

CONDICIONANTES GEOLÓGICAS DE MOVIMENTOS DE MASSA EM MACIÇOS ROCHOSOS: ESTUDO DO ACIDENTE OCORRIDO NA RUA URUGUAI, PETRÓPOLIS, RIO DE JANEIRO, BRASIL

GEOLOGICAL CONDITIONS OF MASS MOVEMENTS IN ROCKY MASSIFS: STUDY OF THE ACCIDENT THAT OCCURRED IN URUGUAI STREET, PETRÓPOLIS, RIO DE JANEIRO, BRASIL

LARISSA MOZER BLAUDT
*Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil
larissamozer13@gmail.com*

RUBEM PORTO JR
*Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil
rubempjr@gmail.com*

YURI GARIN
*Prefeitura de Petrópolis
Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil
ygarin@geologia.ufrj.br*

RESUMO ABSTRACT

Movimentos de massa em maciços rochosos são comuns nas cidades serranas do Brasil e reconhecer quais fatores determinam a sua ocorrência é de grande importância para a segurança das populações que vivem em áreas de risco. O objetivo deste artigo é levantar as características geológicas que contribuíram para a deflagração do acidente ocorrido na Pedra do Quitandinha em novembro de 2016 e que atingiu residências na Rua Uruguai, cidade de Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil. Foram determinadas as características petrográficas, estruturais e tecnológicas das rochas do maciço em questão, além das interações entre essas características e o clima da região. Os resultados obtidos podem ser aplicados como base para estudos em outros maciços rochosos existentes em situações climáticas e geomorfológicas semelhantes.

Palavras-chave: movimentos de massa, queda de blocos; escorregamentos; risco geológico

Mass movements in rocky massifs are common in the mountainous cities in Brazil and recognizing which factors determine their occurrence is very important for the safety of the populations living in risk areas. The purpose of this paper is to survey the geological features that contributed to the deflagration of the accident occurred in Quitandinha Massif in November 2016 and that reached some residences in Uruguai Street, Petrópolis city, Rio de Janeiro, Brazil. The petrographic, structural and technological features of the massif were determined, in addition to the interactions between these features and the region's climate. The results can be applied as a basis for studies in other rocky massifs that exist in similar climatic and geomorphological situations.

Keywords: mass movements; rock fall; landslides; geological risk

1 INTRODUÇÃO

Os casos de movimentos de massa associados a maciços rochosos são comuns a muitas áreas do sudeste do Brasil, principalmente à Serra do Mar, feição geomorfológica de importância nesta área e onde se inserem importantes cidades, principalmente no Estado do Rio de Janeiro. Durante o verão, as chuvas intensas que se formam a partir da ascendência orográfica da umidade vinda do oceano causam enchentes e deslizamentos, ocasionando perdas materiais e de vidas (Guerra *et al.*, 2007).

Determinar quais fatores levam à ocorrência de movimentos de massa associados a maciços rochosos é muito importante para demarcar as áreas de risco e coordenar os investimentos em obras de contenção, de maneira a evitar que mais vidas sejam afetadas por esse tipo de acidente. Sendo assim, o objetivo deste artigo é levantar as características geológicas associadas à ocorrência do movimento de massa ocorrido na Rua Uruguai, município de Petrópolis, em novembro de 2016.

O estudo deste acidente se faz importante, pois ele ocorreu em condições tipicamente encontradas em outros pontos da Serra do Mar no Estado do Rio de Janeiro. No mesmo município de Petrópolis, outro caso relevante de queda de blocos ocorreu no distrito da Posse, em 22 de janeiro de 2019, atingindo seis casas. Outro caso de destaque ocorreu em Nova Friburgo em 12 de janeiro de 2011, no bairro Duas Pedras, quando blocos de rocha atingiram um hospital. Todos estes outros acidentes apontam para processos de detonação e movimentação similares.

2 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Petrópolis foi a primeira cidade planejada do Brasil, sendo projetada para abrigar a Família Imperial brasileira e sua corte durante os meses de verão. O Imperador D. Pedro II contratou o engenheiro alemão Major Júlio Frederico Koeler para criar um plano de urbanização para as fazendas da região, especialmente a Fazenda do Córrego Seco e a Fazenda Quitandinha (Pedroso, 2014). O Plano Koeler, como foi conhecido o projeto urbanístico, dividiu a cidade em lotes, chamados “*prazos de terra*”, com diferentes fun-

ções, desde os lotes destinados à agricultura, até os lotes destinados às funções administrativas do Império.

O Major Koeler passou cerca de dois anos na região estudando suas características topográficas e demarcando as terras. O objetivo desse estudo prévio era adaptar o traçado urbano ao meio ambiente da área. Os “*prazos de terra*” foram distribuídos ao longo do traçado dos rios, com as ruas e avenidas os margeando, e as encostas não poderiam ser ocupadas, para evitar deslizamentos e garantir a conservação das matas e das águas (Pedroso, 2014). O traçado urbano também visava resolver questões de saneamento. As residências deveriam ser construídas nos fundos dos lotes, valorizando os rios e evitando a contaminação das águas por dejetos vindos das casas.

A cidade foi ocupada por famílias de colonos alemães, grande parte vinda do Grão Ducado de Hesse, onde é o atual estado alemão Renânia-Palatinado, no sudoeste do país. A chegada dos imigrantes ocorreu em 29 de junho de 1845, data oficial da fundação da cidade (Pedroso, 2014). Poucos anos após a fundação, com o crescimento da população e a valorização dos terrenos, os colonos venderam partes de seus lotes e vias transversais foram criadas, extinguindo as características originais do Plano Koeler. Uma grande expansão populacional ocorreu na cidade na segunda metade do Século XX, com a ocupação das áreas mais inclinadas e com maior risco de deslizamentos (Guerra *et al.*, 2007).

A combinação de clima e relevo são fatores condicionantes na ocorrência de áreas de risco de ocorrência de movimentos de massa na cidade de Petrópolis. A cidade está localizada na Região das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, especificamente na Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos (Guerra *et al.*, 2007), sendo caracterizada por vales alongados, segmentos de drenagem retilíneos, maciços graníticos, grandes desníveis altimétricos e escarpas íngremes.

O relevo acidentado permite o processo de ascendência orográfica, que é o aumento da turbulência do ar durante a passagem de frentes frias. Episódios intensos e prolongados de precipitação ocorrem, pois o ar quente e úmido se eleva e perde temperatura, formando grandes nuvens de chuva (Guerra *et al.*, 2007). O clima da cidade é defini-

do como Tropical de Altitude, com pluviosidade média anual acima de 2.500 mm e temperaturas médias inferiores a 18°C no inverno e pouco superiores a 21°C no verão. As chuvas se concentram de outubro a março, com médias pluviométricas mensais de cerca de 300 mm (Guerra *et al.*, 2007).

A cidade de Petrópolis é drenada pelo Rio Piabanha, que possui cerca de 80 km de extensão e uma área de drenagem de 2.065 km² e é um dos principais afluentes do Rio Paraíba do Sul. Os dois principais afluentes do Rio Piabanha na cidade de Petrópolis são os rios Palatinado e Quitandinha (IBGE, 2017). A combinação de obras realizadas nos canais, assoreamento dos leitos e o escoamento rápido das águas, que ocorre por conta das encostas íngremes e urbanizadas, gera inundações frequentes em episódios de chuvas intensas.

Entre 1985 e 2004 ocorreu um aumento de 45% da área urbana de Petrópolis, principalmente ao longo dos eixos rodoviários de acesso à cidade

do Rio de Janeiro, e as áreas de vegetação originais diminuíram em 57% (Guerra *et al.*, 2007). A ocupação irregular das encostas, acentuada a partir das décadas de 1970 e 1980, oferece grande risco para a população de Petrópolis. A condição socioeconômica dos residentes dessas áreas também é um fator relevante para a condição de risco. Em geral, os moradores possuem baixo poder aquisitivo e isso implica em baixo padrão construtivo, uso de materiais impróprios, falta de acompanhamento técnico e uso de técnicas inadequadas (Guerra *et al.*, 2007).

O movimento de massa gravitacional (MMG) aqui estudado ocorreu às 22h40min do dia 14 de novembro de 2016, no Bairro Quitandinha, Petrópolis, especificamente entre as residências nº70 e nº199 da Rua Uruguai (Figura 1). O material mobilizado atingiu um compartimento de água responsável pelo abastecimento do bairro, quatro casas e levou duas pessoas a óbito (Figura 2).

