psi_p} \quad (9)$$

$$FS = 1 \text{ quando } \psi_p = \phi \quad (10)$$

Estas equações mostram que para uma superfície limpa, seca e sem nenhum tipo de ancoragem instalado, o bloco deslizará quando o ângulo de inclinação na superfície de deslizamento for o mesmo do ângulo de atrito desta superfície. Wyllie & Mah (2004) então afirmam que o tamanho do bloco não importa, pois, o mesmo está

em uma condição de “equilíbrio limite” quando as forças impulsoras são exatamente iguais as forças de resistência e o fator de segurança é igual a 1.

### **3.1.7 Softwares para criação do modelo 3D**

Para a realização deste trabalho, serão empregados *softwares* para a criação do modelo 3D a ser trabalhado, os quais incluem:

- RenderDoc, um depurador gráfico utilizado para capturar a imagem do Google Earth;
- Google Earth, onde será obtida a imagem de satélite em 3D da área de estudo;
- Blender, será utilizado para importar o modelo obtido no Google Earth e exportar no tipo de arquivo .fbx;
- O *software* Micromine, que é um programa que possui ferramentas para a análise e modelagem de dados geológicos, inclusive a partir dos modelos 3D anteriormente produzidos;

### **3.1.8 Softwares de análise de estabilidade**

Para analisar a estabilidade do maciço e as características da ruptura, caso ocorra, serão utilizados os *softwares*:

- RocSlope da empresa RocScience, para definir os planos de descontinuidades e blocos rochosos em modelos 3D e analisar estabilidade de taludes rochosos. Trata-se de um software comercial;
- Trajec3d da empresa Basrock, onde será analisado a queda de blocos rochosos e simular a trajetória durante a queda livre, saltos, deslizamento e rolagem. Trata-se de um software freeware;

### 3.2 Trabalhos anteriores aplicados

Na região de estudo, existem alguns trabalhos feitos com o objetivo de delimitar áreas de risco geológico, como o feito pelo Serviço Geológico do Brasil (2012), que visou delimitar áreas de alto e muito alto risco de enchentes e movimentos de massa. Em 2020 a prefeitura municipal de Vila Velha fez o Plano Municipal de Redução de Risco, onde foi delimitado setores de risco de rolamento de blocos e deslizamento translacional raso, como mostrado no mapa da figura 17.

Figura 17 - Mapa de risco setorizado do Bairro São Torquato / Morro Boa Vista



Fonte: PMRR (2020).

Em 2017, Cunha *et al.* Analisou a metodologia das obras emergenciais (Figura 18) que foram executadas nas rochas das regiões afetadas pelo deslocamento do bloco em 2016, portanto é possível saber quais setores foram contemplados pelas obras de contenção e mitigação de danos geológicos.

Figura 18 - Obras de contenção de bloco rochoso sendo executado.



Fonte: Cunha *et al.* (2017).

O método a ser empregado no trabalho possui antecedentes em algumas regiões do Brasil, Pasetto (2018) investigou o uso de técnicas de aerofotogrametria com VANT e Modelos Virtuais de Afloramento (MVAs) para desenvolver um modelo geológico tridimensional na indústria de mineração de mármore em Caçapava do Sul. O estudo destacou a metodologia como eficaz e rápida, além de ser economicamente vantajosa devido aos baixos custos operacionais.

O trabalho de Vargas (2022) que visou analisar a estabilidade de taludes rochosos em corte de estrada na BR-392 (Rio Grande do Sul) utilizando modelo tridimensional através de dados obtidos por VANT. O trabalho mostrou que a metodologia foi eficaz em questões logísticas e demonstrou vantagem em situações em que o acesso físico é limitado ou impraticável, sendo possível tirar conclusões acerca da estabilidade do talude rochoso.

Com relação a encosta do Morro da Boa Vista, não existem precedentes da utilização de modelo virtual de afloramento para a análise de estabilidade do maciço rochoso.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

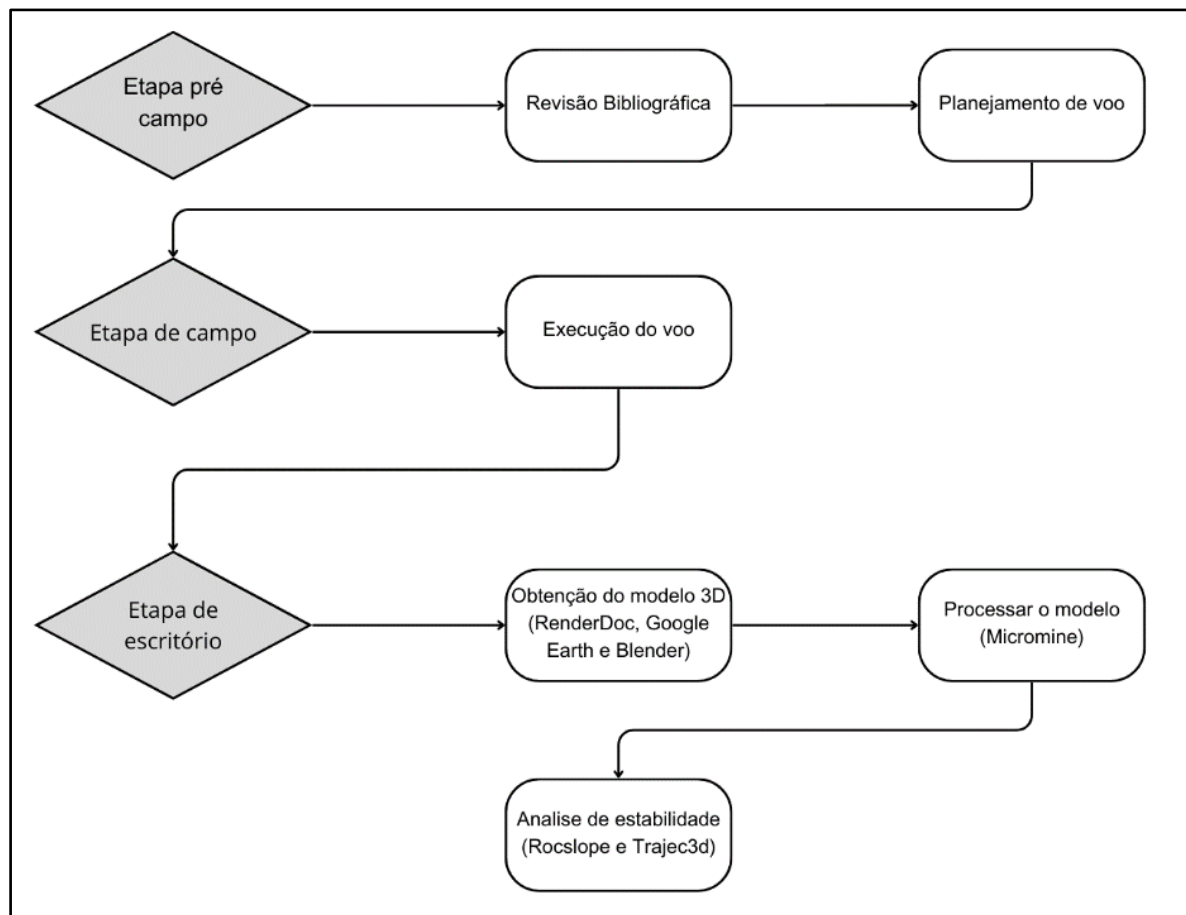
O desenvolvimento deste trabalho se divide em 4 etapas como mostrado no fluxograma da figura 19, a primeira etapa consiste em revisão bibliográfica e campo, a segunda etapa foi gerada o modelo 3D do afloramento, georreferenciado e melhorada a malha de triangulação para que as próximas etapas pudessem ser feitas, a terceira etapa consistiu em obter informações sobre os blocos, como volume e planos de descontinuidade, e a última etapa foi calculado o fator de segurança e simulado a trajetória dos blocos em um possível rompimento.