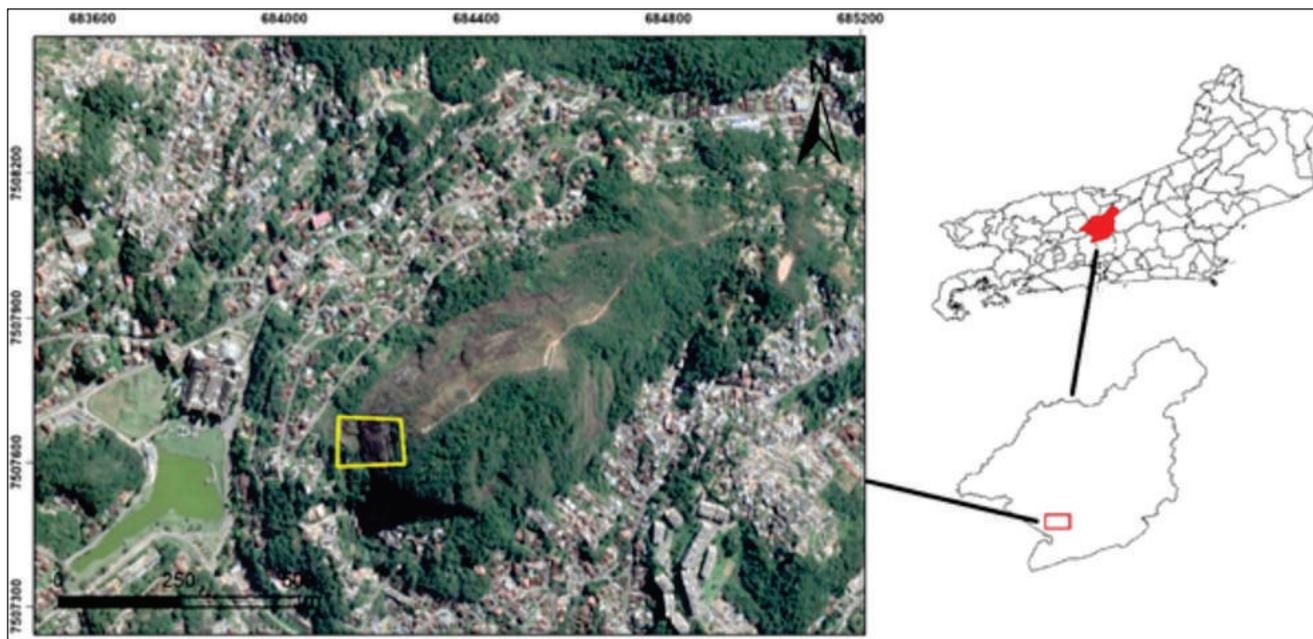


Figura 1. Localização da área do acidente.



(a)



(b)

Figura 2. Em (a), residências existentes na Rua Uruguai antes do deslizamento; em (b), residências atingidas pelo deslizamento. Fotos cedidas pelo Departamento Técnico da Defesa Civil de Petrópolis (DT-SDCAV).

Os estudos realizados pelos técnicos da Prefeitura de Petrópolis o caracterizaram como um deslizamento planar de lascas e blocos rochosos, que se iniciou no terço superior da encosta. O movimento foi do tipo queda livre até atingir o plano inclinado do depósito de tálus, onde se encontravam as residências atingidas (Relatório DRM-RJ, 2016). O material mobilizado, formado por solo areno-argiloso, blocos de rocha e troncos de árvo-

re, foi desacelerado pelo impacto com os materiais do depósito de tálus, com as próprias residências destruídas e com o platô formado pela Rua Uruguai (Figura 3a). A expansão lateral do material foi limitada pela existência de um grande bloco rochoso na lateral direita da encosta, concentrando o fluxo de blocos na área das residências destruídas (Figura 3b).



(a)



(b)

Figura 3. (a) Imagem aérea da Rua Uruguai e das residências atingidas; observar que o material não ultrapassa o platô formado pela rua; (b) À direita da figura, bloco rochosos que limitou a expansão lateral do movimento. Fotos cedidas pelo DT-SDCAV.

A encosta, da Rua Uruguai até o seu topo, apresenta cerca de 160 metros de altura e inclinação média de 43° , sendo que na área de origem do evento a inclinação é de 66° , na área de transporte é de 48° e na área de deposição é de 21° (Figura 4).

O acidente ocorreu durante a passagem de uma frente fria pelo Estado do Rio de Janeiro, que provocou chuvas contínuas no mês de novembro,

principalmente entre os dias 12 e 14, gerando uma média antecedente de cerca de 270 mm. Apesar de os dados do pluviômetro mais próximo (Rua Amazonas-Quitandinha, CEMADEN) não terem registrado precipitações significativas no momento do acidente, o acumulado de 24 horas foi de 112,8 mm para o dia 13/11 e o acumulado mensal foi de 383,6 mm (Figura 5)

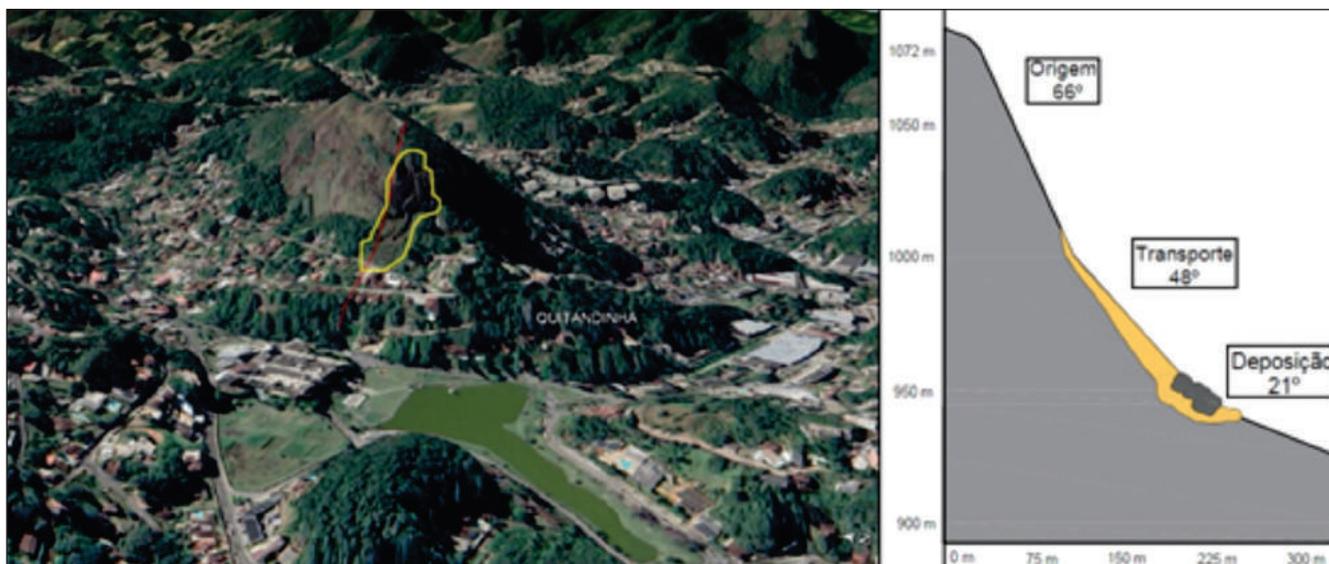


Figura 4. Perfil de inclinação da encosta com as características do acidente.

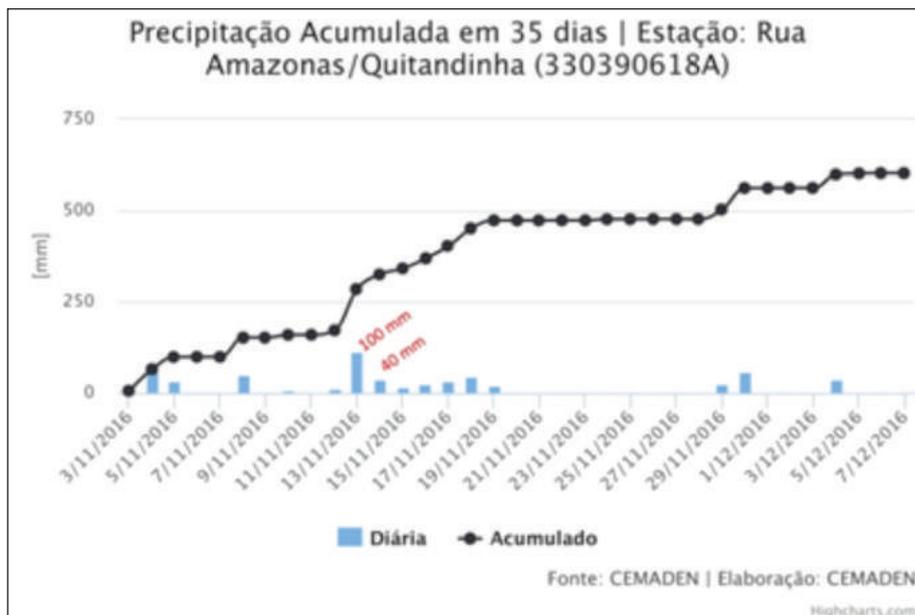


Figura 5. Precipitação acumulada para o pluviômetro da Estação Rua Amazonas-Quitandinha. Retirado de Relatório CPRM, 2016 e elaborado pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais).

Após o acidente foram realizadas vistorias pela Defesa Civil e pelo DRM-RJ (Departamento de Recursos Minerais – RJ) a fim de avaliar o risco remanescente de outras movimentações na área atingida e de outros deslizamentos nas áreas adjacentes, definindo a necessidade de interdição das residências vizinhas (Relatórios de Ocorrência SDCAV nº 32759, 32769 e 32869). As medidas emergenciais realizadas foram a desobstrução da Rua Uruguai e a interdição das residências inseridas na área de risco remanescente (Relatório DRM-RJ, 2016). O material mobilizado pelo acidente foi utilizado para a construção de um dique de blocos na área das residências atingidas, amparando possíveis quedas de outros blocos (Figura 6).