Na segunda etapa foi utilizado o software RenderDoc para capturar a imagem do Google Earth através do navegador Google Chrome. Após foi utilizado o software Blender para importar o modelo obtido e exportar no formato em que pudesse ser executado pelo software Micromine e então georreferenciar o modelo e corrigir erros na malha de triangulação.

A terceira etapa ainda no software Micromine foi o mapeamento dos planos de descontinuidades e por consequência a identificação dos blocos para análises posteriores. Dessa forma foi obtido o volume dos blocos formados e as orientações das principais descontinuidades bem como suas localizações.

Por fim, na última etapa foi utilizado o software RocSlope para definir o fator de segurança dos blocos e o software Trajec3d para simular a trajetória dos blocos em um possível rompimento.

Figura 19: Fluxograma de planejamento e execução da metodologia aplicada.



Fonte: Autor.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos após a execução da metodologia descrita.

### 5.1 Resultados da observação de campo

Na visita de campo foi realizado um voo de VANT, com o acompanhamento e intermédio da Defesa Civil Municipal para maior segurança. O plano de voo foi efetuado e foram obtidas imagens do maciço (Figura 20 “a” e “b”), porém, na porção superior do maciço não foi possível sobrevoar, pois o espaço aéreo é bloqueado por conta da rampa de descida do aeroporto de Vitória.

Figura 20 - Imagens obtidas pelo levantamento feito com o drone. a) vertente do maciço com alta inclinação; b) bloco que deslizou em 2016.



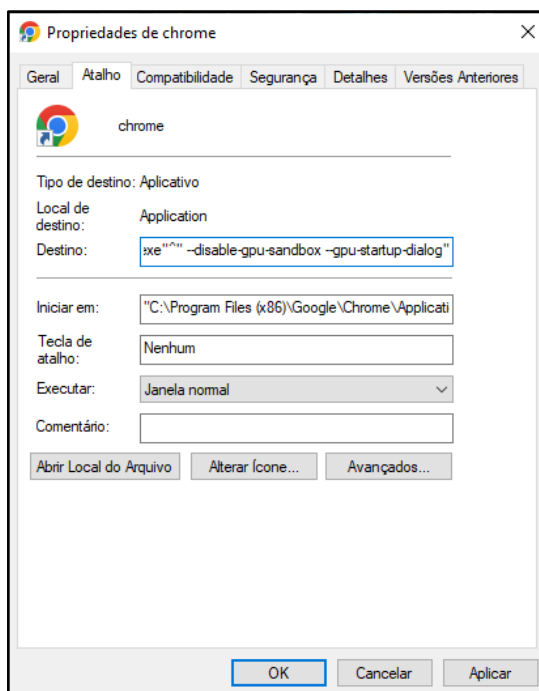
Fonte: Autor.

### 5.2 Obtenção do modelo 3D

A obtenção do modelo passou por duas etapas principais. Inicialmente, no Google Chrome, as propriedades foram ajustadas conforme mostrado na Figura 21, utilizando códigos específicos relacionados a renderização 3D, e de forma a preparar a obtenção do modelo na próxima etapa.



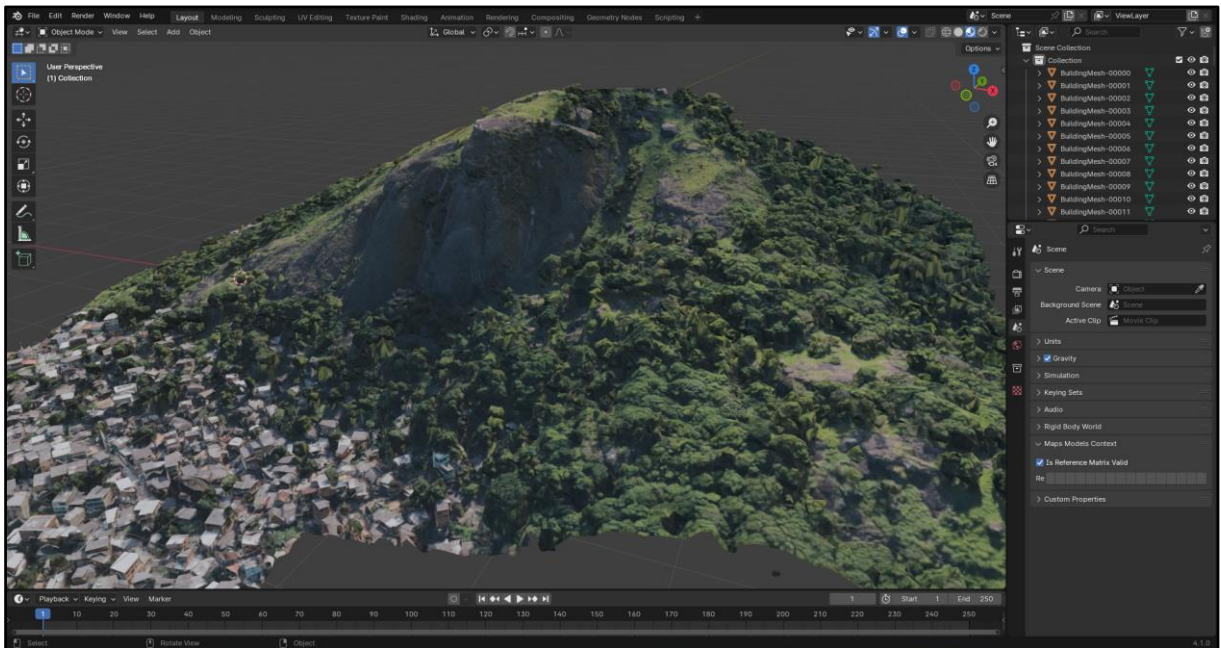
Figura 21 – Inserção de códigos no "Destino" do atalho do software Google Chrome para permitir a renderização e obtenção correta do modelo do Google Earth.



Fonte: Autor.

Após os ajustes necessários, utilizou-se o *software* RenderDoc para *download* do arquivo do modelo 3D da área de estudo, como mostrado na Figura 22. Em seguida, o *software* Blender foi empregado para exportar o arquivo no formato .fbx, uma vez que a captura obtida através do RenderDoc estava em formato .rdc, tornando essencial a utilização do Blender nesta etapa. Esse procedimento permitiu a posterior importação do arquivo do modelo 3D no *software* Micromine para processamentos adicionais.

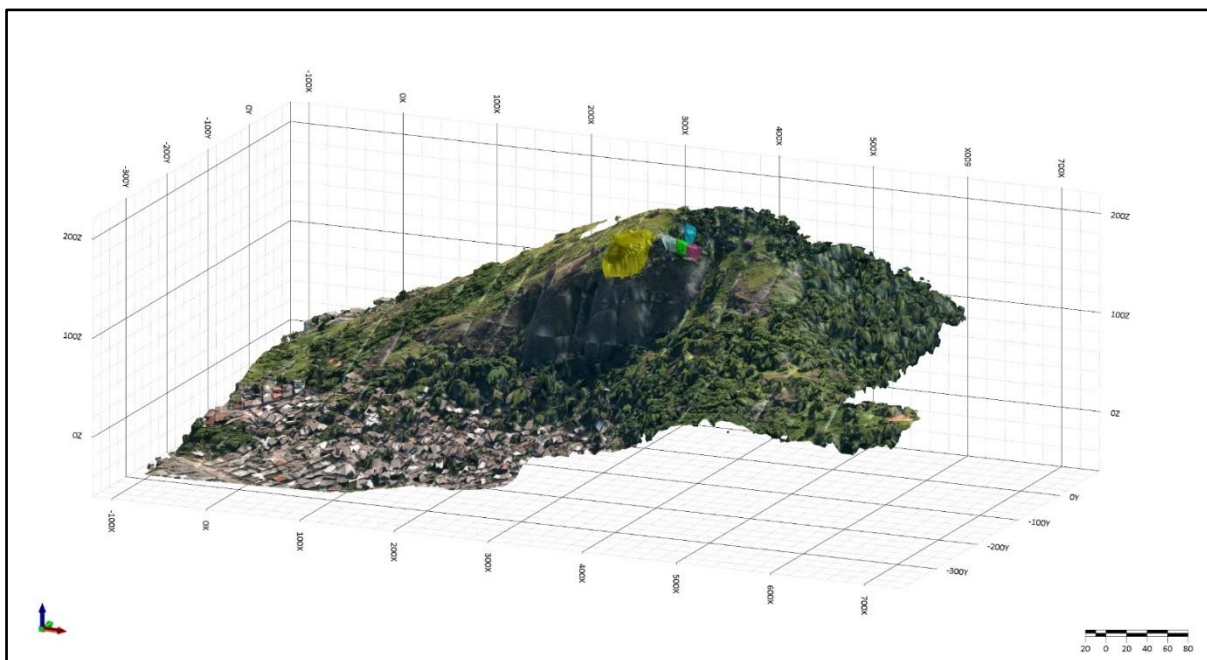
Figura 22 - Imagem do software Blender com o modelo obtido através do Google Earth.



Fonte: Autor.

Já no *software* Micromine o primeiro passo foi ajustar a escala e georreferenciar o modelo. Foi necessário rotacionar o modelo para orientá-lo corretamente em relação ao norte e mover todo o modelo através de pontos conhecidos. Após estes ajustes, foi analisada a malha de triangulação e corrigida todas as falhas no modelo, utilizando as ferramentas de limpeza e reparação do Micromine.

Figura 23 - Vista do modelo no Micromine com os blocos rochosos em evidência.



Fonte: Autor.

Também foi necessário a utilização da ferramenta de suavização de malha em algumas áreas para posterior importação do modelo nos *softwares* de análise de estabilidade e de queda. O volume dos blocos rochosos de interesse foi calculado e as informações dos planos das principais discontinuidades do maciço foram medidos com as ferramentas de planos do Micromine. Os planos medidos são mostrados na Tabela 4, abaixo.

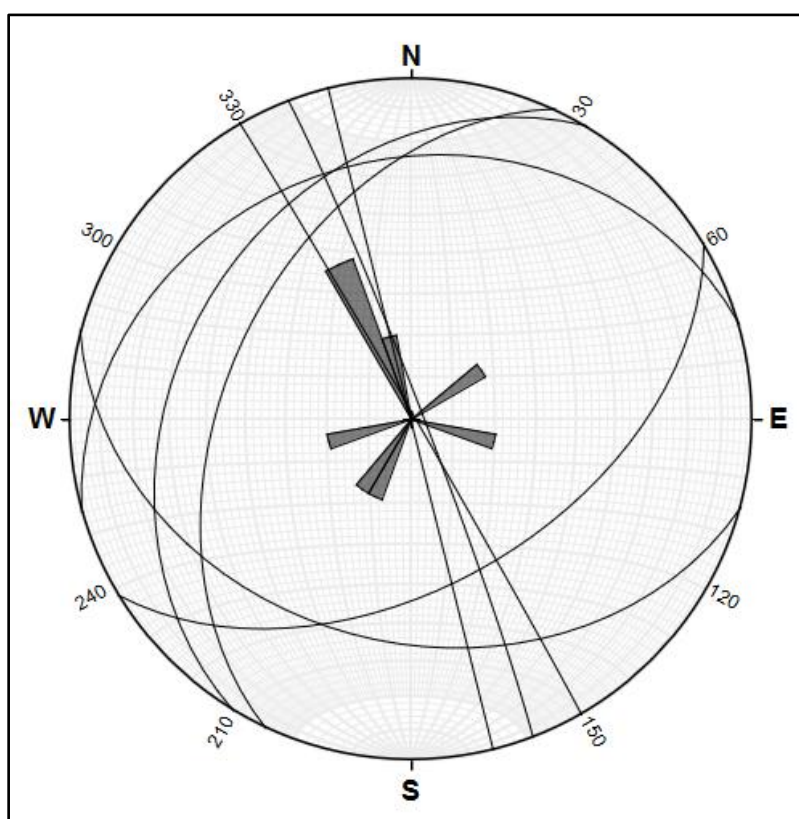
Tabela 4 - Descontinuidades medidas.