Figura 6. Dique construído com o material rochoso que deslizou da encosta. Fotos cedidas pelo DT-SDCAV.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Por definição, os maciços rochosos são heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos e sua estabilidade depende fortemente da presença e das características de descontinuidades, como abertura, espaçamento, persistência e preenchimento (Pinotti e Carneiro, 2013; Serra Junior e Oujima, 1998). Sendo assim, estudar e reconhecer as características estruturais de um maciço rochoso é de suma importância para determinar as áreas de risco de quedas de blocos. A presença de descontinuidades permite a percolação de água pelo maciço, promovendo a alteração da rocha e a perda de suas características mecânicas.

Para determinar quais fatores levaram à ocorrência do movimento de massa estudado foram determinadas as características litológicas,

estruturais e tecnológicas do maciço, além da recuperação de dados e imagens da Defesa Civil do município de Petrópolis.

Nos trabalhos de campo foram feitas observações quanto à litologia existente e de seu padrão estrutural, obtendo-se dados como medidas de direção e mergulho das fraturas, descrições sobre a composição mineralógica e as características texturais das rochas. Também foram observadas as características de alterações intempéricas químicas e físicas da rocha e das fraturas que ocorrem no maciço. Por conta das dificuldades de acesso ao terreno, não foi possível observar com detalhes as relações de contato entre os dois tipos de rochas presentes no maciço. Foi realizada amostragem de rochas com diferentes graus aparentes de alteração para serem analisadas em laboratório.

As análises laboratoriais foram divididas em três etapas: 1) análise macroscópica e microscópica dos litotipos para determinar as características mineralógicas, texturais e de alteração das rochas, além de realizar a sua classificação; 2) análise dos dados estruturais através dos softwares Stereonet 9.2.3 e Stereo 32 1.0.1, para determinar as famílias de direções preferenciais das fraturas existentes no maciço e; 3) testes de Ultrassom e Esclerômetro de Schmidt, com o objetivo de determinar o grau de alteração das rochas que se desprenderam no movimento.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização litológica

A geologia da região de Petrópolis é caracterizada pela ocorrência de um complexo granítico-gnáissico-migmatítico definido por Rosier (1965) como “Série Serra dos Órgãos”. Esse complexo foi subdividido por Penha *et al.* (1981) em cinco unidades de mapeamento: Unidade Santo Aleixo, Unidade Bingen, Unidade o, Granito Suruí e Granito Andorinha. A Unidade Bingen, na qual está inserida a área de estudo, é formada por um biotita gnaiss granítico homogêneo, de granulometria fina a média e cor clara. Apresenta gnaissificação moderada com porções internadas com texturas ainda tipicamente relacionadas ao protólito magmático de composição granítica.

Para a caracterização dos litotipos ocorrentes na área estudada foram coletadas amostras de rocha na trilha que acessa o topo da Pedra do Quitandinha e amostras do dique de contenção da Rua Uruguai. No maciço foram identificados dois tipos de rocha: um gnaiss homogêneo e veios de pegmatito, sendo o primeiro predominante.

4.1.1 Biotita-hornblenda gnaiss homogêneo

Por toda a área mapeada do maciço, o biotita gnaiss se apresenta como uma rocha homogênea, sem bandamento metamórfico bem definido, dobras ou qualquer outra estrutura típica de rochas de alto grau metamórfico, mas com uma observação detalhada das amostras de mão pode-se observar que os grãos de biotita estão orientados segundo planos subparalelos (Figura 7).

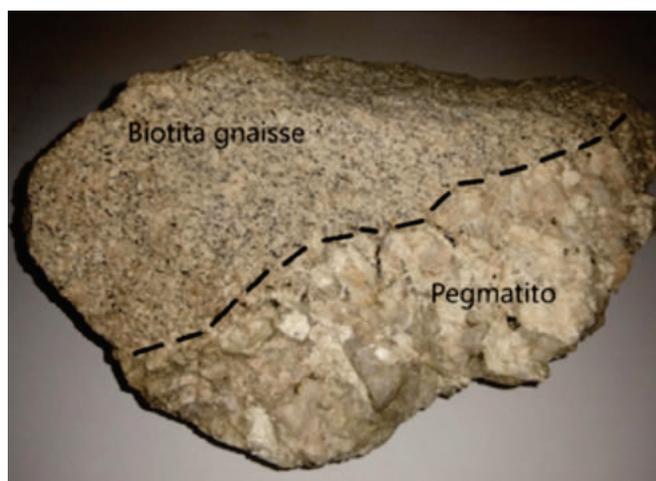


Figura 7. Amostra de mão do biotita gnaiss com veio de pegmatito. É possível observar que os minerais máficos se encontram orientados

Trata-se de uma rocha leucocrática, de cor cinza claro, equigranular de granulação média (1 a 10 mm) e com textura lepidonematoblástica. Sua composição mineralógica básica é plagioclásio, microclina, quartzo, hornblenda, biotita e titanita e seus minerais acessórios são apatita, zircão e minerais opacos (Figura 8).

Existem dois tipos de grãos de plagioclásio. O primeiro é caracterizado por grãos subédricos, de cerca de 1 mm, nos quais é possível visualizar geminação (Figura 9). Estão levemente fraturados e pouco alterados, apresentando alteração apenas nos poucos planos de clivagem e nas fraturas. Podem ter inclusões de outros grãos de plagioclásio

arredondados e zircão. O segundo tipo é reconhecido como grãos anédricos a subédricos tabulares/prismáticos, variando de 1 a 2 mm. Nesses grãos a geminação é muito fraca ou ausente e a alteração é leve, podendo ocorrer apenas nos seus núcleos ou nos planos de clivagem e nas fraturas (Figura 10). Podem ocorrer inclusões de zircão.

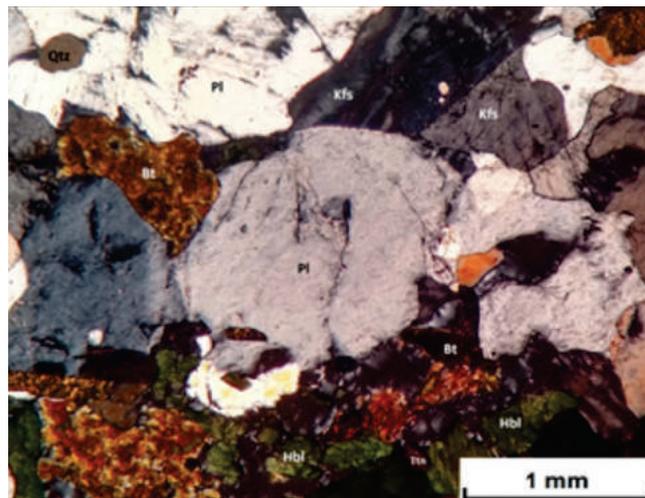


Figura 8. Aspecto geral do biotita-hornblenda gnaiss. É possível observar seus minerais principais quartzo (Qtz), microclina (Kfs), plagioclásio (Pl), biotita (Bt) e hornblenda (Hbl). Observar a orientação dos minerais máficos e a textura equigranular média.

A microclina se caracteriza por grãos anédricos a subédricos tabulares que variam de 0,5 a 1 mm. Suas bordas podem estar corroídas por grãos de quartzo (Figura 11). Alguns grãos podem ter quartzo arredondado, biotita e zircão inclusos (Figura 12). Os grãos estão pouco alterados e quando ocorre, o processo de concentração nas suas bordas, especialmente quando estas estão fraturadas. Os grãos de quartzo são anédricos, intersticiais, possuem cerca de 1 mm e podem ter extinção ondulante (Figura 13). Também ocorrem como grãos arredondados de menos de 0,5 mm inclusos em outros minerais.

A hornblenda é descrita como grãos anédricos que variam de 0,5 a 1 mm. Apresentam pleocroísmo de marrom-claro para verde-escuro e se organizam em aglomerados orientados com biotita, titanita, zircão, apatita e minerais opacos (Figura 14). Os grãos de biotita são subédricos de hábito tabular e possuem de 0,5 a 1 mm. Existe uma variação pouco ou nada alterada, que apresenta pleocroísmo de marrom-claro para marrom-escuro (Figura 15) e uma variação mais alterada, com

pleocroísmo fraco de castanho para marrom-escuro (Figura 16). Ambas as variações se encontram orientadas nos aglomerados de minerais máficos.

A titanita ocorre como grãos de 0,5 a 1 mm. Em geral os grãos maiores são subédricos de hábito rômboico e estão intensamente fraturados (Fi-

gura 17) e os grãos menores são anédricos (Figura 18). Em relação aos minerais acessórios, zircão e apatita ocorrem inclusos em outros minerais e os minerais opacos, que são escassos, ocorrem principalmente associados aos grãos de biotita.