<b>Descontinuidade</b>	<b>Dip</b>	<b>Dip direction</b>
<b>01</b>	25	254
<b>02</b>	89	330
<b>03</b>	87	339
<b>04</b>	45	205
<b>05</b>	50	59
<b>06</b>	90	346
<b>07</b>	35	105
<b>08</b>	32	211

As informações sobre as discontinuidades foram plotadas em estereograma e diagrama de rosetas. Conforme se observa há uma maior concentração de planos de

descontinuidades com direção de mergulho NO, seguido de planos verticalizados (Figura 23).

Figura 24 - Estereograma com o diagrama de rosetas das descontinuidades encontradas.

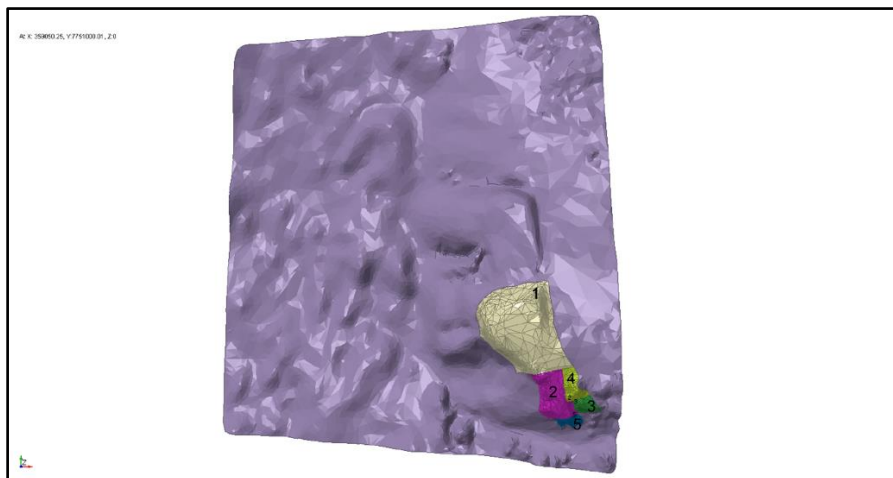


Fonte: Autor.

### 5.3 Análise do fator de segurança

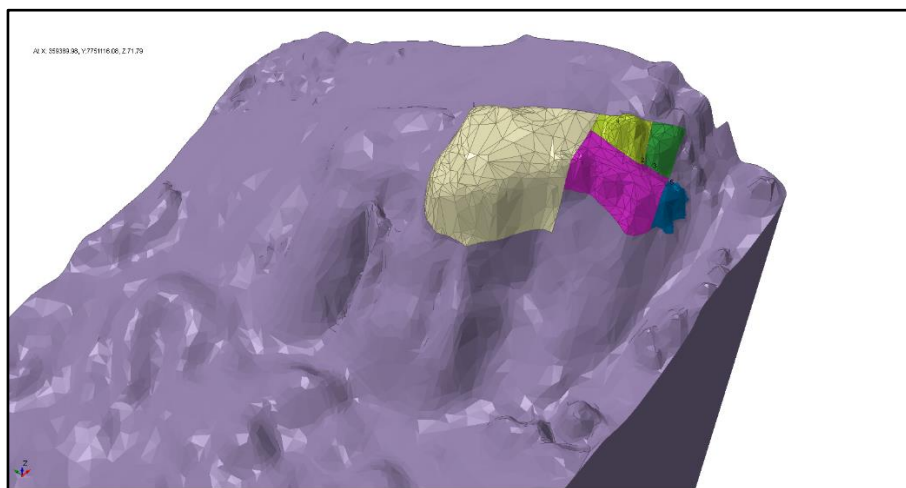
Para a análise do fator de segurança, foi realizada a importação do modelo 3D no *software* RocSlope juntamente com as descontinuidades obtidas através do Micromine. Dessa forma, com a intersecção dos planos destas descontinuidades, foram produzidos 5 blocos rochosos com diferentes tamanhos (Tabela 6) conforme mostra as Figuras 24 e 25. O bloco número 5, em cor azul é o bloco o qual sofreu ruptura e queda no ano de 2016.

Figura 25 - Vista em planta do modelo 3D no software RocSlope com os cinco blocos discretizados.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Vista para nordeste do modelo 3D no software RocSlope com os cinco blocos discretizados.



Fonte: Autor.

Foram atribuídas propriedades de resistência de coesão e ângulo de atrito, para as descontinuidades do maciço como mostra a Tabela 5. Estes valores foram baseados na tabela de resistência de descontinuidades publicada por Barton (1974). Estes parâmetros de resistência, juntamente com a pressão de água no maciço foram calibrados utilizando-se o bloco 5 como referência, ou seja, os parâmetros foram variados até que o fator de segurança do bloco 5 fosse levemente inferior a 1

(indicando ruptura), de forma a simular a condição real para os outros blocos ainda existentes.

Tabela 5 - Parâmetros de resistência para descontinuidades – Critério de Mohr-Coloumb

<b>Parâmetros de resistência para descontinuidades – Critério de Mohr-Coloumb</b>	
<b>Coesão (MPa)</b>	0.025
<b>Ângulo de atrito (°)</b>	35

Tabela 6 - Dimensões dos blocos e fator de segurança analisado para situação em que esteja seco e com presença de água.

<b>Bloco</b>	<b>Volume (m3)</b>	<b>Peso (ton)</b>	<b>FS seco</b>	<b>FS água</b>
<b>1</b>	41.614	112.357	1,79	1,68
<b>2</b>	4.153	11.544	2,61	2,29
<b>3</b>	1.682	4.675	100	100
<b>4</b>	2.210	6.143	100	100
<b>5</b>	331	921	1,41	0,99

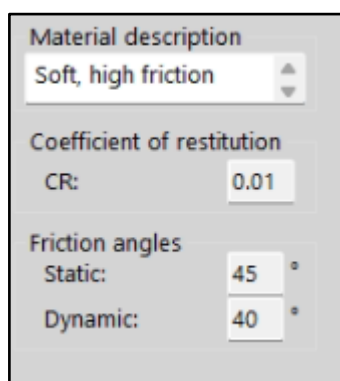
É interessante ressaltar que o bloco 2 foi contemplado com obra emergencial visando sua estabilização no ano de 2016. Conseqüentemente, os blocos 3 e 4 só podem se movimentar caso o bloco 2 os libere. Portanto, o principal interesse é observar o fator de segurança do bloco 1, principalmente dada sua grande dimensão e possíveis riscos. Observa-se que o FS mesmo na pior condição saturada apresenta fator de segurança próximo a 1,7 o que nos permite dizer dadas as condições analisadas de simplificação e suavização do modelo, de que encontra-se em situação de estabilidade.