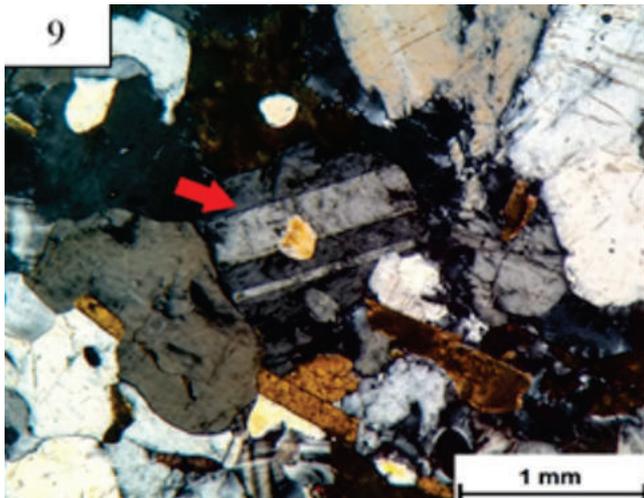


Figura 9. Grão de plagioclásio tabular de aproximadamente 1 mm, pouco alterado, com geminação visível e com inclusões de quartzo arredondado.

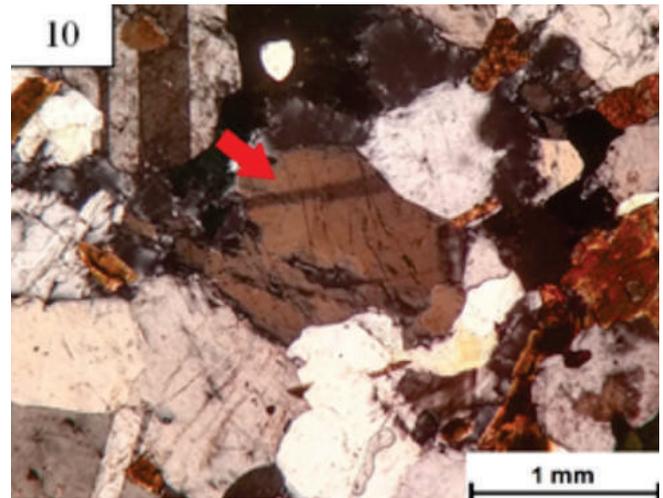


Figura 10. Grão de plagioclásio de hábito tabular com aproximadamente 1 mm. Sua geminação é mais difícil de ser identificada.

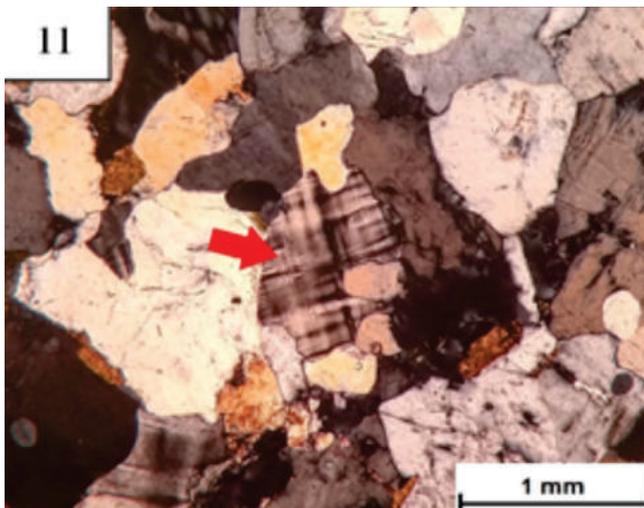


Figura 11. Grão de microclina de aproximadamente 1 mm e hábito tabular. Suas bordas estão corroídas por grãos de quartzo arredondados.

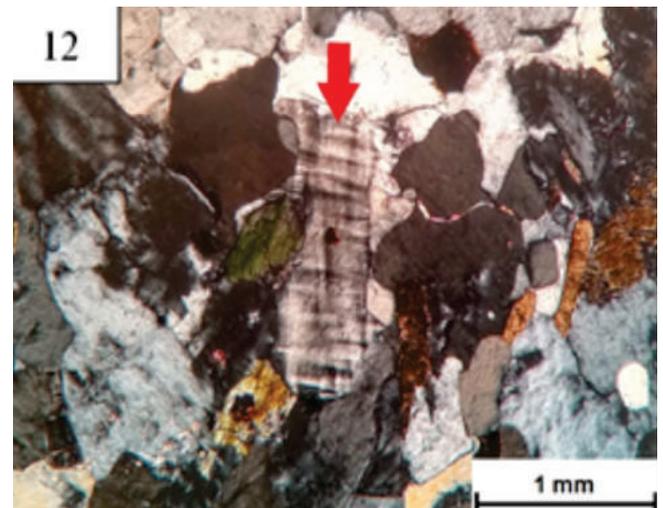


Figura 12. Grão de microclina de hábito prismático e aproximadamente 1 mm. Suas bordas estão modificadas por grãos de quartzo e hornblenda e ocorre inclusão de biotita.

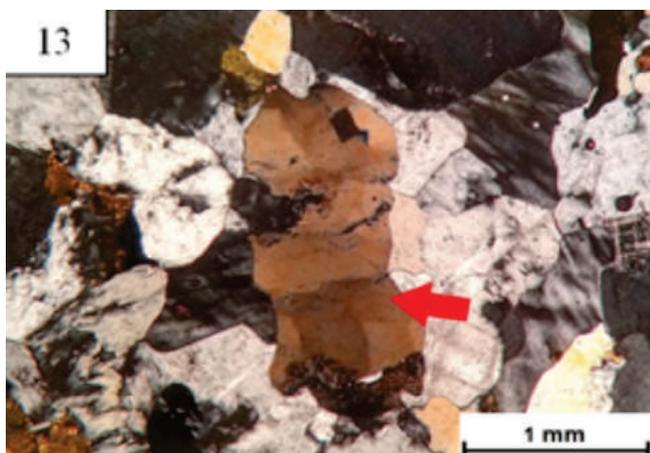


Figura 13. Grão de quartzo intersticial, anédrico e com aproximadamente 1,5 mm. Apresenta extinção ondulante.

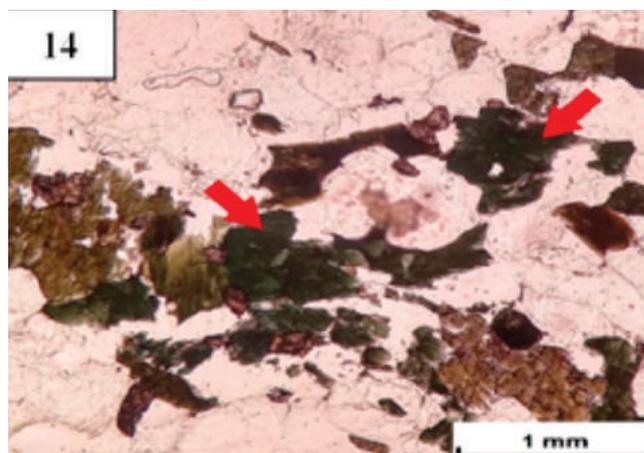


Figura 14. Aglomerado de minerais máficos com hornblenda, biotita e titanita. Grãos de hornblenda anédricos de aproximadamente 0,5 mm.

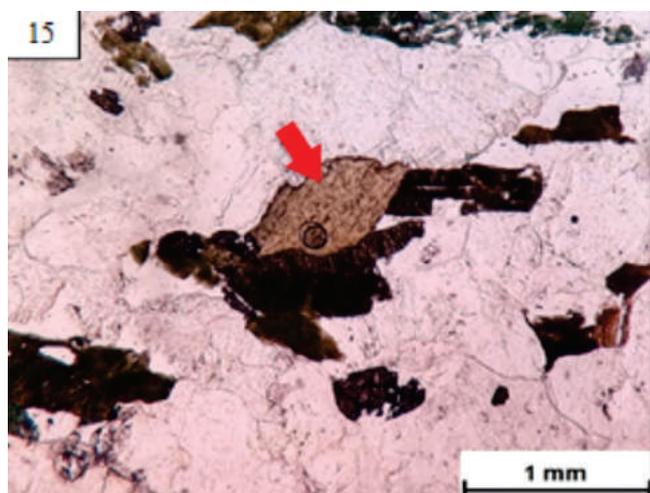


Figura 15. Aglomerado de grãos de biotita pouco ou nada alterados, de aproximadamente 0,5 mm e hábito tabular.

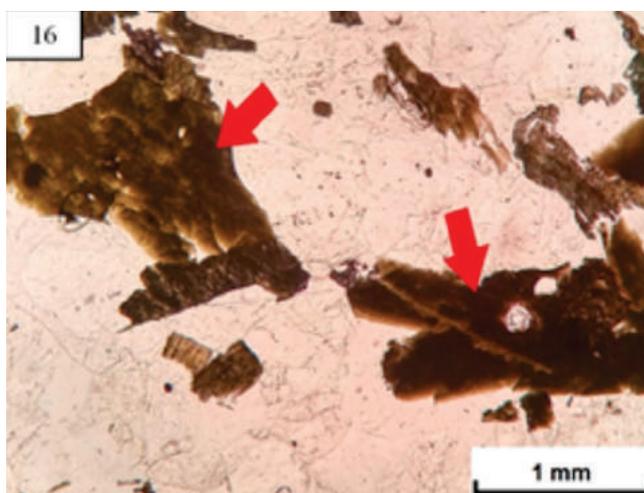


Figura 16. Grãos de biotita alterados, de hábito tabular e aproximadamente 1 mm. Apresentam pleocroísmo muito fraco de castanho para marrom-escuro.