#### 5.4 Simulação da trajetória após rompimento

Ainda que tenha sido verificada uma situação de estabilidade para o bloco 1, pode se realizar uma análise de trajetória de movimento em caso de ruptura, mesmo que de blocos menores que possam vir a desprender-se do bloco 1. No *software* Trajec3d foram considerados nesta análise blocos de 500 ton, 1000 ton e 5000 ton, de formato retangular achatado, simulando a trajetória e velocidades de blocos em caso de movimentação (Figuras 28 e 29). Foi removido o bloco 1 da superfície do modelo 3D para que a simulação partisse do mesmo plano de descontinuidade em que o bloco está assentado, como mostrado na figura 27.

Utilizou-se os parâmetros indicados na figura 26. Na descrição do material foi definido um material macio e de alta fricção. O coeficiente de restituição (CR), que representa a relação entre as velocidades antes e depois do impacto, foi escolhido em 0,01. Um CR de 1 indica uma colisão perfeitamente elástica sem perda de velocidade e, portanto, sem perda de energia. Um valor de CR igual a 0 implica uma colisão perfeitamente plástica onde toda a velocidade ao longo da linha de impacto é absorvida. O ângulo de fricção ficou 45° para o estático e 40° o dinâmico.

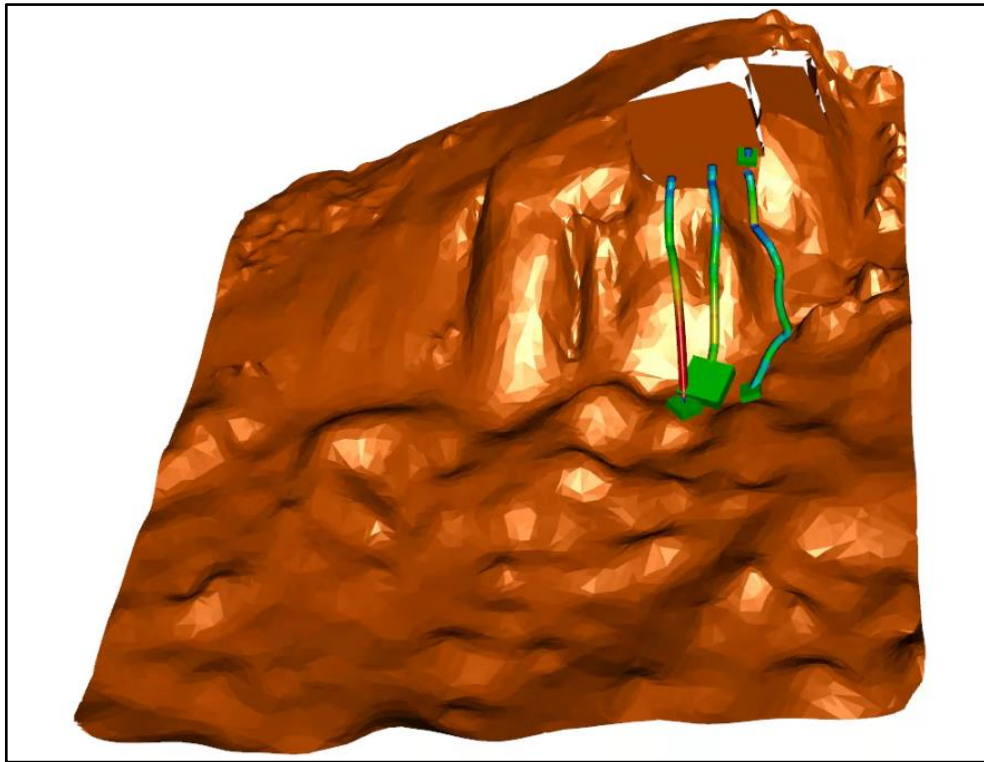
Figura 27 - Parâmetros utilizados no *software* Trajec3d para configurar as características do rompimento do bloco.



Fonte: Autor.



Figura 28 - Modelo 3D realizado no *software* Trajec3d sem textura com a trajetória do deslocamento de três blocos rochosos a partir da posição do Bloco 1.