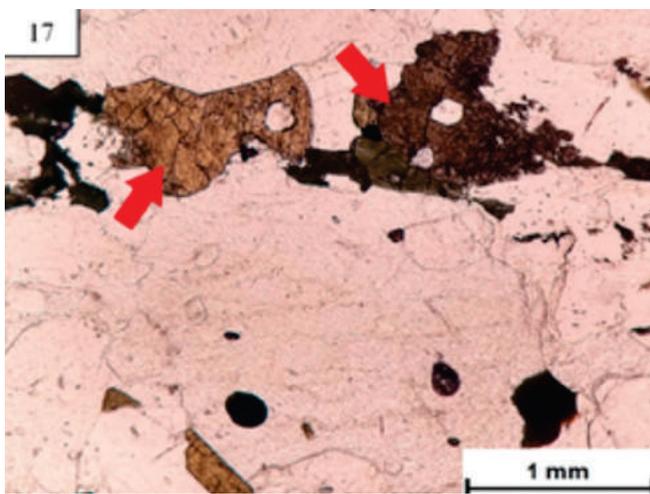


Figura 17. Grãos de titanita intensamente fraturados, de aproximadamente 1 mm e hábito rômboico.

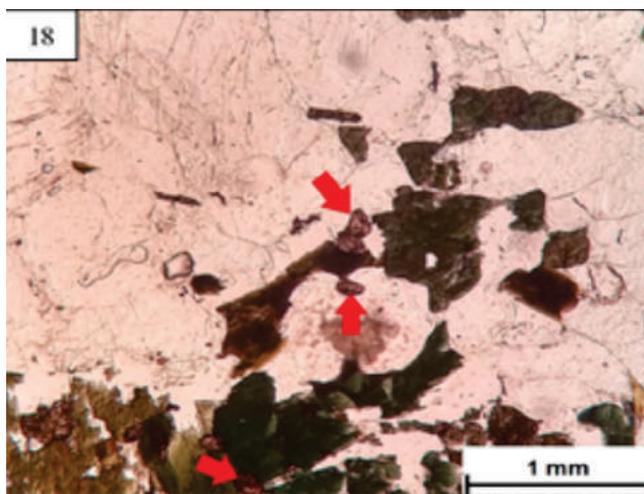


Figura 18. Grãos de titanita anédricos com menos de 0,5 mm, em aglomerado máfico.

4.1.2 Veios de pegmatito

O pegmatito ocorre na forma de bolsões e veios de espessuras e orientações variadas, disseminados por toda a extensão da área estudada (Figura 19). Trata-se de uma massa hololeucocrática, de cor branco acinzentado e granulação grossa a muito grossa. Os principais minerais encontrados são microclina, quartzo, plagioclásio e biotita. Os minerais acessórios são zircão, apatita e minerais opacos.



Figura 19. Veios de pegmatito disseminados pelo gnaiss na área de ruptura do movimento. Foto cedida pelo DT-SDCAV.

Macroscopicamente, a granulação varia de grossa a muito grossa, sendo que os grãos de plagioclásio variam de 4 a 20 mm, os grãos de microclina variam de 5 a 40 mm, o quartzo possui de 2 a 7 mm e a biotita possui de 1 a 7 mm. A composição média da rocha é: microclina (36%), quartzo (31%), plagioclásio (11%), biotita (11%) e outros (2%). A partir desta composição é possível classificar a rocha como um monzogranito, segundo Streckeisen (1974).

4.1.3 Alteração das rochas

Os dois conjuntos rochosos possuem respostas levemente diferentes em relação aos processos de alteração. O biotita gnaiss, por sua característica textural, apresenta um comportamento mais homogêneo do que o pegmatito. No gnaiss ocorre intensa alteração do plagioclásio, que se trans-

forma em um material esbranquiçado de granulometria muito fina e que nas partes mais externas se torna amarelado (Figura 20). Em amostra de mão não é possível observar alteração dos grãos de biotita. Já nos veios de pegmatito, a alteração modifica e individualiza os grãos, gerando um material friável. Os cristais de microclina e plagioclásio perdem o brilho e assumem um tom amarelado e a biotita se transforma em vermiculita (Figura 21).

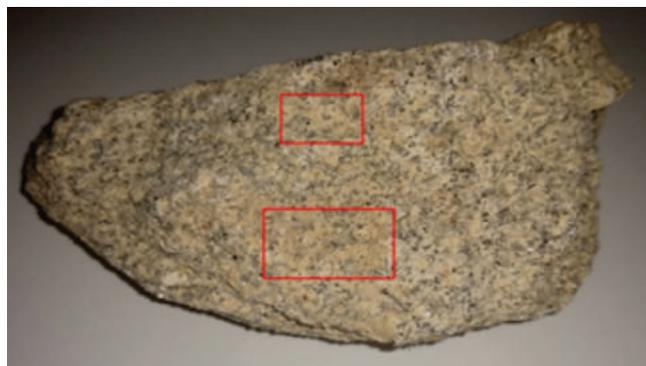


Figura 20. Aspecto do biotita-hornblenda gnaiss alterado. Os retângulos em vermelho indicam as áreas onde a alteração dos minerais é mais perceptível.

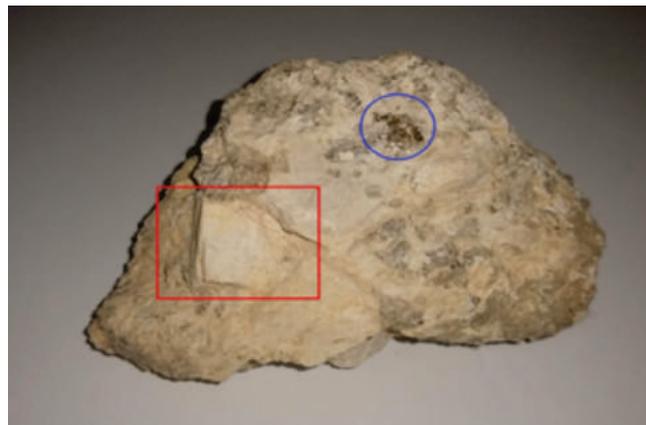


Figura 21. Aspecto do pegmatito alterado. O retângulo em vermelho sinaliza a presença de cristal de microclina alterado e o círculo em azul indica a presença de biotita parcialmente alterada para vermiculita.

4.2 Caracterização estrutural

Nas análises de campo foram identificados dois tipos de estruturas no maciço: fraturas tectônicas e fraturas de alívio. As direções preferenciais dessas estruturas foram determinadas com o uso de estereogramas e gráficos de frequência.

4.2.1 Fraturas tectônicas

Nos afloramentos visitados foi possível identificar dois conjuntos principais de fraturas tectônicas, um com orientação N-S e outro com orientação E-W. Esses dois padrões se cruzam e

formam blocos que são encontrados na área. Uma característica muito notável em relação às fraturas é a sua abertura, que varia de poucos centímetros até aproximadamente um metro (Figura 22), permitindo inclusive o crescimento de vegetação (Figura 23).

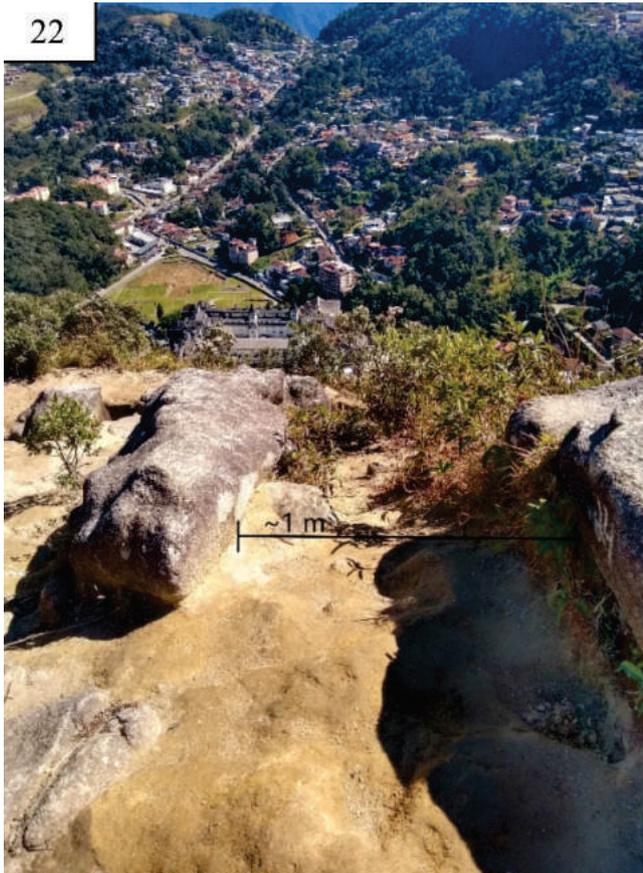


Figura 22. Fraturas tectônicas com abertura de aproximadamente 1 metro no topo da Pedra do Quitandinha. Observar também a formação de blocos pela interseção das fraturas.



Figura 23. Crescimento de vegetação em fratura tectônica com abertura de cerca de 20 centímetros.

A partir da avaliação dos dados de orientação coletados em campo, foram definidas quatro direções preferenciais de fraturas tectônicas (Tabela 1). A direção mais frequente é a E-W, que apresenta mergulho elevado (70° - 90°) tanto para N quanto para S. A segunda direção mais frequente

é a N-S, apresentando mergulho moderado a elevado (50° - 80°) tanto para E quanto para W. As direções menos frequentes são a direção NE-SW, de mergulho moderado a elevado (60° - 80°) para SE e a direção NNW-SSE, de mergulho moderado a elevado (60° - 80°) para NE (Figura 24).

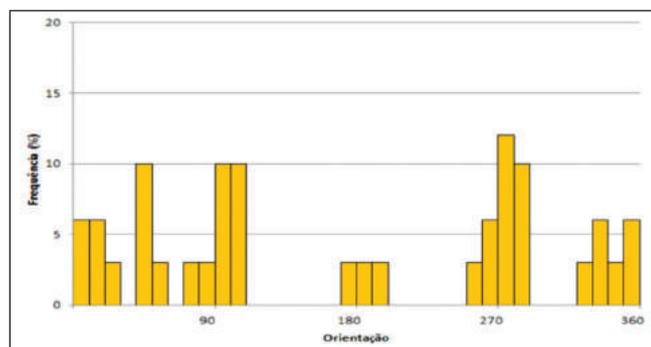


Figura 24. Gráfico de frequência das medidas de direção das fraturas tectônicas medidas na Pedra do Quitandinha.

Tabela 1. Frequência das medidas de direção das fraturas tectônicas.

Direção	Frequência	Frequência Total
N-S	0°-10°	6%
	10°-20°	6%
	170°-180°	3%
	180°-190°	3%
	190°-200°	3%
	350°-360°	6%
NE-SW	20°-30°	3%
	40°-50°	10%
	50°-60°	3%
E-W	70°-80°	3%
	80°-90°	3%
	90°-100°	10%
	100°-110°	10%
	250°-260°	3%
	260°-270°	6%
	270°-280°	12%
	320°-330°	3%
NNW-SSE	330°-340°	6%
	340°-350°	3%

4.2.2 Fraturas de Alívio

As fraturas de alívio foram reconhecidas tanto dos afloramentos visitados quanto nas fotografias e filmagens do deslizamento. Nos afloramentos as fraturas são caracterizadas por seu mergulho muito baixo, às vezes quase horizontal (Figura 25), que aumenta conforme se afasta do topo do maciço. Nas fotografias obtidas após o deslizamento é possível identificar as fraturas de alívio com mergulhas moderado a elevado, acompanhando a morfologia da encosta (Figura 26).



Figura 25. Fraturas de alívio sub-horizontais encontradas no topo da Pedra do Quitandinha.

Os dados de medidas de orientação das fraturas (Tabela 2) foram obtidos nos afloramentos da parte mais superior do maciço, logo, o seu mergulho tende a ser horizontal a baixo (0°-30°). Todas as fraturas possuem mergulho para os quadrantes a oeste, sendo possível identificar três famílias de fraturas: uma família mais frequente, com mergulho para NW, outra com mergulho para W e uma menos ocorrente com mergulho para SW (Figura 27).

Tabela 2. Frequência das medidas de sentido de mergulho das fraturas de alívio encontradas da Pedra do Quitandinha.

Sentido do mergulho	Frequência	Frequência Total
NW	0°-10°	5%
	310°-320°	10%
	320°-330°	15%
	330°-340°	5%
	340°-350°	5%
	350°-360°	10%
W	260°-270°	5%
	270°-280°	10%
	280°-290°	10%
SW	200°-210°	5%
	210°-220°	10%

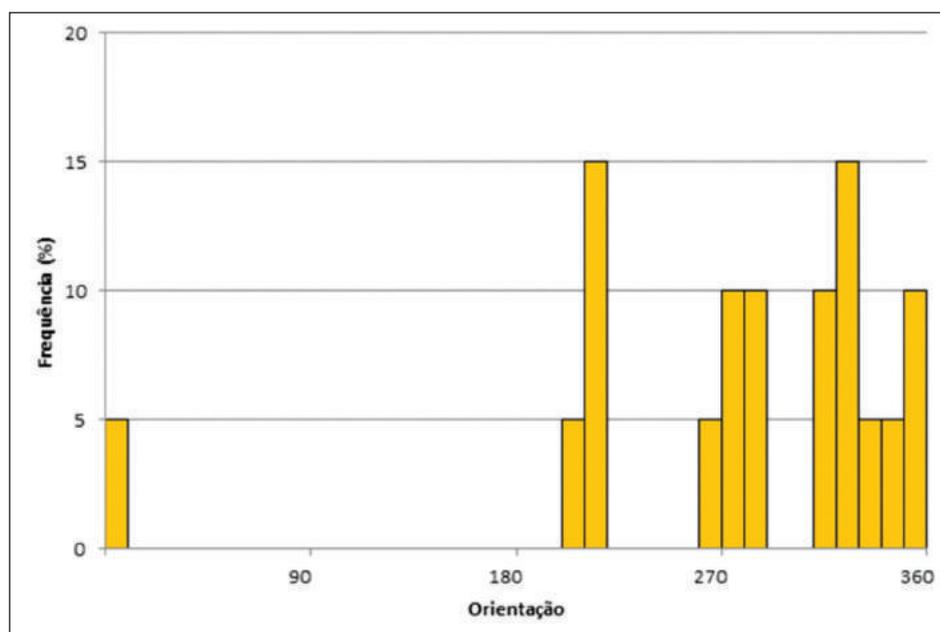


Figura 27. Gráfico de frequência dos valores de sentido de mergulho das fraturas de alívio.

4.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Uma das propriedades mais importantes para determinar a qualidade de um maciço rochosos é o seu grau de alteração, que é o nível de degradação das características mineralógicas de uma rocha. A degradação das rochas ocorre a partir de modificações físico-químicas relacionadas à interação entre a rocha e a hidrosfera e a atmosfera (Serra Junior & Oujima, 1998).

Considerando o tipo de rocha existente na área do acidente, quanto maior for o seu grau de alteração, maior será a perda das suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, maior será a susceptibilidade a ocorrer algum tipo de movimento de massa.

Para definir o grau de alteração das rochas envolvidas no deslizamento foram coletadas amostras da litologia predominante que estivessem visualmente sãs, medianamente alteradas e muito alteradas. Apesar de ocorrer em pouco volume, também foi coletada uma amostra de um veio de pegmatito como fator de comparação (Tabela 3).

Tabela 3. Identificação do grau de alteração aparente das amostras coletadas em campo.

Número da amostra	Características de campo
1	Gnaiss aparentemente são
2	Gnaiss moderadamente alterado
3	Gnaiss bastante alterado
4	Pegmatito levemente alterado

4.3.1 Determinação da massa específica

Os valores de massa específica para cada amostra foram calculados a partir da relação entre as suas dimensões, medidas com um paquímetro, e a sua massa em gramas, obtida a partir de uma balança de precisão de três dígitos.

Os valores de massa específica determinados para as amostras de biotita gnaiss apresentam valores decrescentes da amostra 1 para a amostra 3 (Tabela 4). Não houve variação significativa entre as amostras 1 e 2, entretanto a amostra 3 apresenta um valor bastante inferior (Figura 28). Isso acontece, provavelmente, pois a amostra 3 está mais alterada e, conseqüentemente, é mais porosa. O aumento da porosidade implica em presença de ar no volume da amostra, o que diminui a sua densidade.

A amostra de pegmatito apresenta um valor de massa específica relativamente baixo, consequência de sua composição mineralógica. Uma vez que a rocha é composta quase totalmente por microclina e quartzo, sua massa específica será reflexo da densidade desses minerais.

Tabela 4. Valores determinados de massa específica para as amostras coletadas.

Amostra	Massa Específica (G/cm³)
1	2,74
2	2,72
3	2,64
4	2,65

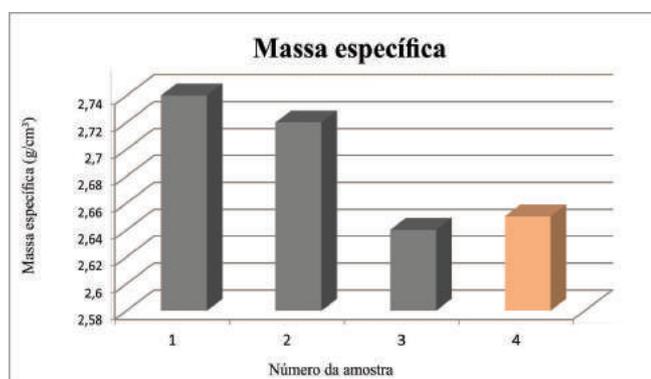


Figura 28. Gráfico com valores de massa específica para cada amostra. Em cinza estão representadas as três amostras de biotita-hornblenda gnaiss e em rosa está representada a amostra de pegmatito.