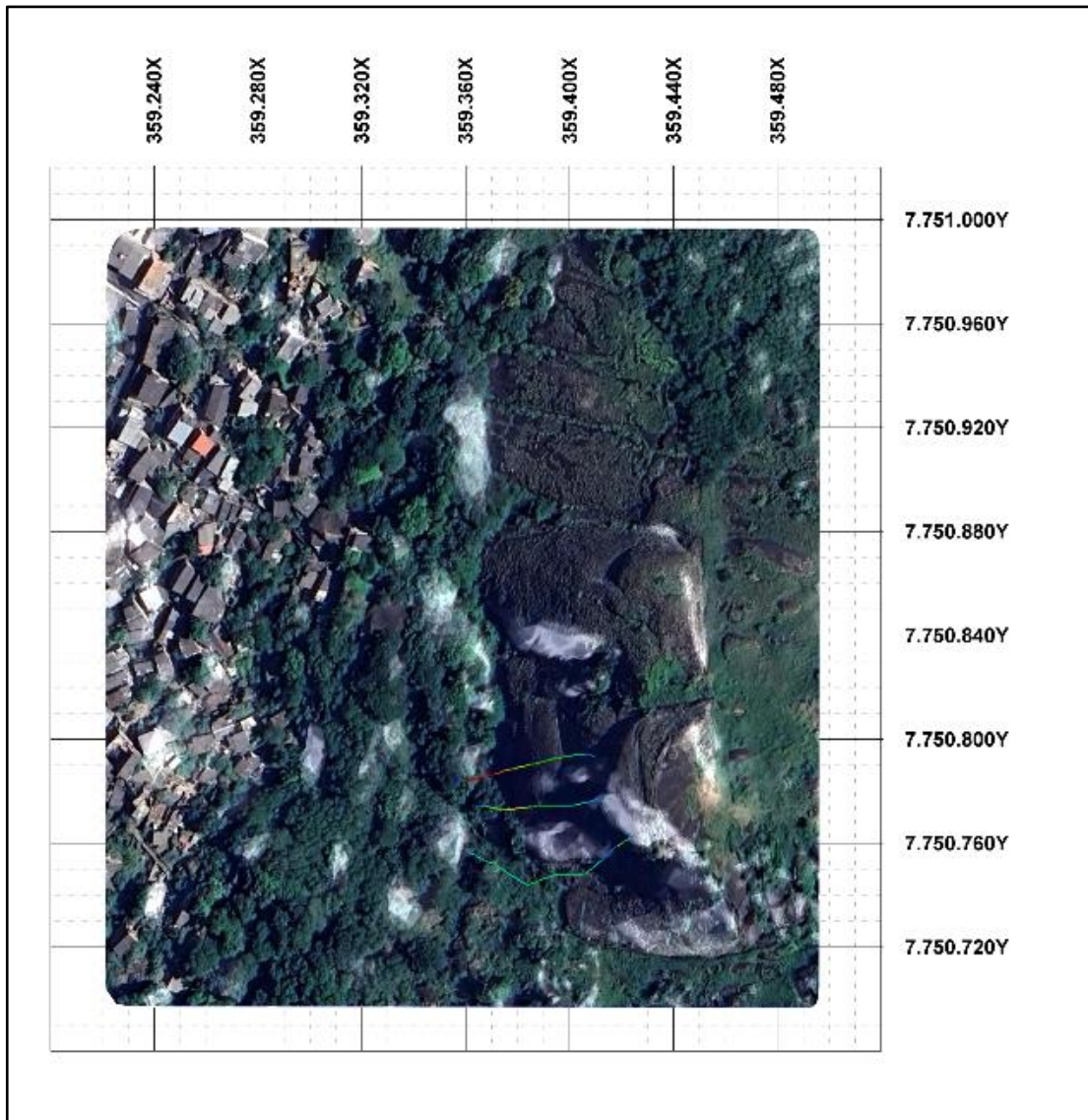


Fonte: Autor.

Foi utilizado diferentes tamanhos de blocos para representar o rompimento de fragmentos do bloco 1.

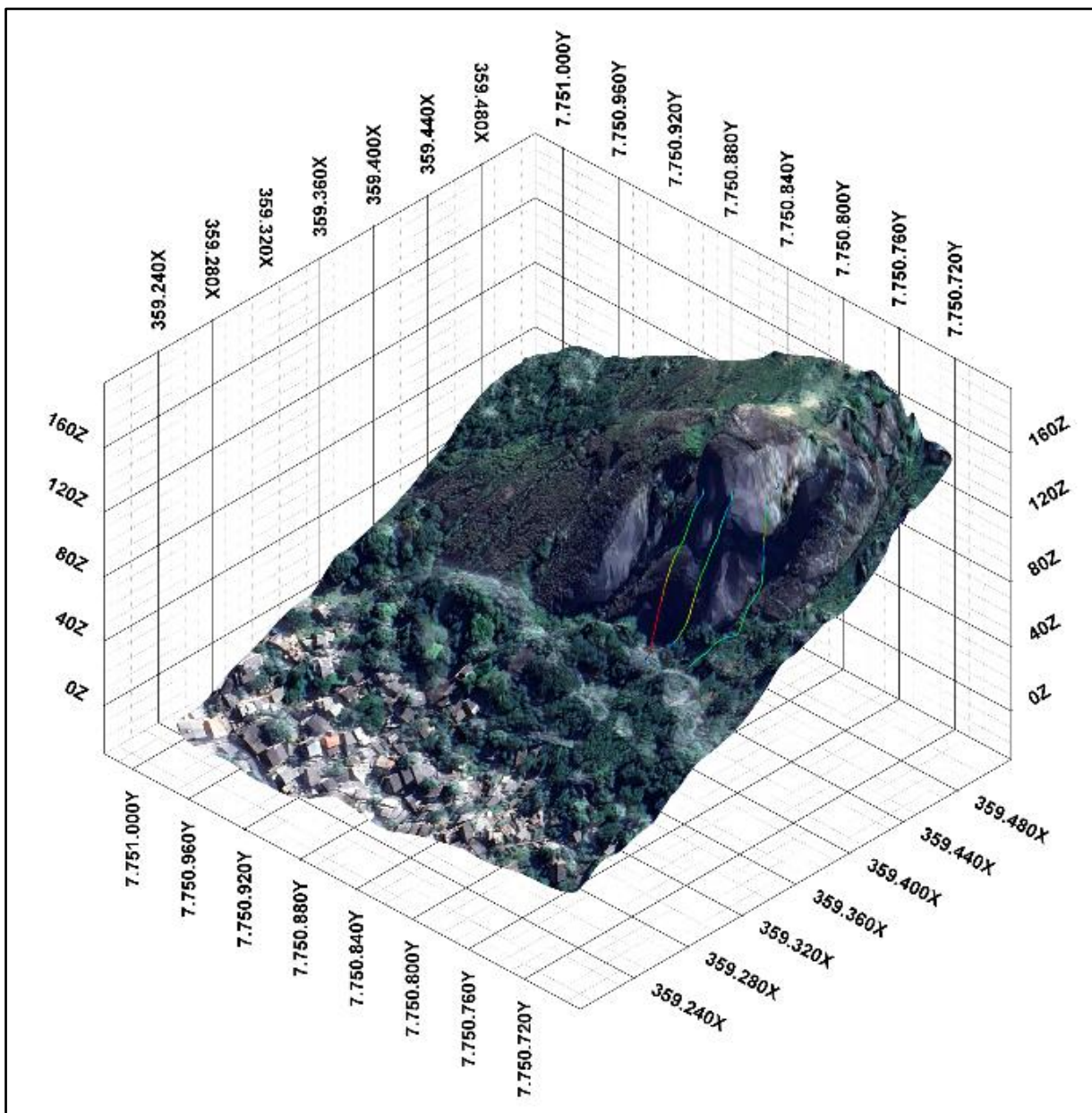


Figura 29 - Vista em planta com a possível trajetória dos blocos em caso de queda.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Vista isométrica para nordeste com a possível trajetória dos blocos em caso de queda.

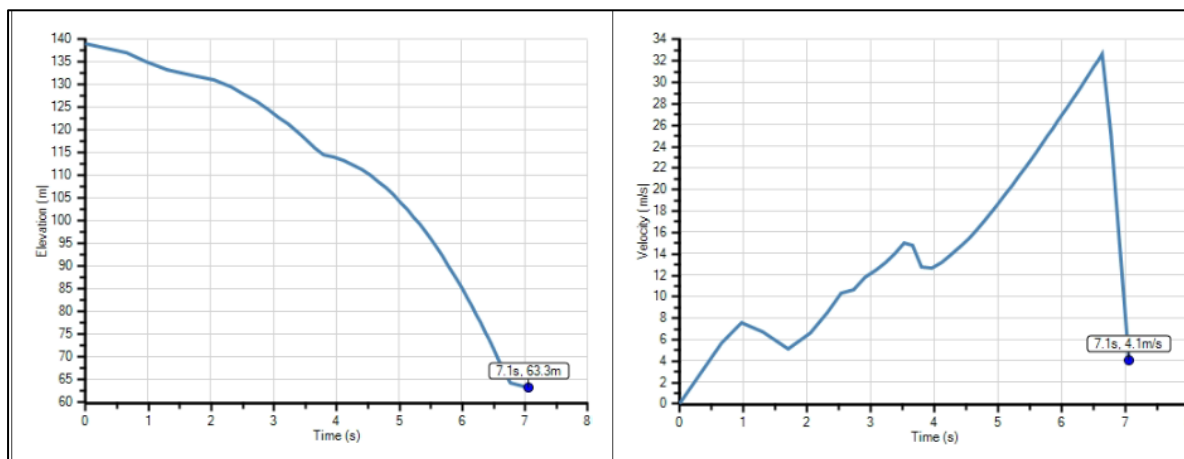


Fonte: Autor.