4.3.2 Ensaio de ultrassom

Por definição, onda é uma perturbação que se propaga através de um meio, transmitindo energia sem transportar matéria (Medeiros, 2007). As ondas podem ser classificadas quanto à natureza em eletromagnéticas, que se propagam tanto no vácuo quanto em todos os materiais, e mecânicas, que necessitam de um meio para se propagar. As ondas sonoras são classificadas como ondas mecânicas e podem ser diferenciadas de acordo com suas frequências em ondas subsônicas (frequências de até 16 Hz), ondas sônicas (frequências entre 16 Hz e 20 Hz) e ondas ultrassônicas (frequências entre 20 Hz e 1000 MHz) (Medeiros, 2007).

A velocidade das ondas depende principalmente do meio de propagação, sendo maior nos sólidos e menor nos líquidos e gases. A velocidade

de de propagação das ondas ultrassônicas em um material sólido, homogêneo e isotrópico depende da densidade e das propriedades elásticas desse material.

O Ensaio de Ultrassom consiste na medição do tempo de propagação das ondas ultrassônicas através de um determinado material, entre um emissor e um receptor, chamados transdutores. O comprimento do material analisado dividido pelo tempo de propagação resulta na velocidade média de propagação da onda ultrassônica (NBR 8802, 2019).

É possível correlacionar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com o grau de alteração das rochas (Tabela 5). Quanto maior for a alteração de uma rocha, maior será a sua porosidade e, conseqüentemente, menor será a velocidade de propagação das ondas. Isso acontece em razão dos poros estarem preenchidos por ar e as ondas ultrassônicas se propagarem com menor velocidade por esse meio (Pinho, 2016).

Tabela 5. Correlação entre grau de alteração das rochas e valores de velocidade ultrassônica em m/s. Retirado de Pinho, 2016.

Grau de Alteração	Velocidade Ultrassônica (m/s)
Sã	>5000
Suavemente Alterada	5000-4000
Moderadamente Alterada	4000-3000
Altamente Alterada	3000-2000
Totalmente Alterada	<2000

As análises foram realizadas nas quatro amostras considerando suas diferentes direções (Figura 29) e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

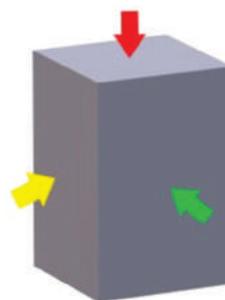


Figura 29. Bloco diagrama representativo das três direções de análise realizadas no Ensaio de Ultrassom: Direção 1 (vermelho), Direção 2 (amarelo) e Direção 3 (verde).

Tabela 6. Resultado das análises de ultrassom realizadas em diferentes direções nas amostras coletadas em campo.

Direção	Valor medido (m/s)	Valor médio (m/s)	Classificação
Amostra 1			
1	5246	5363	Rocha sã
2	5481		
Amostra 2			
1	4523	4367	Rocha suavemente alterada
2	4407		
2.1	4109		
3	4430		
Amostra 3			
1	3053	3587	Rocha moderadamente alterada
2	3577		
3	4130		
Amostra 4			
1	5641	4447	Rocha suavemente alterada
2	3716		
3	3984		

A partir da observação dos resultados das análises realizadas, é possível caracterizar um aumento progressivo do grau de alteração da Amostra 1 para a Amostra 3, representado pela diminuição na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (Figura 30).

**Figura 30.** Gráfico do valor médio de velocidade ultrassônica, em m/s, para cada amostra analisada.

A amostra de pegmatito apresentou diferenças consideráveis de velocidade de propagação das ondas para cada direção. A direção 1 apresentou velocidade compatível com a classe de rocha

sã, enquanto as direções 2 e 3 apresentaram velocidades compatíveis com a classe de rocha moderadamente alterada. Uma possível explicação para isto é a característica anisotrópica da rocha, com orientação dos cristais de microclina segundo a direção 1.

4.3.3 Esclerômetro de Schmidt

O Esclerômetro de Schmidt é um equipamento que mede a dureza superficial de um material rochoso e a correlaciona com a sua resistência à compressão. O ensaio, caracterizado como não destrutivo, é utilizado para determinar propriedades das rochas, concreto, asfalto, argamassa e outros materiais (Brandi *et al.*, 2015).

O princípio mecânico de funcionamento do esclerômetro é a liberação de um pistão sustentado por uma mola sobre uma superfície. A energia de impacto do pistão na superfície é em parte devolvida ao martelo, promovendo seu rebote. O valor do rebote do pistão representa a resistência da superfície ao impacto (Brandi *et al.*, 2015). O valor de rebote é uma consequência das propriedades do material, como elasticidade, resistência e dureza, e pode ser relacionado ao coeficiente de compressão uniaxial através de um gráfico de conversão.

Em geral, rochas pouco alteradas apresentam valores maiores de resistência à compressão uniaxial, quando comparadas a rochas alteradas de mesma composição ou de composições similares, resultado de sua maior resistência mecânica. As rochas mais alteradas apresentam valores progressivamente menores de resistência, reflexo da perda das suas propriedades mecânicas pelo processo de intemperismo.

Para determinar a resistência à compressão uniaxial das rochas envolvidas no acidente da Rua Uruguai, foram realizados dez testes em cada uma das quatro amostras. Os valores de rebote estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 7. Valores de rebote obtidos para cada amostra.

Teste	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
1	49	50	26	52
2	52	52	40	60
3	52	42	32	64
4	49	44	34	65
5	50	50	34	62
6	50	52	30	63
7	50	52	33	63
8	48	54	37	53
9	50	54	34	62
10	52	49	33	59
Média	50,2	49,9	33,3	60,3

Apesar de possuírem graus de alteração diferentes, as amostras 1 e 2 (gnaiss são e gnaiss moderadamente alterado, respectivamente) não apresentaram variação significativa do valor de rebote. Entretanto, a amostra 3 (gnaiss bastante alterado) apresentou um valor consideravelmente inferior, indicando que é necessário atingir um grau de alteração maior para que as propriedades mecânicas da rocha se alterem (Figura 31).

A amostra de pegmatito (Amostra 4) apresentou um valor de rebote substancialmente elevado em comparação com as amostras de gnaiss. Isso acontece por conta das características mineralógicas e texturais do pegmatito: a presença de grandes cristais de microclina e quartzo tornam o material mais resistente ao impacto do esclerômetro.

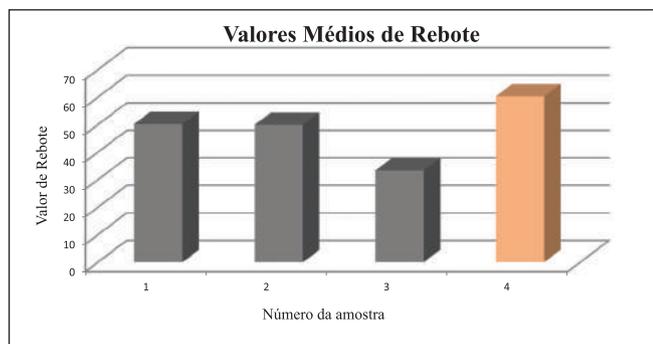


Figura 31. Gráfico dos valores de rebote determinados para cada amostra.

Os valores de rebote foram convertidos para valores de resistência à compressão uniaxial (Figura 32) através de um gráfico que relaciona os valores de rebote com a massa específica da amostra.

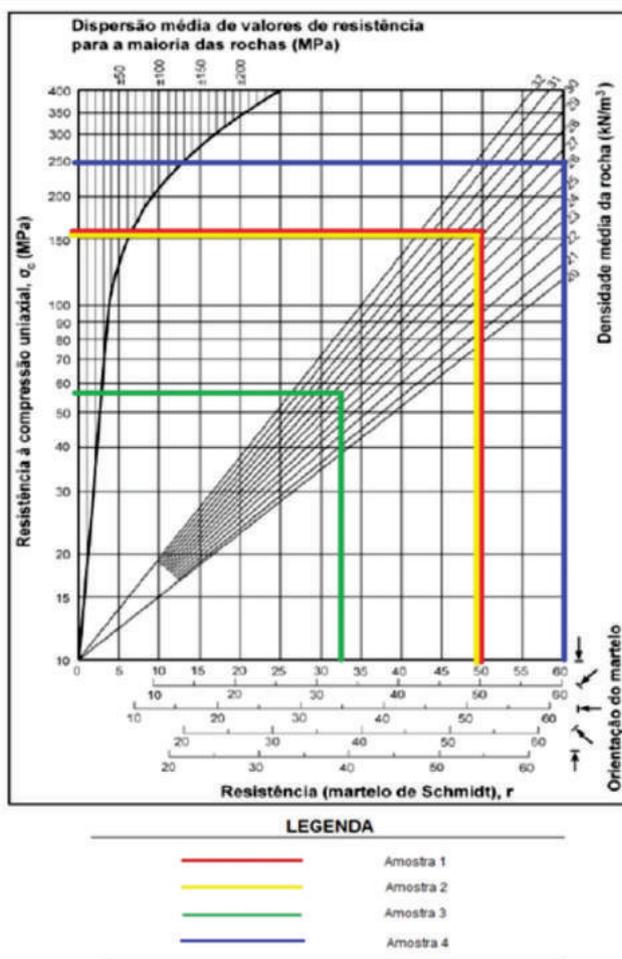


Figura 32. Ábaco de Miller - gráfico de correlação entre os valores de rebote e de resistência à compressão uniaxial das amostras analisadas.