Mostrando da esquerda para a direita, os gráficos de elevação e velocidade da trajetória do bloco rochoso da esquerda, de 1000 ton, indicam que toda a queda dura cerca de 7,1 segundos, com uma descida de aproximadamente 77 metros de altura até parar (Figura 30 a). Durante a queda, a energia potencial gravitacional do bloco é gradualmente convertida em energia cinética, com a velocidade do bloco atingindo um pico de cerca de 32 m/s por volta dos 6,5 segundos. No entanto, o bloco sofre várias desacelerações notáveis ao longo de sua trajetória, refletidas por quedas bruscas na

velocidade ao atingir obstáculos no caminho, onde parte da energia cinética é dissipada (Figura 30 b).

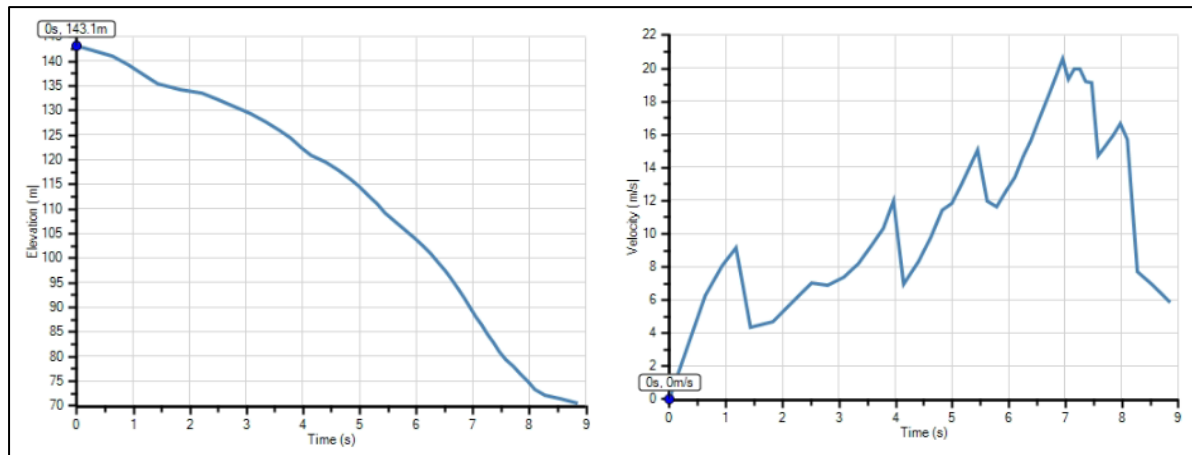
Figura 31 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo.



Fonte: Autor.

O bloco do meio, de 5000 ton, teve um tempo de queda de cerca de 9 segundos, partindo de uma altura inicial de aproximadamente 140 metros para cerca de 73 metros (Figura 31 a). Durante a queda, a energia potencial gravitacional do bloco foi gradualmente convertida em energia cinética. A velocidade da trajetória, no entanto, oscilou devido aos impactos com obstáculos, que absorveram parte da energia cinética, resultando em variações na velocidade, como mostrado no gráfico da Figura 31 b. Esses impactos impediram que a energia cinética aumentasse de forma contínua, apesar da conversão constante da energia potencial. A velocidade máxima de queda alcançada foi de cerca de 21 m/s, com flutuações significativas ao longo do trajeto devido à dissipação nos impactos.

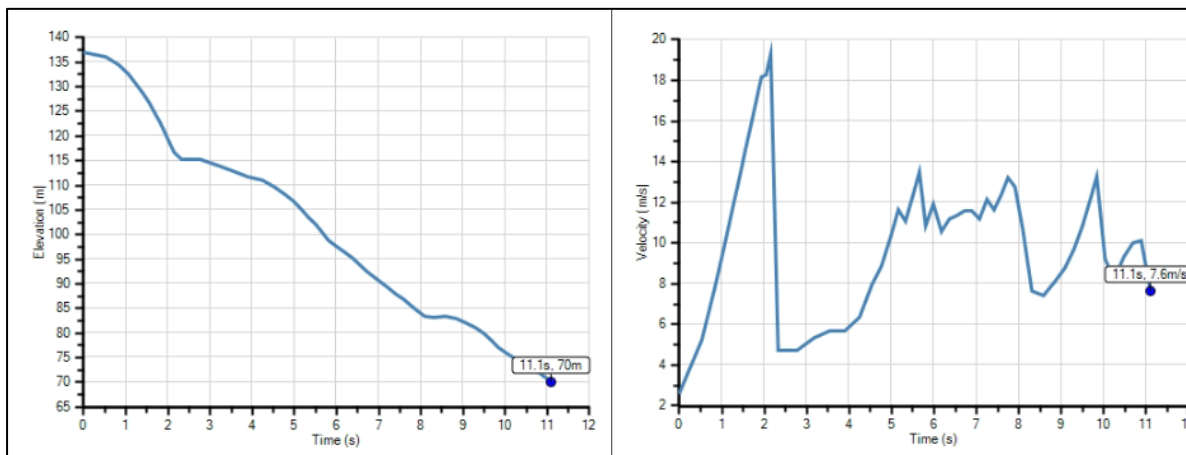
Figura 32 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo.



Fonte: Autor.

Por fim, o bloco da direita, de 500 ton, tomou uma trajetória em que seu tempo de queda foi de 11 segundos e uma altura de aproximadamente 68 metros (Figura 32 a). Inicialmente, o bloco possuía alta energia potencial devido à sua altura. Ao iniciar a queda, essa energia potencial foi convertida rapidamente em energia cinética, resultando em uma alta aceleração que atingiu um pico de velocidade próximo de 20 m/s nos primeiros 2 segundos, como mostrado no gráfico de velocidade. No entanto, a trajetória foi interrompida ao atingir um obstáculo, que causou uma significativa desaceleração quase completa. A partir desse ponto, o bloco continuou a se mover, atingindo sucessivos obstáculos que dissiparam a energia cinética e impediram que ele alcançasse novamente grandes velocidades, como evidenciado pela variação irregular de velocidade no gráfico da Figura 32 b.

Figura 33 - Gráficos de a) elevação e b) velocidade pelo tempo.