Os valores de resistência à compressão uniaxial seguem o mesmo padrão dos valores de rebote (Figura 33). As amostras 1 e 2 apresentam valores muito semelhantes, enquanto a amostra 3 apresenta um valor bastante inferior. Mais uma vez é possível observar que é necessário um grau de alteração mais elevado para que a rocha perca suas características mecânicas. A amostra de pegmatito exibe um valor muito elevado de resistência à compressão uniaxial quando comparado com os valores das amostras de gnaiss. Esse valor encontrado é reflexo das suas características texturais e mineralógicas, já citadas anteriormente.

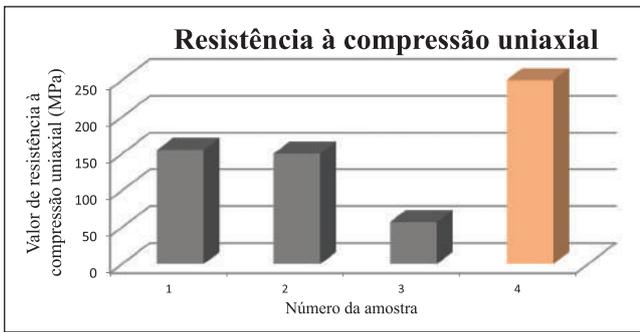


Figura 33. Gráfico com os valores de resistência à compressão uniaxial de cada amostra.

6 CONCLUSÕES

O mapeamento da área do deslizamento permitiu caracterizar diversos aspectos condicionan-

tes que contribuíram para a sua ocorrência. Além dos fatores climáticos, as características geológicas são extremamente importantes para que um movimento de massa ocorra. Observando todos os dados levantados, é possível concluir que o deslizamento ocorreu pela reunião de diversos fatores. A presença de diversas fraturas permite a formação de blocos na parte superior da encosta e ajuda no processo de percolação de água pelo maciço. A água que percola pelas fraturas promove a alteração progressiva da rocha, que perde suas propriedades mecânicas, o que foi observado a partir das análises tecnológicas realizadas (Figura 34).

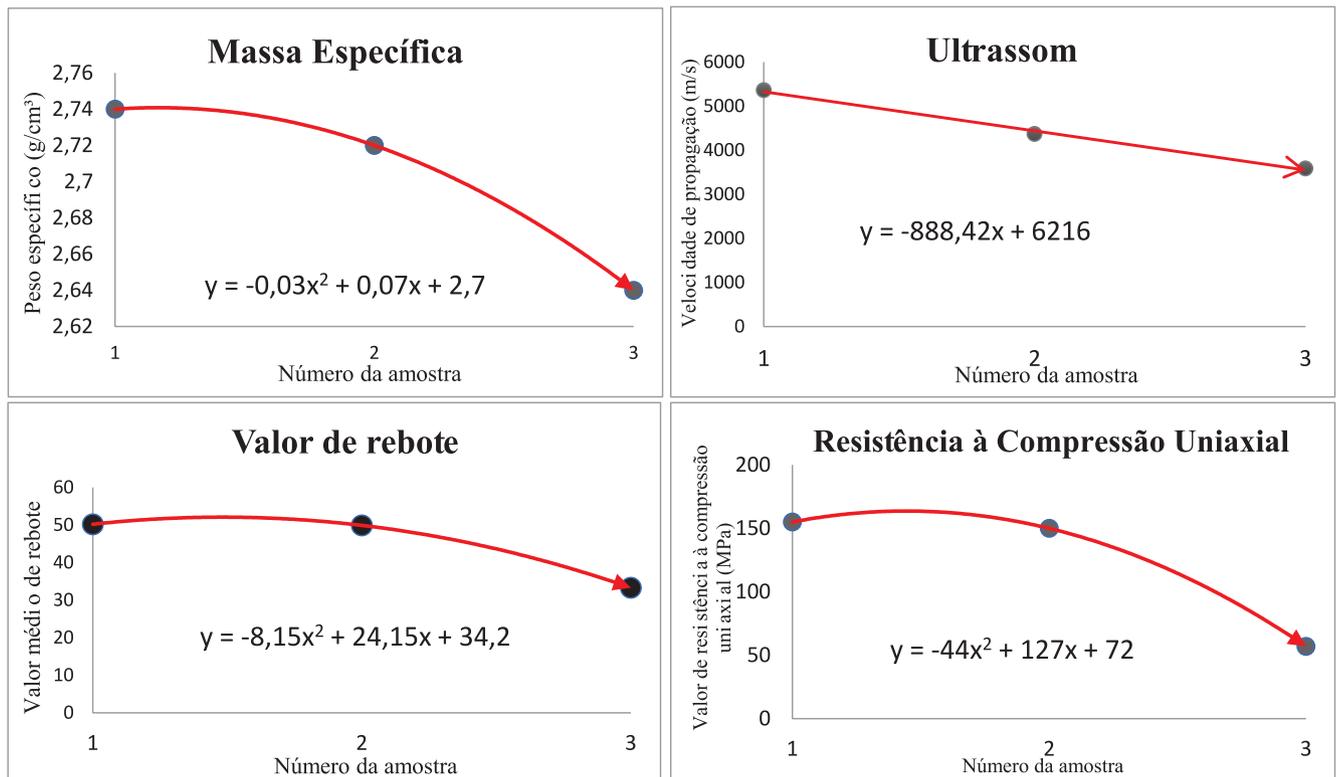


Figura 34. Comparação dos resultados das análises tecnológicas para as amostras do biotita-hornblenda gnaiss

A associação de uma rocha intensamente fraturada, e cada vez menos resistente, com uma encosta muito inclinada, gera grande instabilidade e risco. Com tanta instabilidade latente, bastou um grande volume de chuva acumulado para que a força da gravidade superasse a coesão e a resistência da rocha e o deslizamento acontecesse.

O padrão que levou à ocorrência do movimento de massa na Rua Uruguai se repete por toda a encosta da Pedra do Quitandinha, onde ainda existem diversas residências que poderiam ser atingidas por novos deslizamentos, o que demanda ações objetivas e atenção ao problema por parte dos órgãos competentes.

REFERÊNCIAS

- ABNT - NBR 8802 (2019) - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. 11p.
- Brandi, I; Barbosa, M; Guimarães, R. (2015) - Uso do Esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás-PA. In: Rasteiro, M.A.; Sallun Filho, W. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015, Eldorado. Anais do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Campinas: SBE, 2015. p.: 627-654.
- Guerra, A.J.T.; Gonçalves, L.F.H.; Lopes, P.B.M. (2007) - Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no Município de Petrópolis, nas últimas décadas. Revista Brasileira de Geomorfologia, Rio de Janeiro, v.8, p.: 35-43.
- Medeiros, A. (2007) - Aplicação do ultrassom na estimativa de profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- PPGEC/UFSC, Florianópolis.
- Penha, H.M.; Ferrari, A.L.; Ribeiro, A.; Amador, E.S.; Pentagna, F.; Junho, M.C.B.; Brenner, T.L. (1980) - Geologia da Folha Petrópolis. In: Congresso Brasileiro De Geologia, XXXI, 1980, Balneário de Camboriú. Anais do XXXI Congresso, Volume 5. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 2965-2974.
- Pinotti, A.M.; Carneiro, C.D. (2013) - Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. Terrae Didactica, Campinas, v.9, n.2, p. 132-168, 2013.
- Pedroso, M.M.M. (2014) - Petrópolis: de povoação-colônia a elevação à categoria de cidade, um estudo sobre sua formação urbana. 2014. Dissertação (Mestrado em História Social da Cultura) - Departamento de História Social, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- Pinho, T. M. (2016) - Estudo e análise do grau de alteração em granitos tardi/pós-orogênicos da Faixa Ribeira, no Estado do Rio de Janeiro, através de ondas ultrassônicas, 2016. Monografia (Graduação em Geologia) - Departamento de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Relatório CPRM (2016) - Relatório de visita técnica ao Município de Petrópolis. Serviço Geológico do Brasil (Representado por Thiago Dutra dos Santos, Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff e Marcelo Jorge).
- Relatório DRM-RJ (2016) - Correlação chuvas x escorregamentos no Estado do Rio de Janeiro no mês de novembro de 2016. Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro, Niterói.
- Serra Junior, E.; Ojima, L.M. (1998) - Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: Oliveira, A.M.S.; Britto, S.N.A. (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Cap. 13, p.: 221-226.