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

A utilização de modelos virtuais de afloramentos, derivados de ferramentas gratuitas como as do Google Earth, mostrou-se satisfatória para a análise de características físicas de interesse, apesar da baixa resolução se comparado a levantamentos obtidos por VANT. Foram medidos os volumes dos blocos de interesse, incluindo aquele que já se deslocou e outros quatro blocos ao redor. Os blocos apresentaram volumes expressivos, especialmente o bloco de maior interesse no estudo, o Bloco 1, que apresentou um volume de aproximadamente 41,6 mil m<sup>3</sup> e um peso de aproximadamente 112 mil toneladas.

Foi realizada a calibração das propriedades de resistência para o modelo, seguindo o Fator de Segurança (FS) do Bloco 5, que já havia se deslocado, até atingir um valor próximo a 1. Com esse ajuste das propriedades, foi possível obter um FS mais próximo do real para o Bloco 1. O Bloco 2 foi alvo de obras emergenciais, portanto, seu fator de segurança é maior do que o calculado pelo RocSlope. Os Blocos 3 e 4 estão apoiados pelo bloco contido pela obra, de modo que seu deslocamento só ocorreria caso o Bloco 2 fosse liberado.

O Bloco 1 apresentou um fator de segurança 1,68, mesmo em situação de grande saturação de descontinuidades, indicando um grau de estabilidade considerado estável. Entretanto, por conta da resolução do modelo e das suavizações feitas no mesmo, este valor pode variar. Apesar da simulação da trajetória de queda dos blocos a partir da posição do Bloco 1 não ter alcançado grandes distâncias, terminando sua queda relativamente longe das casas, a simulação não considera a ativação de outros blocos que poderiam ser desestabilizados pela queda do Bloco 1. O Coeficiente de Restituição (CR) pode interferir na análise da trajetória, dessa forma, deve ser melhor estudado em trabalhos futuros, uma vez que não dispõe-se de valores reais e diferentes valores podem impactar significativamente os resultados. Desta maneira, ainda existe a possibilidade de que em caso de queda de blocos menores na região do Bloco 1 estes possam chegar até as áreas construídas, consideradas áreas de risco conforme dados da própria defesa civil.

Portanto, a utilização de modelos virtuais 3D gratuitos, como Google Earth, em algumas situações pode ser considerada como uma ferramenta alternativa de análise.

Principalmente em contextos em que o uso de VANTs não é possível, contribuindo significativamente para a avaliação de riscos e planejamento de medidas mitigadoras em áreas susceptíveis a deslocamentos de blocos rochosos.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. DE, HASUI, Y., NEVES, B.B.B. & FUCK, R.A. **Províncias estruturais brasileiras**. In: Simpósio Geologia do Nordeste 8, Campina Grande, 1977. Anais do... Recife, Sociedade Brasileira de Geologia, 1977, p. 363-391.

ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. **Brazilian Structural Provinces: an introduction**. Earth Science Review, 1981, 17:1-19.

CELANTE, S.; SATHLER, M. e da SILVA ROSA, T. (2015). **Histórias de vida no resgate da história da ocupação do solo de Vila Velha (ES)**. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SOCIOLOGIA. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Sociologia.

COELHO, F. L. C. T.; BRITO, J. L. N. e S. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 196p. 2007.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Vila Velha – Espírito Santo**. Belo Horizonte, Ministério de Minas e Energia. 2012.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica – Escala 1:100.000 Folha SF - 24B - I Vitória**. 2014.

CUNHA, R. T.; MOREIRA, A. C. M.; MENEGHELI, G. S.; OLIVEIRA, R. M.; BARBOSA, M. C. R. **Métodos de Contenção utilizados em deslizamento de bloco rochoso: Estudo de Caso do Morro Boa Vista, Espírito Santo**. In: Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encostas - Cobrae, 2017, Florianópolis. XII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, 2017.

DA SILVA, Daniel Carneiro *et al.* **QUALIDADE DE ORTOMOSAICOS DE IMAGENS DE VANT PROCESSADOS COM OS SOFTWARES APS, PIX4D E PHOTOSCAN**. 2014. V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife – PE.



DEFESA CIVIL ESTADUAL DO ES. **Laudo de vistoria de levantamento de risco. Vitória, Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo. 2016.**

FARAH, Flavio. Publicação IPT 2795. São Paulo: IPT, 2003. 312 p. Ilustrado. ISBN 85-09-001-0.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015

Goodman, R. E. and Bray, J. (1976) **Toppling of rock slopes. ASCE, Proc. Specialty Conf. on Rock Eng. for Foundations and Slopes**, Boulder, CO, 2, 201–34

GRUPTA, S. G.; GHONGE, M. M. **Review of Unmanned Aircraft System (UAS).** V. 2, n. 4, p. 1646-1658, 2013.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **Suggested methods of determinig the strength of rock materials in triaxial compression: revised version.** Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., v. 20, n. 6, pp. 283-290, 1983.

MACHADO, S. C. **Danos de desmonte com explosivos em pedreira de granito do Rio de Janeiro.** 2006. 141f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MARICATO, E. (1996). **Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência.** São Paulo, Hucitec.

MULLER, H. J. The relation of recombination to mutational advance. **Mutation research**, v. 106, p. 2–9, 1964.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* **ORÓGENO ARAÇUAÍ: SÍNTESE DO CONHECIMENTO 30 ANOS APÓS ALMEIDA 1977.** Geonomos, p. 294, 2007.

Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M. & Pinto, C.P. 2001. **The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly.** Precambrian Research, 110: 307-323.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo Blucher 2016 1 recurso online ISBN 9788521209584.

SALA, Z.; HUTCHINSON, D. J.; HARRAP, R. **Simulation of fragmental rockfalls detected using terrestrial laser scans from rock slopes in south-central British Columbia, Canada**. *Natural hazards and earth system sciences*, v. 19, n. 11, p. 2385–2404, 2019.

SIQUEIRA, M. da P. S. (2001). **Industrialização e empobrecimento urbano: o caso da Grande Vitória (1950-1980)**. Vitória, Edufes.

SOARES, A. C. P. *et al.* **Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977**. *Geonomos*, v. 15, p. 1-16, 2007. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11628>>. Acesso em: 20 de jun. 2017

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia**. *Notícias Geomorfológicas*, nº 6, V (32) / 1976, p. 71-104.

VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A. da; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. **Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo, escala 1:400.000**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EXPLORAÇÃO MINERAL - SIMEXMIN,6,2014. Ouro Preto. Seção Pôster ...Ouro Preto: ADIMB/ CPRM,2014. Disponível em: Acesso em 24, abril, 2014.

WALTON, G. **Technical review of the stability and hydrogeology of mineral workings**. Department of Mining Engineering, Nottingham University, rel. interno, 1985. 245p.

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Christopher W.. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4. ed. New York: Spon Press, 2004. 431 p.